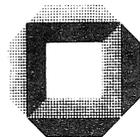


Udo J. Becker
Beobachtung des Straßenverkehrs
vom Flugzeug aus:
Eigenschaften, Berechnung und
Verwendung von Verkehrsgrößen

INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN
UNIVERSITÄT (TH) KARLSRUHE
PROFESSOR DR.-ING. W. LEUTZBACH



Schriftenreihe Heft 41/89 ISSN 0341 - 5503

Dissertation

genehmigt von der

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

Tag der mündlichen Prüfung : 14. November 1988

Hauptreferent : Prof. Dr.-Ing. W. Leutzbach

Korreferent : Prof. Dr.-Ing. H.P. Bähr

**Beobachtung des Straßenverkehrs
vom Flugzeug aus:
Eigenschaften, Berechnung und Verwendung
von Verkehrsgrößen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEURS
von der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte
DISSERTATION

von

Dipl.-W.-Ing. Udo J. Becker
aus Schwenningen

Tag der mündl. Prüfung : 14. November 1988
Hauptreferent : Prof. Dr.-Ing. W. Leutzbach
Korreferent : Prof. Dr.-Ing. H.P. Bähr

Karlsruhe, Oktober 1989

Vorwort

... und sein erfinderischer Geist sann auf Rettung.
Nachdem er lange gebrütet hatte, rief er freudig aus:
“Die Rettung ist gefunden;
mag mich Minos immerhin von Land und Wasser aussperren,
die Luft bleibt mir doch offen.” ...

aus: Dädalus und Ikarus.
nach G. Schwab: Sagen des klassischen Altertums

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe.

Allen, die geholfen haben, danke ich vielmals. Hier ist selbstverständlich an erster Stelle Herr Prof. Dr.-Ing. W. Leutzbach zu nennen, der mich in allen Phasen dieser Arbeit – und nicht nur dort – sehr unterstützt hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. H.P. Bähr danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für alle kritischen Hinweise und Verbesserungsvorschläge.

Der Hauptteil der Untersuchung basiert auf Arbeiten von Herrn Dr.-Ing. Thomas Vögtle. Ihm bin ich zu Dank verpflichtet für die Hilfe in allen Fragen der photogrammetrischen Bildauswertung und das Vertrauen, das die vier Jahre unserer Zusammenarbeit prägte. Ohne die Programmierarbeiten von Emil Huber (der stets den “rettenden Ausweg” fand) und ohne die ausdauernde, ja aufopfernde Unterstützung durch Gudrun Baumgartner und Ele Fritz bei der Berichterstellung wäre die Arbeit wohl ebenfalls nie entstanden.

Schließlich gilt mein Dank allen Kollegen am Institut. Ihre Hilfe, ihr Vorbild und ihr Rat, ungezählte gemeinsame Kaffee- und Teepausen, viele Diskussionen und gemeinsam durcharbeitete Nächte bilden auch eine – wesentliche – Grundlage dieser Arbeit.

Ihnen und Euch allen herzlich “Dankeschön”.

Ich widme die Arbeit meinen Eltern. Ohne sie wäre alles nichts.

Karlsruhe, im Oktober 1989

Udo Becker

Kurzfassung

BECKER, U. J.:

Beobachtung des Straßenverkehrs vom Flugzeug aus:
Eigenschaften, Berechnung und Verwendung von Verkehrsgrößen
166 Seiten, 24 Abbildungen, 17 Tabellen, Abkürzungsverzeichnisse, Literaturverzeichnis

Die Messung von Verkehrsgrößen aus Luftbilddaten besitzt eine Reihe von Vorteilen gegenüber allen anderen Beobachtungsarten. Schwierigkeiten bei der Auswertung und der erforderliche Zeit-, Personal- und Kostenaufwand standen allerdings bisher einer Verwendung in der Praxis entgegen.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Eigenschaften sowie die Vor- und Nachteile dieser Beobachtungsform aus verkehrstechnischer Sicht aufgezeigt. Sodann werden Verfahren zur automatischen Bestimmung, Darstellung und Verwendung von Verkehrsgrößen, insbesondere für den Einsatz auf Schnellverkehrsstraßen, entwickelt. Die Fahrzeugbewegungen werden hierzu in kontinuierlichen Beobachtungsflügen mit einer Video-Kamera erfaßt und aufgezeichnet. Nach dem Flug werden in einer Rechenanlage aus den digital vorliegenden Bilddaten die Grundgrößen der so definierten "bewegten Beobachtung" (Beobachtung vom Flugzeug aus) bestimmt. Aus den Grundgrößen werden die entsprechenden Verkehrsparameter abgeleitet. Ein eigens hierfür entwickeltes System von Umrechnungsbeziehungen ermöglicht Vergleiche bzw. Kombinationen zwischen der bewegten und der lokalen, der momentanen oder der räumlich-zeitlichen Beobachtungsart.

Um aus den Eingangsgrößen "unverzerrte" Verkehrsparameter bestimmen zu können, werden drei grundsätzlich verschiedene Gruppen von Verkehrsgrößen definiert. Für jede Gruppe wird ein Rechenverfahren zur Bestimmung der ihr zugeordneten Parameter angegeben. Damit erlauben die entwickelten Verfahren die Bestimmung praktisch aller relevanten Verkehrsgrößen.

Unter Verwendung eines Zuordnungsprogramms, das die Bewegungslinien der Fahrzeuge näherungsweise berechnet, kann selbst die Verkehrssituation in nicht direkt beobachteten Zeit-Weg-Teilbereichen untersucht werden. Dreidimensionale Darstellungen und statistische Analysen der so bestimmten Verkehrsgrößen eröffnen ein weites Feld neuer Verwendungsbereiche. Eine Varianzanalyse läßt z.B. räumliche oder zeitliche Einflußfaktoren erkennen und bestimmt diese.

Wie die Ergebnisse realer Testflüge zeigen, steht einer Verwendung der Ansätze zur Bestimmung repräsentativer und aussagekräftiger Verkehrsgrößen in der Praxis damit kein Hindernis mehr entgegen.

Summary

BECKER, U.J.:

Aerial Observation of Road Traffic:
Properties, Calculation, and Application of Traffic Parameters.
166 pages, 24 illustrations, 17 tables, table of abbreviations, bibliography

In certain applications aerial observation of road traffic is advantageous compared to all other types of traffic observation. However, this technique is rarely used in practice as costs of the difficult and time-consuming process of manual image evaluation are considered to be too high.

To overcome these problems and to enable the use of all advantages of aerial observation a method for automatic image evaluation was designed. This study presents methods for automatic calculation, representation and analysis of all significant traffic parameters.

In the study the advantages and disadvantages of this type of observation are investigated. A specially developed system of transfer-equations allows comparisons and combinations of local, instantaneous, "moving" and time-space observations. Observations from a flying aircraft are shown to be a special – and in certain aspects expanded – form of the well known "Moving Observer".

In order to calculate unbiased traffic parameters three distinct groups of parameters are defined. For each group an algorithm is given to calculate its parameters. Thus, it is possible to calculate practically the most important traffic parameters.

Using a program to estimate the time-space-trajectory for all vehicles observed more than once, traffic conditions in areas not directly observed from the aircraft can be described. As a result, a data-set becomes available that describes traffic behaviour of all vehicles in the most general form.

Three-dimensional representation and further statistical evaluation of this traffic data offer a wide range of different applications. For instance, analysis of variance can be used to determine type and size of underlying influences on traffic parameters (both time-dependant and/or distance-dependant). Other methods can be used as appropriate.

The results of several applications of the methods confirm that unbiased, representative and reliable traffic parameters can be calculated automatically from aerial ("moving") observations. Thus the advantages of this type of observation can be used to its full extent in practice.

Résumé

BECKER, U. J.:

Observation aérienne du trafic routier:
Propriétés, compte et application de paramètres du trafic

166 pages, 24 illustrations, 17 tableaux, listes des abréviations, bibliographie

Les observations à partir de prises de vues aériennes comportent un grand nombre d'avantages par rapport à d'autres types d'observations. Cependant les difficultés qu'implique une telle méthode au niveau du temps, du personnel et du coût, sont un obstacle à l'utilisation dans la pratique de procédé.

Du fait de ces difficultés, des procédés automatiques de détermination, de représentation et d'application des paramètres seront développés dans l'étude suivante à partir d'observations "mouvantes".

Dans ce but, les avantages et inconvénients de ces observations devront tout d'abord être examinés. Comparaisons, ou plutôt combinaisons entre des observations locales, momentanées, "mouvantes" et spacio-temporelles sont rendues possibles par un système conçu à cet effet.

Afin de pouvoir établir à partir des observations aériennes, des paramètres stables concernant le trafic, trois groupes distincts seront définis. Pour chaque groupe un procédé de calcul sera donné pour la détermination des paramètres propres à ce groupe. Ainsi, les procédés développés rendent possible la détermination de pratiquement tous les paramètres importants.

En utilisant un programme de coordination qui calcule approximativement les trajectoires spacio-temporelles des véhicules soumis à plusieurs observations, il sera même possible de faire des déductions sur la situation du trafic dans des zones spacio-temporellement non observables.

Les représentations tridimensionnelles et les analyses statistiques des paramètres du trafic donnés donnent accès à divers secteurs d'application supplémentaires. Une analyse des variances rend possible l'identification de facteurs spaciaux ou temporels influants, et les détermine. Ainsi que les résultats des observations pratiques à partir de vues aériennes le démontrent, rien ne saurait empêcher l'utilisation de ce procédé dans la pratique.

Resumen

BECKER, U.J.:

Observaciones del tráfico desde un avión:

Propiedades, cálculo y uso de las magnitudes del tráfico

166 páginas, 24 ilustraciones, 17 tablas, listas de abreviaciones, bibliografía

Las observaciones mediante foto aérea tienen una serie de ventajas respecto a otro tipo de observaciones. Sin embargo las dificultades en el análisis y los requerimientos necesarios de tiempo, personal y costos correspondientes han sido un impedimento hasta la actualidad para su utilización en la práctica.

En la presente obra se desarrollan por tanto métodos para la definición, representación y utilización automáticas de las magnitudes del tráfico obtenidas de observaciones mediante foto aérea.

Se analizan para ello en principio las ventajas y desventajas de dichas observaciones. Un sistema de relaciones de conversión desarrollado para dicho fin permite comparaciones ó combinaciones entre los tipos de observaciones local, momentaneo, "móvil", y "espacial".

Se definen tres tipos fundamentales de grupos diferentes de magnitudes del tráfico para poder obtener parámetros no distorsionados del mismo partiendo de observaciones mediante foto aérea. Para cada tipo se proporciona un algoritmo para el cálculo de los parámetros de dicho grupo. Los métodos desarrollados permiten así practicamente el cálculo de todas las magnitudes importantes del tráfico.

Aplicando un programa de asignación que ordena de manera aproximada las trayectorias de todos los vehículos que hayan sido observados más de una vez, se pueden tomar conclusiones sobre la situación del tráfico en zonas que no hayan sido observadas directamente.

La representación en tres dimensiones y los análisis estadísticos de las magnitudes del tráfico calculadas abren un amplio campo de nuevas aplicaciones. Un análisis de varianza de los datos permite por ejemplo reconocer la existencia de factores que influyen espacialmente y el cálculo de ellos. Como se ha podido comprobar mediante los resultados de observaciones reales del tráfico desde un avión no existen ya impedimentos en la práctica para la determinación automática de magnitudes del tráfico representativas y de potente caracter informativo.

摘要

烏托·貝克：

道路交通的航空攝影觀測：

各種交通特性、計算及應用

166 頁，24 張圖，15 張表，縮寫詞，參考文獻。

比起其他的觀測方法，航空攝影觀測具有一系列的優點。然而，此一方法在數據攝取上的困難，以及其所導致的時間、人員和金錢上的耗費，卻阻礙了此一方法到目前為止的實際應用。

在本項研究工作中，創立了能夠自動測定、描繪及應用各種經由航空攝影觀測所獲取之交通參數的處理方法。

為此，本文首先探討此一方法的優缺點。並經由比較及綜合其他定點、定時、運動及空間－時間各種觀測方法來建立一套適用於此一方法的換算方式。

為了使此一航空攝影觀測方法能準確地測定各種交通參數，本文將交通參數分成三組加以定義。對於每組參數本文都相對應地提出測定方法。應用這些方法可以實際地計算所有重要的交通參數。

應用一個可近似計算所有多次觀測到的車輛之時間－距離－運動線的編理程式，可估計沒有直接觀察到的時間－距離－部分區域的交通狀況。

經由三維描繪和統計分析各計算出的交通參數，本文進一步開闢了新的應用領域。比如，通過對數據的變異分析，可得知所存在空間或時間方面的影響因素，並確定這些因素。正如在飛機上進行實際交通觀測的結果顯示，此一自動測定各種具有代表性及強烈說明力的交通參數的方法，在實際的應用上是無可置疑的。

Inhaltsverzeichnis

1	Zur vorliegenden Arbeit	1
1.1	Einführung	1
1.2	Begriffsbestimmungen	4
1.2.1	Lokale Beobachtung	9
1.2.2	Momentane Beobachtung	9
1.2.3	Bewegte Beobachtung	10
1.2.4	Räumlich-zeitliche Beobachtung	11
1.3	Vorgehen	12
1.3.1	Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte	13
2	Beobachtung des Verkehrs vom Flugzeug aus	15
2.1	Eigenschaften	16
2.2	Vorteile und Möglichkeiten	19
2.3	Nachteile und Schwierigkeiten	22
2.4	Angestrebtes Entwicklungsziel	25
3	Aufnahme und Verarbeitung der Bilddaten	29
3.1	Aufnahme der Bilddaten	29
3.2	Speicherung der Bilddaten	31
3.3	Automatische photogrammetrische Auswertung	32
4	Unterschiede und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Beobachtungsarten	35
4.1	Momentane Beobachtung	36
4.2	Lokale Beobachtung	39

4.3	Bewegte Beobachtung	43
4.3.1	Bewegte Beobachtung im Hinflug	44
4.3.2	Bewegte Beobachtung im Rückflug	48
4.4	Räumlich-zeitliche Beobachtungen	51
4.4.1	Beschreibung der räumlich-zeitlichen Beobachtung	51
4.4.2	Verwendung eines zusätzlichen Beobachters	53
4.4.3	Einführung einer zusätzlichen lokalen Beobachtung	55
4.4.4	Einführung einer theoretisch definierten Begrenzungslinie	58
4.4.5	Definition einer räumlich-zeitlichen Geschwindigkeitsverteilung	65
4.5	Übersicht über die Zusammenhänge	69
4.6	Kombination verschiedener Beobachtungsarten	74
4.7	Zusammenfassung von Abschnitt 4	78
5	Direkte Berechnung von Verkehrsgrößen	79
5.1	Beschreibung der verwendeten Eingangsdaten	79
5.2	Berechnung von Geschwindigkeitskenngrößen	82
5.3	Berechnung der (momentanen) Verkehrsdichte	83
5.3.1	Bestimmung der Verkehrsdichte aus einem Luftbild	83
5.3.2	Bestimmung der Verkehrsdichte aus lokaler und bewegter Beobachtung	84
5.3.3	Bestimmung der Verkehrsdichte aus bewegten Beobachtungen	86
5.3.4	Bestimmung der Verkehrsdichte bei allen anderen Beobachtungsarten	91
5.4	Berechnung der (lokalen) Verkehrsstärke	92
5.4.1	Bestimmung der Verkehrsstärke aus bewegten Beobachtungen	92
5.4.2	Bestimmung einer "theoretischen Verkehrsstärke" aus bewegten Beobachtungen	94

5.4.3	Vergleich von MOVING-OBSERVER und bewegter Beobachtung	95
5.5	Berechnung räumlich-zeitlicher Verkehrsgrößen	98
5.6	Berechnung sonstiger Parameter	99
5.6.1	Einteilung der Verkehrsgrößen in drei Gruppen	100
5.6.2	Bestimmung von Größen aus Gruppe 1	101
5.6.3	Bestimmung von Größen aus Gruppe 2	101
5.6.4	Bestimmung von Größen aus Gruppe 3	104
6	Verfahren zur Bestimmung von Bewegungslinien	105
6.1	Problemdefinition	105
6.2	Vorgehen	107
6.3	Eingangsdaten	108
6.4	Ablauf des Programms	109
6.4.1	Berechnung der "paarweisen" Abweichung	109
6.4.2	Bestimmung eindeutiger Zuordnungen	111
6.4.3	Zuordnung der restlichen Fahrzeuge	112
6.5	Ergebnis des Verfahrens	113
6.6	Programmtests und Fehlerabschätzungen	114
6.6.1	Analyse der Verkehrsdichte	117
6.6.2	Analyse der mittleren Geschwindigkeit	119
6.7	Verwendungsbereiche für das Verfahren	121
7	Berechnung, Darstellung und Interpretation von Verkehrsgrößen aus Zeit-Weg-Fahrlinien	125
7.1	Erstellung der Zeit-Weg-Fahrlinien	126
7.2	Bestimmung des Verkehrszustandes	130

7.2.1	Auswahl repräsentativer Verkehrsgrößen	130
7.2.2	Festlegung von Verkehrszustandsklassen	130
7.3	Grafische Darstellung des Verkehrszustandes	133
7.3.1	“Karten” für Verkehrsgrößen	133
7.3.2	“Ganglinien” und “Profile” für Verkehrsgrößen	135
7.3.3	“Blockdiagramme” für Verkehrsgrößen	139
7.4	Bestimmung von Einflußfaktoren auf den Verkehrszustand	144
7.4.1	Veränderungsanalyse (“VA”)	145
7.4.2	Doppelte Varianz-Analyse (“DVA”)	148
7.4.3	Test und Interpretation der “DVA”	149
7.4.4	Doppelte Varianzanalyse für Zeit-Weg-Teilbereiche	153
7.4.5	Analyse der “Flüssigkeit des Verkehrs”	156
8	Zusammenfassung	161
8.1	Vorgehen und Ergebnis	161
8.2	Einsatzbereiche	164
8.3	Offene Fragen	165
9	Literaturverzeichnis	167

Abkürzungsverzeichnis

Im folgenden werden die im Text verwendeten Abkürzungen der beschriebenen Verkehrsgrößen sowohl alphabetisch als auch systematisch aufgeführt und z.T. erläutert.

Alphabetisches Abkürzungsverzeichnis

- a* Größe eines Teilbereichs der gesamten Zeit-Weg-Beobachtungsfläche A [$m * s$]
- A* Größe der Zeit-Weg-Beobachtungsfläche [$m * s$]
in der Regel: $A = X * T$
- AB* Aufnahmebereich, Länge der im Bild erfaßten Fahrbahn
- b* Beschleunigung in [m/s^2]
- β (Querschnitts-) Belegung
- E* Zahl der Fahrzeuge, die dem MOVING OBSERVER auf der Rückfahrt entgegenkommen
- F* Beobachtete Zeit-Weg-Teilfläche von A [$m * s$]
- $f_i(t)$ Funktion der Bewegungslinie von Fahrzeug "i" (Weg)
- Fz* Fahrzeug
- $g(v)$ Geschwindigkeitsverteilung, relative Anteile der beobachteten Geschwindigkeitsklassen
dabei verwendete Indices:
- bew: bewegte Beobachtung
- l: lokale Beobachtung
- m: momentane Beobachtung
- rz: räumlich-zeitliche Beobachtung
- h* Zahl der im Hinflug beobachteten Fahrzeuge
- k* Verkehrsdichte (momentan), [Fz/km] oder [Fz/m]
- l_i Zahl der Luftbilder, in denen Fz. "i" enthalten ist
- L* fiktive, (sehr große) Zahl von Luftaufnahmen in sehr kurzen Zeitabständen

M	Zahl der lokal (an einem Querschnitt) beobachteten Fahrzeuge
M_a	Zahl der Fahrzeuge, die der MOVING OBSERVER auf der Hinfahrt überholt (aktiv)
M_p	Zahl der Fahrzeuge, von denen der MOVING OBSERVER auf der Hinfahrt überholt wird (passiv)
n	Gesamtzahl beobachteter Fahrzeuge in der Regel $n = (h + q) = r$
N	Zahl der momentan (zu einem Zeitpunkt) beobachteten Fahrzeuge
p	(beliebiger) Parameter des Verkehrsgeschehens
q	Verkehrsstärke (lokal), [Fz/h] oder [Fz/s]
qs	quadratische Abweichungssummen (gesamte Beobachtung)
qs_1	quadratische Abweichungssummen (zw. Zeilenmittelwerten)
qs_2	quadratische Abweichungssummen (zw. Spaltenmittelwerten)
qs_3	quadratische Abweichungssummen (quad. "Restsumme")
r	Zahl der im Rückflug beobachteten Fahrzeuge
$s^2(v)$	Streuung der Geschwindigkeiten einer Stichprobe, s.u.
$\sigma^2(v)$	Varianz der Geschwindigkeiten der Grundgesamtheit dabei verwendete Indices: - bew: bewegte Beobachtung - l: lokale Beobachtung - m: momentane Beobachtung - rz: räumlich-zeitliche Beobachtung
t, T	Zeit, Dauer der Beobachtung
t_i	Zeitpunkt der Beobachtung von Fahrzeug "i"
t_j^H	Zeitpunkt des Überflugs von Querschnitt j im Hinflug
t_j^R	Zeitpunkt des Überflugs von Querschnitt j im Rückflug
t_{Umkehr}	Zeitbedarf für die Umkehr des Flugzeugs (z.B. zwischen Ende eines Hin- und Beginn des Rückflugs)
t_{wende}	(fiktiver) Zeitpunkt der Flugzeugwende
$u(v)$	Anteile der Fahrzeuge mit Eigenschaft U in Geschwindigkeitsklasse v
U	Zahl der Fahrzeuge mit einer zu untersuchenden, definierten Eigenschaft

v	Geschwindigkeit, [km/h] oder [m/s] dabei verwendete Indices: - bew: bewegte Beobachtung - i: von Fahrzeug "i" - l: lokale Beobachtung - m: momentane Beobachtung - rz: räumlich-zeitliche Beobachtung - H: Beobachtung im Hinflug (in Fahrtrichtung beobachteter Fz) - R: Beobachtung im Rückflug (entgegen der Fahrtrichtung der Fz) - Q: Beobachtung am (lokalen) Querschnitt
\bar{v}	mittlere Geschwindigkeit
v_F	Geschwindigkeit des Beobachtungsflugzeugs
v_F^H	Geschwindigkeit des Flugzeugs im Hinflug
v_F^R	Geschwindigkeit des Flugzeugs im Rückflug
v_{MO}^H	Geschwindigkeit des MOVING OBSERVER auf der Hinfahrt
v_{MO}^R	Geschwindigkeit des MOVING OBSERVER auf der Rückfahrt
v_i	Geschwindigkeit von Fahrzeug "i"
x, X	Weg, Länge der Beobachtungsstrecke
X_1, X_2	speziell definierte Streckenabschnitte
x_i	Ort der Beobachtung von Fahrzeug "i"

Systematisches Abkürzungsverzeichnis

Zeitgrößen:

t, T	Zeit und Dauer der Beobachtung
t_i	Zeitpunkt der Beobachtung von Fahrzeug "i"
t_j^H	Zeitpunkt des Überflugs von Querschnitt j im Hinflug
t_j^R	Zeitpunkt des Überflugs von Querschnitt j im Rückflug
t_{Umkehr}	Zeitbedarf für die Umkehr des Flugzeugs
t_{wende}	(fiktiver) Zeitpunkt der Flugzeugwende

Weggrößen:

AB	Aufnahmebereich, Länge der im Bild erfaßten Fahrbahn
$f_i(t)$	Funktion der Bewegungslinie von Fahrzeug "i" (= x)
x, X	Weg, Länge der Beobachtungsstrecke
X_1, X_2	speziell definierte Streckenabschnitte
x_i	Ort der Beobachtung von Fahrzeug "i"

Geschwindigkeitsgrößen:

$g(v)$	Geschwindigkeitsverteilung, relative Anteile der beobachteten Geschwindigkeitsklassen
$s^2(v)$	Streuung der Geschwindigkeiten einer Stichprobe
$\sigma^2(v)$	Varianz der Geschwindigkeiten der Grundgesamtheit
$u(v)$	Anteile der Fz mit Eigenschaft U in Geschwindigkeitsklasse v
v	Geschwindigkeit, [km/h] oder [m/s]
\bar{v}	mittlere Geschwindigkeit
v_F	Geschwindigkeit des Beobachtungsflugzeugs
v_F^H	Geschwindigkeit des Flugzeugs im Hinflug
v_F^R	Geschwindigkeit des Flugzeugs im Rückflug
v_{MO}^H	Geschwindigkeit des MOVING OBSERVER auf der Hinfahrt
v_{MO}^R	Geschwindigkeit des MOVING OBSERVER auf der Rückfahrt

andere Verkehrsgrößen:

b	Beschleunigung, in [m/s ²]
β	(Querschnitts-) Belegung
k	Verkehrsdichte (momentan), [Fz/km] oder [Fz/m]
p	(beliebiger) Parameter des Verkehrsgeschehens
q	Verkehrsstärke (lokal), [Fz/h] oder [Fz/s]
q_s	quadratische Abweichungssummen (gesamte Beobachtung)
q_{s1}	quadratische Abweichungssummen (zw. Zeilenmittelwerten)
q_{s2}	quadratische Abweichungssummen (zw. Spaltenmittelwerten)
q_{s3}	quadratische Abweichungssummen (quad. "Restsumme")

Zählgrößen:

- E Zahl der Fahrzeuge, die dem MOVING OBSERVER auf der Rückfahrt entgegenkommen
- h Zahl der im Hinflug beobachteten Fahrzeuge
- l_i Zahl der (momentanen) Luftaufnahmen, in denen ein bestimmtes Fz "i" enthalten ist
- L fiktive (sehr große) Zahl von Luftaufnahmen in sehr kurzen Zeitabständen
- M Zahl der lokal (an einem Querschnitt) beobachteten Fahrzeuge
- M_a Zahl der Fahrzeuge, die der MOVING OBSERVER auf der Hinfahrt überholt (aktive Ü.)
- M_p Zahl der Fahrzeuge, von denen der MOVING OBSERVER auf der Hinfahrt überholt wird (passive Ü.)
- n Gesamtzahl beobachteter Fahrzeuge
in der Regel $n = (h + q) = r$
- N Zahl der momentan (zu einem Zeitpunkt) beobachteten Fahrzeuge
- r Zahl der im Rückflug beobachteten Fahrzeuge
- U Zahl der Fahrzeuge mit einer zu untersuchenden, definierten Eigenschaft

Zeit-Weg-Größen:

- a Größe eines Teilbereichs der gesamten Beobachtungsfläche A [$m * s$]
- A Größe der Zeit-Weg-Beobachtungsfläche [$m * s$] (in der Regel: $A = X * T$)
- F Beobachtete Zeit-Weg-Teilfläche von A [$m * s$]

Indices:

- bew: bewegte Beobachtung
- i : bezeichnet Fahrzeug "i"
- l : lokale Beobachtung
- m : momentane Beobachtung
- rz : räumlich-zeitliche Beobachtung
- H : Beobachtung im Hinflug (in Fahrtrichtung der Fz)
- R : Beobachtung im Rückflug (entgegen der Fahrtrichtung der Fz)
- Q : Beobachtung am (lokalen) Querschnitt

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Bewegung von Fahrzeugen in Abhängigkeit von Zeit und Weg (Zeit – Weg – Fahrlinien)	5
Abb. 2:	Prinzipielle Vorgehensweise und Beobachtungsbereiche der unterschiedlichen Beobachtungsarten	8
Abb. 3:	Vom Flugzeug aus direkt beobachtbarer Teil der Zeit-Weg-Fläche	17
Abb. 4:	Bewegungslinie eines Flugzeugs für wiederholte Beobachtungsflüge im Zeit-Weg-Diagramm	18
Abb. 5:	(a) in der vorliegenden Untersuchung unterstellte, (b) praktische Durchführung der Flugzeugwende am Beginn bzw. Ende der Untersuchungsstrecke	20
Abb. 6:	Festlegung einer begrenzten “Zeit-Weg-” Fläche durch zwei stetige Funktionen $x = f(t)$	54
Abb. 7:	Definition einer Beobachtungsfläche durch die Fahrlinien zweier Beobachtungsfahr-/flugzeuge	55
Abb. 8:	Definition einer Beobachtungsfläche durch Hin- und Rückflug sowie eine lokale Beobachtung	56
Abb. 9:	Beobachtung von Fahrzeugen auf einem Hin- und Rückflug zur Bestimmung der Verkehrsdichte	59
Abb. 10:	Grundsituation der Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrzeuge trotz Verwendung gleichgroßer Fahrzeugmengen	61
Abb. 11:	Einfluß von v_F^H und v_F^R auf die Größe der beobachtbaren Zeit-Weg-Fläche	63
Abb. 12:	Erläuterung der Zählgrößen für die beobachteten Fahrzeugkollektive	86
Abb. 13:	(Durch die Bewegung des Flugzeugs) verzerrte Verkehrsdichte aus 50 aufeinanderfolgenden Hin- und Rückflügen	87
Abb. 14:	Unverzerrte momentane Verkehrsdichte aus 50 aufeinanderfolgenden Hin- und Rückflügen	90
Abb. 15:	Erklärung des Vorgehens zur Erzeugung von Zeit-Weg-Bewegungslinien	126
Abb. 16:	Vergleich “realer” und berechneter Bewegungslinien bei extremen Instationaritäten	129
Abb. 17:	Verkehrszustände im “dynamischen Fundamentaldiagramm” nach LEUTZBACH u. WIEDEMANN (1977)	134
Abb. 18:	Verkehrsdichtekarte einer 4 km langen Strecke, Beobachtungszeit 33 min	136

Abb. 19:	Zeitlicher Verlauf der mittleren momentanen Geschwindigkeit aus 50 Hin- und Rückflügen	137
Abb. 20:	Räumlicher Verlauf der Verkehrsdichte auf der BRENNER-Autobahn, Fahrtrichtung Süden, 8.8.87	139
Abb. 21:	Blockdiagramme der Verkehrsdichte im betrachteten Zeit-Weg-Intervall	140
Abb. 22:	Blockdiagramme der Geschwindigkeit im betrachteten Zeit-Weg-Intervall	142
Abb. 23:	Blockdiagramme der "inversen Geschwindigkeit" im betrachteten Zeit-Weg-Intervall	143
Abb. 24:	Veränderungen der Geschwindigkeit innerhalb eines Zeit-Weg-Teilbereichs	146

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	(Systematisierte) Vorgehensweise zur Verwendung von Luftbildaufnahmen im Verkehrswesen	26
Tab. 2:	Übersicht über verwendete Film-/Kameratypen und Ansätze zur Verkehrsdatenbestimmung aus Luftbildern	30
Tab. 3:	Umrechnungsbeziehungen für mittlere Geschwindigkeiten	70
Tab. 4:	Umrechnungsbeziehungen für Geschwindigkeitsverteilungen $g(v)$	71
Tab. 5:	Umrechnungsbeziehungen für Geschwindigkeitsvarianzen (bezogen auf die Grundgesamtheit)	72
Tab. 6:	Umrechnungsbeziehungen für Parameter der Zustandsgleichung $q = k \cdot \bar{v}_m$	73
Tab. 7:	Übersicht über die Zahlen richtig/falsch zugeordneter Fahrzeuge aus 50 Beobachtungsflügen. Datenbasis: Simulation einer 10-minütigen Vollsperrung beider Richtungsfahrtstreifen einer BAB	116
Tab. 8:	Unterschiede zwischen realer und berechneter Verkehrsdichte für 200 T-X-Bereiche (jeweils der Länge 1 km und der Zeit 1 min)	118
Tab. 9:	Auswertung der Unterschiede der Verkehrsdichte aus Tab. 8	119
Tab. 10:	Unterschiede zwischen realer und berechneter mittlerer Geschwindigkeit für 200 T-X-Bereiche (jeweils der Länge 1 km und der Zeit 1 min)	120
Tab. 11:	Verkehrsstufen als Grundlage für Verkehrsmeldungen (nach KELLER et al.)	131
Tab. 12:	Verkehrszustände nach STREMMER (1984)	132
Tab. 13:	Beispiel für die Definition von Verkehrsbereichen für eine Schnellstraße	132
Tab. 14:	“Gesamt-Veränderungs-Wegstrecken” für 200 Zeit-Weg-Teilbereiche	147
Tab. 15:	Ergebnisse von “DVA” für die gesamte Beobachtung auf dem 95%/99%-Signifikanzniveau (5%/1% Irrtumswahrscheinlichkeit)	151
Tab. 16:	Einfluß des Weges auf Verkehrsparameter für 200 Zeit-Weg-Teilbereiche	154
Tab. 17:	Flüssigkeit des Verkehrsablaufs, dargestellt anhand der quadratischen Reststreuungen für 200 Zeit-Weg-Teilbereiche	157

Definitionsverzeichnis

Def. 1:	“Bewegungslinie” oder “Zeit-Weg-Fahrlinie”	4
Def. 2:	“Fahrstrecke”	6
Def. 3:	“Fahrzeit”	6
Def. 4:	“Geschwindigkeit”	6
Def. 5:	“Verkehrsbeobachtung”	7
Def. 6:	“Geschwindigkeitsverteilung”	7
Def. 7:	“Lokale Beobachtung”	9
Def. 8:	“Momentane Beobachtung”	9
Def. 9:	“Bewegte Beobachtung”	10
Def. 10:	“Hinflugbeobachtung / Rückflugbeobachtung”	10
Def. 11:	“Beobachtungsfläche”	11
Def. 12:	“räumlich-zeitliche Beobachtung”	11
Def. 13:	“Verweilzeit”	11
Def. 14:	“Verkehrsstärke”	12
Def. 15:	“Verkehrsdichte”	12
Def. 16:	“unabhängige Bewegungslinien”	35
Def. 17:	“freier Verkehr”	35
Def. 18:	“stationär über die Zeit”	35
Def. 19:	“stationär über den Weg”	36
Def. 20:	“räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung”	66

1 Zur vorliegenden Arbeit

1.1 Einführung

Die Messung von Verkehrsgrößen stellt eine grundlegende Aufgabe des Verkehrswesens dar. Vor allem im Straßenverkehr bilden Verkehrsmessungen die Basis jeder Analyse, jeder darauf aufbauenden Modellbildung und jeder Prognose; Messungen sind notwendig, um Auswirkungen des Verkehrs auf andere Bereiche abschätzen oder den Verkehrsablauf selbst steuern zu können (s.a. INIGO, 1985). In einer Zeit, in der ein weiteres Wachstum des Straßenverkehrsaufkommens mit einer erhöhten Sensibilisierung für die Auswirkungen und Beschränkungen des (individualisierten) Straßenverkehrs einhergeht, gewinnen damit Methoden der Verkehrsdatenerfassung ebenfalls an Bedeutung:

“It will be accepted that over recent years there has been an ever-increasing desire for traffic data of all kinds” (DICKINSON u.a., 1985, p. 284).

Hierzu müssen “Beobachtungen” des Straßenverkehrs durchgeführt und dabei bestimmte Ereignisse registriert bzw. “gemessen” werden. Die Begriffe “Beobachtung” und “Messung” werden deshalb im Verkehrswesen oft synonym verwendet. Aus den erfaßten (mikroskopischen) Einzelfahrzeugdaten werden aggregierte, makroskopische Größen gebildet, die als Maßzahlen verwendet werden können.

In der Regel erfolgt die Verkehrsbeobachtung an einem bestimmten Streckenquerschnitt. Für eine gewisse Zeit verfolgt die Beobachterin oder der Beobachter von einem festen Standpunkt aus das Verkehrsgeschehen. Diese Beobachtungsart wird “lokale Beobachtung” genannt und liefert zeitbezogene Verkehrsgrößen für den jeweiligen Querschnitt.

Aus zwei Gründen empfiehlt sich aber häufig die Bestimmung von Verkehrsgrößen, die sich auf einen längeren zusammenhängenden Streckenabschnitt beziehen:

- Zum einen gelten lokal bestimmte Verkehrsgrößen strenggenommen nur für den jeweils zugrundeliegenden Streckenquerschnitt; über die Verhältnisse davor oder danach sagen sie nichts aus. Verschiedene Arbeiten (z.B. LEUTZBACH u. WIEDEMANN, 1977 oder CEDER u. MAY, 1977) weisen darauf hin, daß die Wahl des Beobachtungsquerschnitts entscheidende Bedeutung für die Ausprägung verschiedener, dort gemessener Verkehrsgrößen besitzt.
- Zum anderen müssen zur Bestimmung aller Verkehrsgrößen, die sich auf Wegstrecken beziehen, Informationen über die Strecke insgesamt vorliegen.

Zur Bestimmung streckenbezogener Verkehrsgrößen wird in der Regel der gesamte Streckenabschnitt überwacht. Da die so erhaltenen Verkehrsgrößen (z.B. Verkehrsdichte, Änderungen des Verkehrsverhaltens entlang der Strecke) die Situation auf dem gesamten Streckenabschnitt widerspiegeln und durch verschiedene, zeitlich aufeinanderfolgende Beobachtungen auch zeitbezogene Verkehrsgrößen bestimmt werden können, ist die Aussagekraft solcher Beobachtungsformen größer als die einer lokalen Verkehrsbeobachtung (s. auch MARTIN, 1979).

Für die praktische Durchführung der Beobachtungen eines größeren Streckenabschnitts bietet sich zweckmäßigerweise die Erfassung in Luftbildern an. DÖHLER (1966) beschreibt die prinzipiellen Möglichkeiten solcher Bildverfahren wie folgt: “

1. Es wird die Beobachtung längerer Straßenabschnitte oder größerer Flächen ermöglicht.
2. Es entstehen keine Schwierigkeiten bei der Zuordnung der Fahrzeuge zu den Meßdaten wie bei lokalen Messungen.
3. Die Haupt-Fahrzeugarten können in den Bildern erkannt werden.
4. Das gesamte Fahrverhalten in den Streckenabschnitten kann ermittelt werden.
5. Der Verkehrsablauf ist dokumentarisch festgehalten; nachträglich erforderliche Messungen und Nachprüfungen lassen sich jederzeit vornehmen.
6. Straßenführung, -zustand und u.U. Verkehrsregelungen sind erkennbar.
7. Die Meßwerte werden automatisch registriert und stehen unmittelbar für die weitere automatische Datenverarbeitung zur Verfügung.
8. Das Verfahren ist zeit- und personalsparend; die Ergebnisse liegen in kurzer Zeit vor.
9. Die Genauigkeit kann durch Wahl des Bildmaßstabes und geeignete Maßnahmen des Meßverfahrens den Genauigkeitsforderungen angepaßt werden.
10. Der Verkehr wird nicht beeinflusst.

Diesen Vorzügen stehen folgende Nachteile gegenüber:

1. Die Anwendung ist vom Wetter abhängig.
2. Verdeckte Verkehrsflächen entziehen sich der Aufnahme.

3. Es werden spezielle Geräte benötigt." (Zitat aus DÖHLER (1966)).

In der Vergangenheit wurde die prinzipielle Eignung von Verkehrsbeobachtungen aus Luftaufnahmen zur Bestimmung von Verkehrsgrößen sowie eine Reihe verschiedener Ansätze hierzu von verschiedenen Autoren untersucht. Verwiesen sei z.B. auf Arbeiten von WOHL (1958), WAGNER u. MAY (1963), LEUTZBACH (1966), TREITERER/TAYLOR (1966), DÖHLER (1966) sowie eine Vielzahl späterer Arbeiten, von denen stellvertretend nur WOLFERTS (1974) genannt werden soll.

Trotz der prinzipiellen Vorzüge der aus Luftaufnahmen bestimmten Verkehrsgrößen gegenüber lokalen Messungen (siehe z.B. MARTIN, 1979) wird die Verkehrserfassung vom Flugzeug aus in der Praxis bisher nur selten angetroffen. Neben Kostengründen liegt der Hauptgrund dafür in der Tatsache, daß die Fahrzeuge im Bild (bzw. auf verschiedenen Bildern) vom Auswertepersonal gesucht, bestimmt, gemessen und durch die Bildsequenz verfolgt (einander zugeordnet) werden mußten. Fahrzeugsuche, Orts- bzw. sogar Zeitbestimmung (WOHL, 1958) sowie die Zuordnung mehrfach beobachteter Fahrzeuge zueinander gestalteten sich bei dieser "manuellen Verarbeitungsart" naturgemäß sowohl sehr schwierig als auch aufwendig und beschränkten die Verwendungsfähigkeit der Verfahren.

Seit etwa 1965 wurden deshalb in zunehmendem Maße Teile der Auswertung auf elektronischen Rechenanlagen vorgenommen (z.B. DÖHLER, 1966; WOLFERTS, 1974), der Hauptteil der Auswertung beruhte allerdings immer auf manueller Hilfe. Selbst die rasche Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung hat bisher daran nur wenig geändert (SMITH u. ROSKIN, 1985; ROBIN-PREVALLEE, 1986) – häufig wird die elektronische Datenverarbeitung nur zur bequemen Speicherung der Daten verwendet. Die eigentliche Fahrzeugsuche und -zuordnung wird bis heute bei allen bekannten Ansätzen vom Auswertepersonal übernommen und ist entsprechend kosten- und zeitaufwendig.

Neue Möglichkeiten für die automatische Auswertbarkeit von Luftbilddaten ergeben sich durch die Verwendung von sog. CCD- (Charge-coupled device-) Videokameras (s. KREBS, 1986), in denen ein Feld lichtempfindlicher Elemente die Intensität des jeweiligen Bildpunktes mißt. Dieses Verfahren eignet sich wegen der direkt möglichen Digitalisierung und Zuordnung der Bildpunkte ("Pixel") sehr gut für eine automatische Weiterverarbeitung in elektronischen Rechenanlagen; im Gegensatz zu früheren Arbeiten erlaubt die Auswertung der dann vorliegenden "digitalen Bilddaten" ein schnelleres und einfacheres Vorgehen (s. VÖGTLE, 1989).

Damit stellt sich folgende Aufgabe:

Aus einer Verkehrsbeobachtung vom Flugzeug aus sollen durch automatische Auswertung Daten abgeleitet werden, mit deren Hilfe "Verkehr" in einem längeren Zeitintervall und für einen längeren Streckenabschnitt gemessen und beschrieben werden kann.

Aus verkehrstechnischer Sicht eignet sich ein solches Verfahren für eine Vielzahl von Fragestellungen und Untersuchungen, insbesondere auf Schnellstraßen. Das angestrebte Verfahren würde zum ersten Mal die routinemäßige Verwendung von Luftbildaufnahmen ermöglichen. Die sich dabei ergebenden verkehrstechnischen Probleme, Möglichkeiten und Vorgehensweisen werden in der vorliegenden Arbeit untersucht.

1.2 Begriffsbestimmungen

"Verkehr" stellt – nach einer klassischen Definition – die Ortsveränderung von Personen, Gütern oder Fahrzeugen dar. Zur Beschreibung der Ortsveränderung ist sowohl die Angabe der Position vor, während und nach der Bewegung, als auch die Angabe der Zeit t in jedem Stadium der Ortsveränderung notwendig. Die – eigentlich zumindest zweidimensionale – "Positionsbestimmung" kann dabei im Fall des hier untersuchten Straßenverkehrs auf die (eindimensionale) Angabe des "Streckenkilometers" (Ort x) reduziert werden, da der Aufenthaltsort des Fahrzeugs damit hinreichend genau definiert ist. "Verkehr" wird deshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch die kontinuierliche Angabe von (Zeit-Ort-)Wertepaaren beschrieben.

In der Zeit-Weg-Ebene stellt sich jede Ortsveränderung als "Bewegungslinie" dar. Im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung wird definiert (s. Abb. 1):

Def. 1: "Bewegungslinie" oder "Zeit-Weg-Fahrlinie" eines Fahrzeugs wird eine Funktion in der Zeit-Weg-Ebene genannt, falls:

1. zu jedem Zeitpunkt t_i der Beobachtungsdauer T exakt ein Ort x_i , den aktuellen Fahrzeugort beschreibt, d.h. es existiert genau ein x_i für jedes t_i aus T , und
2. für zwei unterschiedliche Zeitpunkte t_i und t_j mit $t_i < t_j$ gilt:

$$x_i \leq x_j \quad (\text{bzw. } f(t_i) \leq f(t_j)).$$

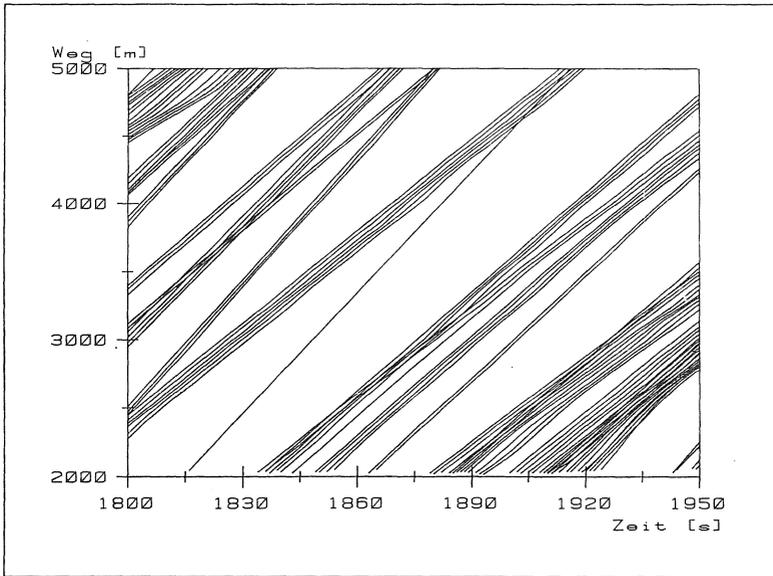


Abbildung 1:
Bewegung von Fahrzeugen in Abhängigkeit von Zeit und Weg (Zeit - Weg - Fahr-
linien)

Anschaulich bedeutet dies, daß sich ein Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt an einem Ort befinden muß und daß sich kein Fahrzeug "rückwärts" (entgegen der eigentlichen Fahrtrichtung) bewegen darf – s. z.B. JACOBS (1970) oder LEUTZBACH (1972). Da die Beobachtungsmethode, die in dieser Arbeit entwickelt wird, vor allem auf Autobahnen und Schnellstraßen zugeschnitten ist, bedeutet die zweite Forderung keine zusätzliche Beschränkung.

Aus Def. 1 ergibt sich das für die Auswertungen der Luftbildaufnahmen zu verwendende Koordinatensystem. Wegen der möglicherweise unterschiedlichen Länge getrennt geführter Richtungsfahrbahnen oder der unterschiedlichen Lage von Ein-/Ausfahrten hat es sich als praktisch erwiesen, für jede Fahrtrichtung der Untersuchungsstrecke ein eigenes Koordinatensystem zu verwenden. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung eines "negativen" Koordinatensystems in der Gegenrichtung dar; in beiden Fällen wächst die Wegkoordinate damit in der Fahrtrichtung

der jeweils betrachteten Fahrzeuge.

In einer Reihe von Arbeiten (z.B. JACOBS, 1970) wird die Bewegungslinie primär als Funktion der Zeit betrachtet:

$$x_i = f(t_i)$$

Zwei Gründe sprechen für diese Wahl der Zeit als unabhängiger Variable:

- Zum einen kann eine Fahrerin bzw. ein Fahrer in gewissen Grenzen Einfluß auf den jeweiligen Standort ausüben, niemals aber auf die Zeit. So betrachtet ist die Zeit tatsächlich die “unabhängigere” Variable.
- Zum anderen ergibt sich ein praktischer Unterschied bei der Betrachtung der Bewegungslinie eines haltenden Fahrzeugs:
Wird die Bewegungslinie als Funktion der Zeit interpretiert, so verläuft die Zeit-Weg-Fahrlinie parallel zur Abszisse. Wird die Bewegungslinie als Funktion des Weges betrachtet, so verläuft die Fahrlinie aber entweder parallel zur Ordinate (und stellt damit nur noch eine Relation und keine Funktion mehr dar) oder sie muß als unstetige Funktion mit einer Sprungstelle definiert werden. Diese Schwierigkeiten sind darauf zurückzuführen, daß zu einem bestimmten Ort (der Halteposition x_i) mehrere Zeitpunkte t_i existieren.

Unter dieser Bedingung ist damit für zwei verschiedene t_i, t_j mit $t_i < t_j$ auch die in dieser Zeit zurückgelegte Fahrstrecke definiert:

Def. 2: “Fahrstrecke” $\Delta x = x_j - x_i = f(t_j) - f(t_i) \geq 0$

Unter Verwendung der dafür benötigten Fahrzeit:

Def. 3: “Fahrzeit” $\Delta t = t_j - t_i > 0$

ergibt sich die Geschwindigkeit v allgemein zu:

Def. 4: “Geschwindigkeit” $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \geq 0$

Die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs zu einem festen Zeitpunkt (momentane Geschwindigkeit) entspricht dem Grenzwert dieses Ausdrucks für $\Delta t \rightarrow 0$.

“Verkehr” wird in dieser Untersuchung als Gesamtheit aller individuellen Zeit-Weg-Fahrzeugbewegungslinien innerhalb eines bestimmten Zeit-Weg-Bereichs verstanden. Da in der Praxis der exakte Verlauf der Fahrlinien aller Fahrzeuge (zu jedem Beobachtungszeitpunkt / auf jedem Streckenquerschnitt) kaum vollständig erfaßt werden kann, stellt jede Verkehrsbeobachtung eine “Stichprobe” aus der Menge aller Bewegungslinien dar. Abbildung 2 beschreibt diese Tatsache anschaulich. Deshalb wird – in Erweiterung der Definition von JACOBS (1970) – definiert:

Def. 5: “Verkehrsbeobachtung” wird die stichprobenhafte Erfassung aller Zeit-Weg-Fahrlinien genannt, die (siehe Abb. 2) entweder :

- (a) eine stetige Funktion in der Zeit-Weg-Ebene schneiden oder berühren, oder
- (b) eine geschlossene Teilfläche der Zeit-Weg-Fläche ganz oder teilweise durchfahren.

Aus den individuellen Parametern der in der Verkehrsbeobachtung erfaßten Fahrzeuge werden die globalen Kenngrößen der jeweiligen Beobachtung bestimmt. Sollen etwa Geschwindigkeitskenngrößen der erfaßten Fahrzeuge errechnet werden, so wird z.B. die Geschwindigkeitsverteilung (rel. Häufigkeit) $g(v)$ verwendet:

Def. 6: “Geschwindigkeitsverteilung”

$$g(v) = \frac{\text{Anz. beob. Fz mit } v_i = v}{\text{Anz. aller beob. Fz.}}$$

Sofern nicht anders angegeben, wird die in der Praxis fast ausschließlich verwendete diskrete Geschwindigkeitsverteilung in Klassen gleicher Bandbreite [etwa: 1 m/s] vorausgesetzt. Mittelwerte, Varianz, Standardabweichung, Momente usw. sind wie allgemein üblich (VOLK, 1958; LEUTZBACH, 1972/1988) definiert.

Als ursprüngliche Form der Erfassung des Systems “Straßenverkehr” ist die visuelle Beobachtung des Verkehrs zu betrachten; der Begriff “Verkehrsbeobachtung” im weiteren Sinne (für alle Arten von Verkehrserfassungen) deutet auf diese Abstammung hin. Dabei kann die visuelle Erfassung des Verkehrs (Beobachtung im engeren Sinn) auch als die vollständigste Form der Verkehrserfassung betrachtet werden, denn dabei tritt die geringste Datenreduktion (und damit der geringste Verlust von Information) auf:

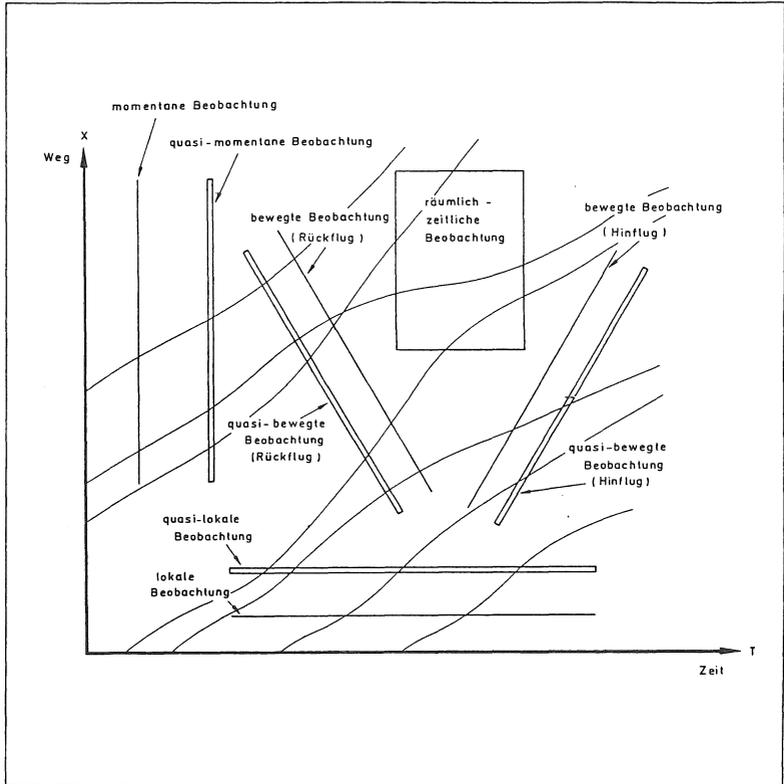


Abbildung 2:
Prinzipielle Vorgehensweise und Beobachtungsbereiche der unterschiedlichen Beobachtungsarten

Im Gegensatz zu anderen Datenerfassungsarten sind aus der visuellen Beobachtung sowohl der exakte Ort als auch die Randbedingungen (Wetter, Umfeld, andere Verkehrsteilnehmer, Zustand der "Strecke" usw.) sowie Größe, Form und Typ der Fahrzeuge erkennbar.

Um die in Bildern enthaltenen Informationen nutzen zu können, müssen verschiedene Ereignisse gemessen werden. Damit stellt sich das Problem der Meß- bzw. Auswertbarkeit. Die Schwierigkeiten bei der Auswertung von Bildaufnahmen führten in der Vergangenheit zur Entwicklung technischer Meßsysteme (Induktionsschleifen, Radar, Lichtschranken). Der hier eingeschlagene Weg einer automatischen, photogrammetrischen Auswertung (= Messung) stellt deshalb einen neuen Ansatz dar.

Eine Unterscheidung der verschiedenen Arten von Verkehrsbeobachtungen ermöglichen die in Def. 5 (a) erwähnten "stetigen Funktionen", entlang derer Beobachtungen durchgeführt werden. Bewegt sich ein Beobachter, so entspricht seine Zeit-Weg-Bewegungslinie dieser "stetigen Funktion". Die Bewegungslinie des Beobachters (Beobachtungslinie) kann dabei prinzipiell beliebig definiert werden. In der Regel ist die Verwendung einer stetigen Geraden sinnvoll. Die hier untersuchten Beobachtungsarten sind in Abb. 2 dargestellt.

1.2.1 Lokale Beobachtung

Def. 7: "Lokale Beobachtung" wird die Erfassung aller Fahrzeuge genannt, die eine Beobachtungslinie mit $x = f(t) = \text{konstant}$ für alle $t \in T$ passieren.

Diese Beobachtungsart ist in der Praxis üblicherweise anzutreffen. Verkehr wird dabei repräsentiert durch die Gesamtheit der den Querschnitt überfahrenden Fahrzeuge (Position "x" fest, Zeit "t" veränderlich). Sie kann auch als eine Beobachtung interpretiert werden, bei der sich der Beobachter mit der Geschwindigkeit "Null" bewegt. Die Beobachtungslinie verläuft parallel zur Zeit-Achse der Zeit-Weg-Ebene.

In einer lokalen Beobachtung werden haltende Fahrzeuge (sofern sie Bestandteil des Verkehrs auf der untersuchten Strecke sind) aus prinzipiellen Gründen nicht (bzw. im Grenzfall unendlich oft) erfaßt. Enthält das Fahrzeugkollektiv haltende Fahrzeuge, so ist die lokale Beobachtung in diesem Sinne lückenhaft. Lokal bestimmte Verkehrsgrößen werden im folgenden mit dem Index "l" bezeichnet.

1.2.2 Momentane Beobachtung

Def. 8: "Momentane Beobachtung" wird die Erfassung aller Fahrzeuge genannt,

die eine Beobachtungslinie mit $t_j = \text{konstant}$, $t_j \in T$ passieren.

Die momentane Beobachtungsgerade verläuft damit parallel zur Weg-Achse der Zeit-Weg-Ebene. Auch haltende Fahrzeuge sind in ihr enthalten. Erfasst werden alle Fahrzeuge, die sich zum Zeitpunkt t_j auf der Untersuchungsstrecke X aufhalten ($f(t_j) \in X$).

In der Praxis ist eine momentane Beobachtung vorstellbar durch Luftbilder, in denen die gesamte Untersuchungsstrecke der Länge X abgebildet ist (Zeit “t” fest, Position “X” veränderlich) oder aber durch Beobachtungen entlang der Bewegungslinie eines sich “unendlich schnell” bewegenden Beobachters. Momentan bestimmte Verkehrsgrößen werden im folgenden mit dem Index “m” bezeichnet.

1.2.3 Bewegte Beobachtung

Def. 9: “Bewegte Beobachtung” wird die Erfassung aller Fahrzeuge genannt, die eine Beobachtungslinie mit $f(t) = v_F \cdot t + x_0$ für alle $t \in T$ kreuzen.

Eine bewegte Beobachtung ist damit jede Beobachtung entlang einer beliebigen Beobachtungsgereaden. Die Steigung “ v_F ” der Beobachtungsgereaden entspricht der Geschwindigkeit des sich bewegenden Beobachters. Es werden alle Fahrzeuge erfaßt, die den Beobachter überholen oder von ihm überholt werden. In der Praxis erfolgt eine bewegte Beobachtung entweder von einem speziellen Beobachtungsfahr- oder -flugzeug aus. Aus bewegten Beobachtungen bestimmte Verkehrsgrößen werden mit dem Index “bew” bezeichnet.

Anmerkung: Der Begriff “bewegte Beobachtung” mag insofern verwirren, als ja nicht die Beobachtung, sondern nur der Beobachter “bewegt” wird. Vollständig müßte es deshalb eher “Beobachtung von einem sich bewegenden Beobachter aus” heißen; diese Bezeichnung wurde allerdings wegen ihrer Unhandlichkeit verworfen. Da aus der vorliegenden deutschsprachigen und internationalen Literatur keine anderen Namen bekannt sind, die treffend und geeignet erschienen, wird im Rahmen dieser Arbeit von der “bewegten Beobachtung” gesprochen. Andere – mögliche – Bezeichnungen wären etwa dynamische, fliegende/fahrende oder mobile Beobachtung.

Ist die Beobachtungsgeschwindigkeit $v_F > 0$, so bewegt sich das Beobachtungsfahr-/flugzeug in Fahrtrichtung, für $v_F < 0$ entgegen der Fahrtrichtung der erfaßten Fahrzeuge. Da hier die Verwendung eines Flugzeugs unterstellt wird, führt dies zu:

Def. 10: Eine bewegte Beobachtung mit $v_F > 0$ wird “Hinflugbeobachtung”, eine bewegte Beobachtung mit $v_F < 0$ “Rückflugbeobachtung” genannt.

1.2.4 Räumlich-zeitliche Beobachtung

Einen Sonderfall stellt in gewisser Weise die räumlich-zeitliche Beobachtung (EDIE, 1963; COERS, 1970) dar, bei der Verkehr nicht entlang einer Beobachtungslinie, sondern innerhalb oder an den Grenzen einer Beobachtungsfläche erfaßt wird:

Def. 11: "Beobachtungsfläche" wird eine abgeschlossene Fläche der Zeit-Weg-Ebene genannt.

Def. 12: "Räumlich-zeitliche Beobachtung" wird die Erfassung aller Fahrzeuge genannt, die eine Beobachtungsfläche "A" ganz oder teilweise durchfahren.

Def. 13: Die Zeit, die ein Fahrzeug innerhalb einer Beobachtungsfläche A verbringt, wird "Verweilzeit" Δt_i genannt:

$$\Delta t_i = t_i \text{ aus} - t_i \text{ ein}$$

Dabei spielt die Form der Beobachtungsfläche prinzipiell keine Rolle. Allerdings wird in der Realität häufig ein Rechteck (bzw. Parallelogramm) der Größe $A = X \cdot T$ verwendet. Die räumlich-zeitliche Beobachtungsmethode besitzt damit die Einheit (Zeit \cdot Weg) und wird mit dem Index "rz" bezeichnet.

Nimmt die Beobachtungsfläche A die Form eines sehr schmalen und langen Rechtecks an, so lassen sich aus der räumlich-zeitlichen Beobachtung je nach Lage des Rechtecks die drei anderen Beobachtungsarten (s. Abb. 2) ableiten. Ein Unterschied besteht nur noch in der Tatsache, daß die (degenerierte) räumlich-zeitliche Beobachtung immer noch durch eine – wenn auch schmale – Fläche dargestellt wird, während die anderen Beobachtungsarten durch Linien repräsentiert werden. Die degenerierte räumlich-zeitliche Beobachtung entspricht damit exakt einer quasi-lokalen, quasi-momentanen oder quasi-bewegten Beobachtung (dazu s. LEUTZ-BACH, 1972). Die Bezeichnung "quasi-" ergibt sich aus der praktischen Durchführung momentaner, lokaler oder bewegter Messungen, da in der Praxis – entgegen den Definitionen – häufig kleine Zeit- oder Wegabschnitte zusätzlich miteinbezogen werden.

Alle Beobachtungsarten und die grundsätzlichen Unterschiede sind in Abb. 2 übersichtlich dargestellt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Eine räumlich-zeitliche Beobachtung ist die allgemeinste und umfassendste Beobachtungsart. Degeneriert die räumlich-zeitliche Beobachtungsfläche A zu einer Beobachtungslinie, so entsteht als Spezialfall die (quasi-) bewegte Beobachtungsart,

je nach Lage entweder als “Hinflug-” oder “Rückflugbeobachtung”. Als Spezialfälle der bewegten Beobachtungsart wiederum lassen sich – je nach Lage parallel zur Zeit- oder zur Weg-Achse – die (quasi-) lokale und die (quasi-) momentane Beobachtung einordnen.

Bei allen Beobachtungsarten werden die Kenngrößen der jeweils erfaßten Fahrzeuge gemessen und die Fahrzeuge gezählt. Daraus ergeben sich zwei weitere Größen:

Def. 14: Verkehrsstärke q ist die Anzahl lokal beobachteter Fahrzeuge innerhalb einer Beobachtungszeit T dividiert durch die Länge der Beobachtungszeit:

$$q = M/T \quad [\text{Fz/h}] \text{ oder } [\text{Fz/s}]$$

Def. 15: Verkehrsdichte k ist die Anzahl momentan beobachteter Fahrzeuge auf einer Untersuchungsstrecke X dividiert durch die Länge der Untersuchungsstrecke:

$$k = N/X \quad [\text{Fz/km}] \text{ oder } [\text{Fz/m}]$$

Damit sind die grundlegenden Begriffe der vorliegenden Arbeit definiert. Zusätzliche Größen oder Vereinbarungen werden entweder bei ihrem ersten Auftreten definiert oder entsprechen dem allgemeinen Sprachgebrauch im Verkehrswesen.

1.3 Vorgehen

Die Entwicklung eines Systems zur Bestimmung von Verkehrsgrößen aus Luftbildern umfaßt zwei prinzipiell unterschiedliche Aufgabenbereiche:

- die photogrammetrische Bearbeitung der Luftbildaufnahmen zum einen;
- die verkehrstechnische Weiterverarbeitung und Aufbereitung der Information zum anderen.

Zunächst zur photogrammetrischen Auswertung:

- Bei der Auswertung von Luftbildern bereiten beispielsweise Vibrationen der Flugzeugzelle oder die verschiedenen Eigenbewegungen des Flugzeugs Schwierigkeiten (s. Abschnitt 2.3). Da sich die Bildinhalte wegen der Eigengeschwindigkeit des Flugzeugs auf unterschiedliche Streckenabschnitte beziehen, muß

im Fall der hier verwendeten digitalen Bilddaten vom Rechner automatisch auch der aktuelle Bildbereich und die Flugzeugposition bestimmt werden. Dies geschieht i.a. über Paßpunkte. Im Anschluß daran werden mit speziell entwickelten Detektionsalgorithmen die in den Bildern erfaßten Fahrzeuge gesucht und identifiziert sowie bereits detektierte Fahrzeuge (in Folgebildern) einander zugeordnet. Für jedes erfaßte Fahrzeug werden Größe, Grauwert (ggf. Farbe), Ort und Geschwindigkeit bestimmt. Die Geschwindigkeit wird dabei aus der Strecke errechnet, die das jeweilige Fahrzeug zwischen mehreren Bildaufnahmen zurückgelegt hat (LEUTZBACH, BÄHR, BECKER u. VÖGTLE, 1987).

Die dabei auftretenden Schwierigkeiten sowie die Ansätze zu ihrer Lösung werden hier nicht untersucht. VÖGTLE (1989) hat in einer parallel durchgeführten Untersuchung die im photogrammetrischen Bereich liegenden Probleme analysiert und Verfahren zu ihrer Lösung erarbeitet. Auf seine Untersuchungen wird Bezug genommen; alle vorgeschlagenen Verfahren beruhen auf den von ihm erarbeiteten Ergebnissen.

Der zweite Aufgabenbereich umfaßt die verkehrstechnische Verwendung und Weiterverarbeitung der ausgewerteten Daten. Hier liegt das Thema dieser Arbeit:

- Es soll untersucht werden, welche charakteristischen Eigenschaften Verkehrsdaten besitzen, die aus Luftaufnahmen abgeleitet werden, und wie bzw. wozu sie im Bereich des Verkehrswesens verwendet werden können.

Hierzu werden in dieser Arbeit eine Reihe neuer Ansätze vorgestellt.

1.3.1 Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte

In Abschnitt 2 werden zunächst die charakteristischen Eigenschaften von bewegten Beobachtungen untersucht. Das prinzipielle Vorgehen sowie Vor- und Nachteile der Methode werden erläutert. Daraus ergeben sich mögliche Einsatzgebiete und zu bearbeitende Problembereiche.

Abschnitt 3 beschreibt die technischen und praktischen Aspekte von Verkehrsbeobachtungen aus dem fliegenden Flugzeug. Dabei wird auf die Bildaufnahme, die Bildspeicherung, Art und Menge der hier verwendeten "digitalen Bilddaten", die Beschreibung des verwendeten Rechnersystems sowie die Problematik der Auswertung "bewegter" Beobachtungen eingegangen.

Theoretische Unterschiede und Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Beobachtungsarten sind Inhalt von Abschnitt 4. Für die momentane, die lokale, die bewegte sowie die räumlich-zeitliche Beobachtungsart werden Umrechnungsformeln entwickelt und systematische Zusammenhänge untersucht. Dabei werden erstmals die Zusammenhänge zwischen der bewegten Beobachtung und anderen Beobachtungsarten beschrieben. Für die räumlich-zeitliche Beobachtung wird eine räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung definiert, die die Berechnung beliebiger räumlich-zeitlicher Geschwindigkeitsgrößen aus bewegten Beobachtungen erlaubt und identische Werte zu den Parametern momentaner Beobachtungen ergibt.

Mit Hilfe dieser Beziehungen werden in Abschnitt 5 Verkehrsgrößen direkt bestimmt. Es werden Berechnungsverfahren für Geschwindigkeitskennwerte, Verkehrsstärke, Verkehrsdichte oder andere Parameter (Spuraufteilung, Lkw-Anteil o.ä.) vorgestellt. Hierzu werden die Verkehrsgrößen in drei Gruppen eingeteilt und ein Berechnungsschema für die Parameter jeder Gruppe angegeben. Die Bestimmung von Zeit-Weg-Fahrlinien der beobachteten Fahrzeuge sowie der daraus abgeleiteten Größen (Gruppe 3) ist zu diesem Zeitpunkt allerdings nicht möglich, da in Hin- und Rückflügen erfaßte Fahrzeuge einander nicht zugeordnet werden können.

Wegen der großen Bedeutung von Zeit-Weg-Fahrlinien für verkehrstechnische Fragestellungen wird deshalb in Abschnitt 6 ein Verfahren beschrieben, das die angenäherte Bestimmung dieser Linien für mehrfach beobachtete Fahrzeuge erlaubt. Dazu wird ein Branch-and-Bound-Verfahren entwickelt, das auch bei anderen Fragestellungen im Verkehrswesen Verwendung finden kann.

Unter Einsatz diese Verfahrens werden in Abschnitt 7 praxisbezogene Anwendungen der entwickelten Ansätze untersucht. Beliebige Verkehrsdaten werden automatisch errechnet (bzw. sind leicht aus dem Ergebnisdatensatz ableitbar). Methoden zur Bestimmung des Verkehrszustands werden vorgestellt. Weiter werden sowohl graphische Darstellungsformen als auch Ansätze zur Analyse der Verkehrssituationen diskutiert. So können z.B. Art und Größe von zeitlichen, räumlichen und verkehrsbezogenen Einflußfaktoren auf die errechneten Verkehrsdaten im definierten Zeit-Weg-Bereich abgeschätzt werden.

Eine zusammenfassende Beschreibung der entwickelten Verfahren und der abgeschlossenen Arbeiten folgt in Abschnitt 8. Verwendungsmöglichkeiten in der Praxis und die zu beachtenden Beschränkungen, denen die Verfahren (noch) unterliegen, werden aufgezeigt. Insgesamt eröffnen die entwickelten Verfahren und Umrechnungsbeziehungen neue Wege für die Verwendung bewegter Beobachtungen im Verkehrswesen.

2 Beobachtung des Verkehrs vom Flugzeug aus

In diesem Abschnitt werden die sich aus der Praxis ergebenden Eigenschaften der Verkehrserfassung vom Flugzeug aus (bewegte Beobachtung) beschrieben. Diese charakteristischen Eigenschaften, die sich daraus ergebenden Möglichkeiten und Beschränkungen schlagen sich in spezifischen Vor- und Nachteilen nieder. Aus ihrer Kenntnis kann das angestrebte Entwicklungsziel abgeleitet werden.

Dabei wird die eigentliche Verkehrsbeobachtung aus dem fliegenden Luftfahrzeug in Bildern (auf fotografischem Film, Videoband o.ä.) oder in digitalen, automatisch auswertbaren Bilddaten aufgezeichnet. Die Auswertung der Beobachtung besteht in der Messung der verkehrstechnisch relevanten Größen (s.u.). Beobachtungen vom stehenden Hubschrauber oder vom Fesselballon aus werden nicht gesondert untersucht, denn

- erstens sind die variablen Kosten (Betriebs- bzw. Mietkosten pro Flugstunde) z.B. eines Hubschraubers bis zu 10mal höher als die entsprechenden Kosten eines Flugzeugs (dieses Verhältnis gilt mit gewissen Einschränkungen auch für die fixen Kosten),
- zweitens stellt die stationäre Luftbildaufnahme (Bewegungsgeschwindigkeit des Beobachters $v_F = 0$) nur einen Sonderfall der bewegten Beobachtung (bzw. der lokalen Beobachtung) dar und kann mit dem entwickelten Instrumentarium beschrieben werden, und
- drittens sind die technischen Probleme bei stationären Luftbildaufnahmen (starke Vibration beim Hubschrauber, Windanfälligkeit o.ä.) so groß, daß eine solche Beobachtungsmethode in der Praxis kaum verwendet wird (DÖHLER, 1966; WOLFERTS, 1974; VÖGTLE, 1989).

Soll in Luftbildern eine längere Wegstrecke erfaßt werden, so sind generell zwei Vorgehensweisen möglich:

1. Die Aufnahme erstreckt sich über einen weiten Bildbereich von größenordnungsmäßig etwa 1000 m (dies ist erreichbar durch Weitwinkelobjektive oder große Flughöhen). In diesem Fall ergibt sich ein sehr großer "Überdeckungsbereich" aufeinanderfolgender Bilder. Die geringe Größe der Fahrzeuge im

Bild (oft nur wenige Bildpunkte oder "Pixel") erschwert allerdings die Auswertung. Durch den großen Abbildungsmaßstab werden automatische Auswertungen i.d.R. unmöglich gemacht, da die Entdeckung der Fahrzeuge und die daran anschließende Messung der Verkehrsgrößen im Rechner nur bei ausreichend großer und klarer Wiedergabe der Fahrzeuge möglich ist.

2. Die Aufnahme erfaßt einen vergleichsweise kleinen Bildbereich von größenordnungsmäßig ca. 50-100 m (dies ist erreichbar durch Teleobjektive oder geringe Flughöhen). Hier wird die gesamte Strecke in einer Sequenz vieler aufeinanderfolgender Einzelbilder mit genügend großem "Überdeckungsbe-
reich" abgebildet. Da jedes Objekt nun deutlich im Bild erkennbar ist, können die notwendigen Parameter genauer bestimmt werden. Automatische Auswertungen werden möglich.

Zur Bestimmung genauer Verkehrsgrößen und wenn eine automatische Auswertung angestrebt wird, ist deshalb die zweite Vorgehensweise zu wählen, obwohl die entstehende Folge von Einzelbildern zu jedem Zeitpunkt verschiedene Teilstrecken der untersuchten Strecke enthält. Die detaillierte Analyse findet sich in LEUTZBACH, BÄHR, BECKER und VÖGTLE (1987). Die auch in dieser Untersuchung eingeschlagene zweite Vorgehensweise bedeutet aber, daß abhängig vom Aufnahmebereich AB und der Fluggeschwindigkeit v_F nur noch ein Teil der zu untersuchenden Zeit-Weg-Fläche direkt beobachtet werden kann. In Abb. 3 ist der Zusammenhang dargestellt; direkt beobachtbar ist nur der senkrecht schraffierte Teilbereich der Zeit-Weg-Ebene. Ob die für diesen Teil erhobenen Meßwerte repräsentativ für die gesamte Verkehrssituation sind, muß dann zusätzlich geklärt werden.

2.1 Eigenschaften

Prinzipiell entspricht ein Luftbild einer momentanen Messung. Beim hier zugrundeliegenden Ansatz eines vergleichsweise kleinen Aufnahmebereichs wird der Verkehr aber nicht mehr "momentan" in einem Bild, sondern als über einen gewissen Zeitraum verteilte Folge vieler Einzelbeobachtungen erfaßt (siehe Abb. 2). Im Grenzfall werden Fahrzeuge nur noch einmal – im Moment des exakten Überflugs – beobachtet. Prinzipiell sind zwei Situationen möglich:

- Das Fahrzeug besitzt eine höhere Geschwindigkeit als das Flugzeug und passiert den beobachteten Bildbereich "in Fahrtrichtung".
- Das Fahrzeug besitzt eine niedrigere Geschwindigkeit als das Flugzeug und passiert den beobachteten Bereich "entgegen der Fahrtrichtung".

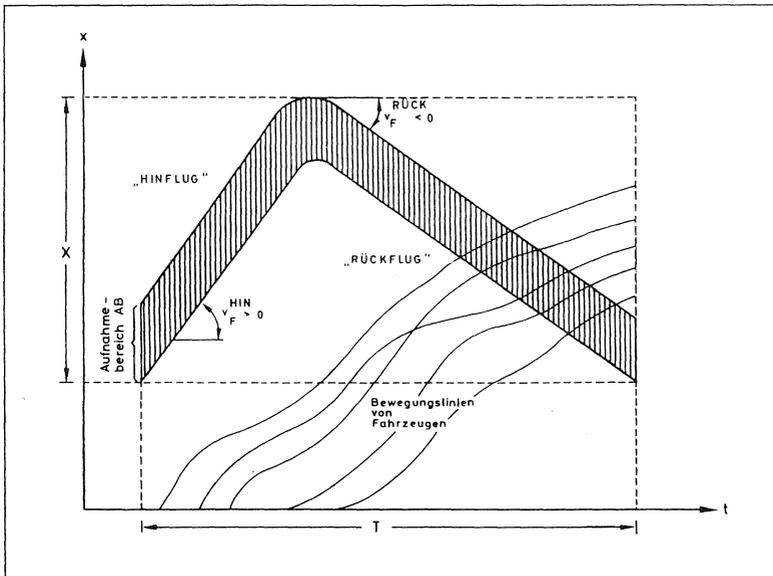


Abbildung 3:
Vom Flugzeug aus direkt beobachtbarer Teil der Zeit-Weg-Fläche

Auf diese Weise entstehen "bewegte Beobachtungen". Die dabei gemessenen Verkehrsgrößen sind somit nicht direkt mit Werten anderer Beobachtungsarten vergleichbar.

Um den Stichprobenumfang zu erhöhen oder zeitliche Veränderungen von Verkehrsparametern erfassen zu können, sind mehrere Flüge über die Untersuchungsstrecke notwendig. Dazu muß das Flugzeug nach dem Ende des ersten Hinfluges wenden, zum Ausgangspunkt zurückfliegen (Rückflug 1) und kann nach einer erneuten Wende den zweiten Hinflug beginnen. Die Bewegungslinie des Flugzeugs ähnelt damit einer "Zickzack-Linie" (siehe Abb. 4).

Dabei ist allerdings anzumerken, daß das zwischen jedem Hin- und Rückflug durchzuführende Wendemanöver nicht "sofort und auf der Stelle" stattfinden kann. Der Pilot muß folglich über Streckenende bzw. Streckenbeginn hinausfliegen. Der Zeitbedarf und die genaue Ausführung der Wende hängen dabei vor allem von den flie-

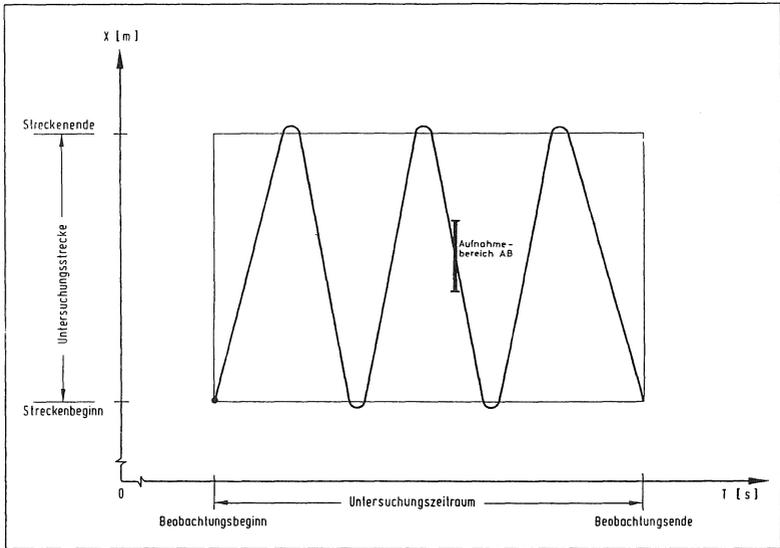


Abbildung 4:
Bewegungslinie eines Flugzeugs für wiederholte Beobachtungsflüge im Zeit-Weg-Diagramm

gerischen Möglichkeiten von Pilot und Flugzeug ab. Da für die Mehrzahl von Luftbeobachtungen kleine, wendige (und damit kostengünstige) Flugzeuge verwendet werden, wird die Wende nur relativ kurze Zeit (t_{Umkehr}) dauern. Die Zeitperiode " t_{Umkehr} " ist definiert als die Zeit zwischen den beiden aufeinanderfolgenden Überflügen von Streckenende bzw. Streckenanfang bei der Wende.

Bei den im Rahmen der Untersuchung durchgeführten Flügen wurde in der Regel so vorgegangen, daß die Pilotin oder der Pilot nach dem Passieren des Streckenendes zunächst kurze Zeit mit erhöhter Geschwindigkeit weiterflog, wendete, zum Ende der Strecke zurückflog und die Verkehrsbeobachtung mit der gewählten Rückfluggeschwindigkeit fortsetzte. Dadurch kann sichergestellt werden, daß auf dem Rückflug tatsächlich alle im Hinflug erfaßten Fahrzeuge beobachtet werden. Der Zeitbedarf für das gesamte Wendemanöver liegt größenordnungsmäßig unter einer Minute.

Im folgenden Untersuchungsteil wird vereinfachend angenommen, daß die Flugzeugwende ohne Zeitverlust und direkt am Beginn/Ende der Untersuchungsstrecke ausgeführt werden kann. Die in der Realität notwendige *Zeitperiode* $t_{U_{mkehr}}$ wird also auf einen *Zeitpunkt* t_{Wende} verkürzt.

Diese Annahme kann ohne Nachteile getroffen werden:

- In der Regel werden einzelne Hin- oder Rückflüge getrennt ausgewertet; in diesem Fall erfolgt die Flugzeugwende immer außerhalb des Beobachtungsbereichs und ist deshalb ohne Bedeutung für die Auswertung.
- Sollen Hin- und Rückflüge ausgewertet werden, so muß lediglich gewährleistet sein, daß kein Fahrzeug unbemerkt den Beobachtungsbereich verläßt oder in ihn einfährt. Dies kann dadurch sichergestellt werden, daß die Aufnahme der Bilddaten auch während der Wende fortgeführt wird.

Die Annahme, daß die Flugzeugwende zu einem *Zeitpunkt* erfolgt, bietet damit lediglich den Vorteil einer einfacheren und geschlossenen Darstellung.

Anmerkung: Sofern bei speziellen Fragestellungen diese Vereinfachung dennoch zu Problemen führen sollte, kann durch eine einfache Flugaufweisung die hier zugrundegelegte "Wende in einem Zeitpunkt" auch praktisch realisiert werden. Dazu muß der Pilot kurz vor dem Ende der Untersuchungsstrecke beschleunigen, über dem Streckenende wenden, beschleunigt einige hundert Meter zurückfliegen und dann mit der gewohnten Fluggeschwindigkeit weiterfliegen. In Abb. 5 sind die beiden Bewegungslinien des Flugzeugs für die beiden Fälle (theoretisch angenommene/praktisch durchführbare Flugzeugwende) dargestellt.

2.2 Vorteile und Möglichkeiten

Gegenüber der in der Praxis vorwiegend verwendeten lokalen Beobachtungsmethode besitzt die Verwendung von Luftbildern eine Reihe von Vorzügen. Auf die Vorteile der Messung von Verkehrsgrößen durch Verfahren, die sich auf die Auswertung von Luftbildern stützen, wurde bereits in Abschnitt 1.1 hingewiesen. Obwohl die dort zitierte Aufzählung von DÖHLER bereits 1966 erstellt wurde, besitzt sie auch heute noch uneingeschränkt Gültigkeit.

Von besonderer Bedeutung sind aus der Sicht des Verkehrsingenieurs die folgenden Vorteile, auf die deshalb ausführlicher eingegangen wird.

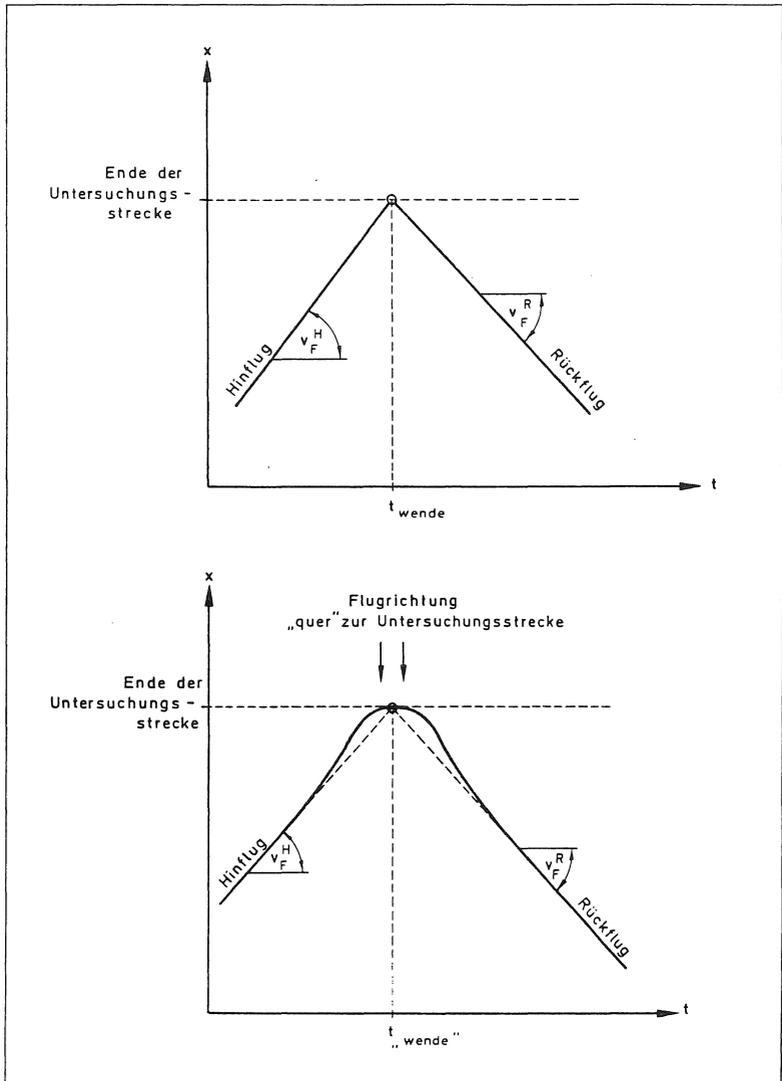


Abbildung 5:

- (a) in der vorliegenden Untersuchung unterstellte,
 (b) praktische Durchführung der Flugzeugwende am Beginn bzw. Ende der Untersuchungsstrecke

Zu nennen ist zunächst die Erweiterung des überwachten Streckenbereichs. Lokale Beobachtungen sind auf einen Querschnitt beschränkt; "Verkehr" vor oder nach diesem Punkt kann nur durch weitere (im Grenzfall unendlich viele) Beobachtungsquerschnitte erfaßt werden. Die Größe des in Luftbildern erfaßten räumlichen Bereichs ist prinzipiell nur durch die Reichweite des Flugzeugs beschränkt.

Die Analyse von Luftbildern erlaubt daneben durch Vergleich zwischen verschiedenen Teilstrecken erstmals auch die Messung räumlicher Unterschiede und Einflüsse auf Verkehrsparameter (siehe dazu die Abschnitte 5 und 7). Aus dem Vergleich zweier zeitlich versetzter Beobachtungen derselben Strecke können auch zeitliche Unterschiede oder Einflußfaktoren erkannt werden.

Die sowohl zeitlich als auch räumlich ausgedehnte Verkehrserfassung in Luftbildern erlaubt es damit auch, Verkehrsparameter für einen größeren, fest definierten Bereich der Zeit-Weg-Fläche zu berechnen. Dadurch können aussagekräftige globale Verkehrsgrößen bestimmt werden.

Aus Luftbildern ist weiter der jeweilige Streckenverlauf sowie der Zustand der verkehrlichen Randbedingungen (Witterung, Sichtweite, o.ä.) direkt erkennbar. Daneben bietet die Beobachtungsart die Gewähr, daß kein Einfluß auf die Verkehrsteilnehmer vorliegt. Das Fahrverhalten wird nicht beeinflusst, während z.B. manche Arten von Zählungen, Radar- oder Lichtschrankenmessungen bei vielen Fahrzeugführern zu einer abrupten Änderung der Fahrweise und so zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen können.

Als weiterer Vorteil ist zu nennen, daß Verkehrsbeobachtungen mittels Luftbildern mobil einsetzbar sind. Bei Bedarf kann die zu beobachtende Strecke schnell gewechselt werden; bauliche Änderungen auf der Strecke oder der Aufbau von Meßgeräten entfallen; selbst während der Dauer der Messung kann ein zeitlich und räumlich festgelegter Untersuchungsbereich beispielsweise in dem Maße, in dem sich ein Staubereich oder eine Dichtewelle bewegen, verändert werden. Durch die Installation des Meßgeräts im Flugzeug sind dazu keinerlei "Umbauten" oder Änderungen des Aufnahmesystems notwendig.

Besonderes Interesse verdient – aus der Sicht des Verkehrsingenieurs – vor allem die Möglichkeit, aus den Beobachtungen die "Bewegungslinie" (s. Def. 1) von Fahrzeugen bestimmen zu können. In der Vergangenheit waren solche Zeit-Weg-Fahrlinien nur sehr schwer bestimmbar, z.B. durch Verfolgungsfahrten (Abgas-Großversuch, 1986). Die Bestimmung von Fahrlinien ist die Voraussetzung zur Beantwortung verschiedener verkehrstechnischer Fragestellungen (z.B. zur Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen (HOEFS, 1972), zur Messung des "Beschleunigungsrauschens" (WINZER, 1980), zur Höhe der jeweils gewählten "Wunschgeschwindigkeit" (WIEDEMANN/HUBSCHNEIDER, 1982) oder zur Berechnung von Abgasemissionen (BENZ, 1985)) und ist von grundlegender Be-

deutung, da durch die Angabe von Fahrlinien das komplexe System Verkehr (annähernd) vollständig beschrieben werden kann. Wenn es gelingt, für einen räumlich-zeitlichen Beobachtungsbereich alle Fahrlinien anzugeben, dann sind daraus praktisch alle relevanten Verkehrsparameter ableitbar. Es entsteht ein Datensatz, der auch zusätzliche Auswertungen zu jedem späteren Zeitpunkt erlaubt.

Beispielsweise können auf diese Weise auch die – sonst nur sehr schwer abzuschätzenden – Interaktionen zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern erkannt und ggf. quantifiziert werden. Wie in Abschnitt 7 gezeigt wird, kann damit auch Art und Größe von Einflußfaktoren auf den Straßenverkehr ermittelt werden.

Insgesamt bietet diese Beobachtungsart damit Vorzüge, die ihre Verwendung zur Beantwortung verschiedenster Fragestellungen im Verkehrswesen attraktiv erscheinen lassen – sofern es gelingt, die dazu notwendigen Informationen genau, zuverlässig und effizient aus dem vorhandenen Bildmaterial zu extrahieren.

2.3 Nachteile und Schwierigkeiten

Verkehrsbeobachtungen mittels Luftbildern besitzen neben den genannten Vorzügen auch eine Reihe von Nachteilen, die z.T. schon DÖHLER (1966) erwähnt (s. Abschnitt 1.1).

So ist die Beobachtung beispielsweise stark vom Wetter abhängig; Überfliegungen bei Regen, Nebel oder Dunst können häufig nicht durchgeführt werden. Sind Straßenabschnitte verdeckt (Brücken, Tunnel . . .) oder nur schwer einzusehen, so ist das Verfahren ebenfalls nicht einsetzbar. Dies gilt auch für Strecken, die so stark gekrümmt sind, daß das Flugzeug dem Streckenverlauf nicht mehr folgen kann.

Die Beobachtungsdauer ist auf die maximal mögliche Flugzeit beschränkt. Kontinuierliche Ganztagsbeobachtungen sind nur möglich, wenn zwei Flugzeuge alternierend eingesetzt werden. In allen anderen Fällen ergibt sich eine maximale Beobachtungszeit von etwa 4-5 Stunden. Obwohl diese Zeit beispielsweise für die Untersuchung des Verkehrs in Stoßzeiten durchaus genügt, wird eine vollständige Erfassung eines größeren Zeitraums doch erschwert.

Der für die Beobachtungen notwendige Geräteaufwand ist verhältnismäßig groß. Die Verwendung eines Flugzeugs ist relativ aufwendig; Bildaufnahmen erfordern eine Kamera und ein Speichermedium (Fotokamera mit Bildspeicherung auf fotografischem Film, Videokamera mit magnetischer Bildspeicherung, ggf. auch eine Kamera mit digitalem Bildspeicher). Allerdings ist zu erwarten, daß der Preis von Bilderfassungssystemen (z.B. Videokamera und Peripheriegeräte) weiter sinken wird und von dieser Seite einer häufigeren Verwendung keine Hindernisse mehr

entgegenstehen werden.

Als Hauptnachteil des Verfahrens können aber vor allem die Schwierigkeiten bei der Bildauswertung angeführt werden. Während die bisher übliche manuelle Auswertung vor allem Zeit- und Kostenprobleme aufwarf, ergeben sich im Fall der hier angestrebten Auswertung digitaler Bilddaten in einem Rechnersystem vor allem Schwierigkeiten bei der Entdeckung und Interpretation der beobachteten Ereignisse und Bildinhalte. Automatische Fahrzeugsuche, Ortsbestimmung und Geschwindigkeitsmessungen sind nur unter Verwendung aufwendiger Verfahren der Photogrammetrie und Mustererkennung möglich (s. VÖGTLE (1989)). Erfolgen die Bildaufnahmen wie hier mit einer Videokamera und die Auswertungen der digitalen Bilddaten im Rechner, so sind zusätzlich etwa die folgenden Probleme zu nennen:

- Die Pixelgröße (Größe der Bildpunkte) erlaubt nur eine begrenzte Auflösung bzw. einen begrenzten Bildausschnitt bei der vorgeschriebenen Mindestflughöhe (150 m über Grund (LUFT-VO, 1981)).
- Die Kamera ist durch den Flugzeugmotor ständigen Vibrationen ausgesetzt. Zusätzlich treten Schlingerbewegungen um alle drei Achsen auf; insbesondere bei der verwendeten Videokamera entsteht dadurch wegen der langen Abtastdauer von 1/25 Sekunde die Gefahr von Verwischungen.
- Windeinflüsse und Druckunterschiede stören die gewünschte Fluglinie z.T. erheblich. Fluggeschwindigkeit bzw. Flughöhe über Grund können im praktischen Einsatz kaum konstant gehalten werden. Schwankungen in der Flughöhe bewirken Maßstabsunterschiede; d.h. die Fahrzeuge werden innerhalb des Bildes entweder kleiner (Flugzeug steigt) oder größer (Flugzeug sinkt) abgebildet.
- Belichtungsänderungen oder unterschiedliche Beleuchtungseinrichtungen (z.B. zwischen Hin- und Rückflug) lassen dasselbe Fahrzeug plötzlich dunkler oder heller erscheinen.
- Schatten von Fahrzeugen und Gebäuden und Bäumen am Straßenrand können insbesondere bei tiefstehender Sonne zu Problemen bei der Fahrzeugdetektion oder bei der Messung der Verkehrsparameter führen.
- Mangelnder Kontrast zwischen Fahrzeug und Fahrbahndecke läßt unter Umständen einzelne Fahrzeuge der gleichen Helligkeit plötzlich "verschwinden" oder erschwert zumindest ihre Erfassung.
- Zur Erfassung vieler Fahrzeuge wäre eine schnelle Befliegungsgeschwindigkeit wünschenswert (s. Abschnitt 4); zur exakten Fahrzeugbestimmung und -de-

tektion ist eine langsame Fluggeschwindigkeit anzustreben. Zwischen beiden Zielvorstellungen muß ein Kompromiß gefunden werden.

Photogrammetrisch ist deshalb die Auswertung der Bilddaten ein komplexes Problem (siehe WOLFERTS, 1974); die Schwierigkeiten sind selbst bei guten Flugbedingungen nicht vernachlässigbar. Eine exakte Erläuterung der auftretenden Fehlerfaktoren sowie eine Fehlerabschätzung findet sich bei VÖGTLE (1989). Dies gilt vor allem für den Rückflug, da sich dann die beschriebenen Aufgaben wegen der kurzen Beobachtungsdauer, der großen Zahl von Fahrzeugen und der großen Geschwindigkeitsdifferenz (relative Geschwindigkeit) zwischen Fahr- und Flugzeug nur schwer lösen lassen (LEUTZBACH, BÄHR, BECKER u. VÖGTLE, 1987). Bessere Voraussetzungen bietet der Hinflug. Die geschilderten Nachteile werden relativiert oder wandeln sich zu Vorteilen (geringere Geschwindigkeitsdifferenzen, längere Beobachtungsdauer, geringere Fahrzeuganzahl).

Ein weiterer Nachteil ergibt sich aus dem in Abb. 3 dargestellten Zusammenhang:

Der direkt beobachtete Zeit-Weg-Anteil an der gesamten Zeit-Weg-Fläche "A" beträgt bei der Beobachtungsdauer "T" und beobachteter Streckenlänge "X":

$$\frac{\text{beobachteter Zeit-Weg-Bereich}}{\text{gesamter Zeit-Weg-Bereich}} = \frac{T \cdot AB}{T \cdot X} = \frac{AB}{X};$$

Beträgt die Größe des Aufnahmebereichs beispielsweise 70 m und die Länge der Untersuchungsstrecke 7 km, so wird nur 1 0/0 des gesamten Beobachtungsbereichs tatsächlich in Bildern erfaßt. Deshalb sind zunächst keine Aussagen über den Verkehrsablauf auf der gesamten Strecke X während der Beobachtungszeit T möglich. Die prinzipiellen Vorteile von Luftaufnahmen kommen jedoch nur dann zur Geltung, wenn Aussagen über die gesamte räumlich-zeitliche Beobachtungsfläche $A = X \cdot T$ getroffen werden können.

Ein wesentlicher Teil der Untersuchung widmet sich deshalb der Frage, wie aus Bildern mit relativ kleinem Aufnahmebereich Aussagen über Verkehrsparameter getroffen werden können, die die Verkehrssituation auf der gesamten Untersuchungsstrecke repräsentativ wiedergeben. Dies ist trotz der genannten Schwierigkeiten durchaus möglich, wie in Abschnitt 5 gezeigt wird.

2.4 Angestrebtes Entwicklungsziel

Bei der Verwendung von Luftbildern stellte bisher die komplizierte und arbeitsaufwendige Verarbeitung das Haupthindernis für die Verwendung in der Praxis dar; sie wurde oft als zu aufwendig bzw. zu teuer empfunden. Eine Änderung dieses Sachverhalts ergab sich erst durch die Möglichkeit, die "Bilder" in digitaler und damit "computergerechter" Form aufnehmen zu können sowie durch die raschen Fortschritte der automatischen Bildverarbeitung in elektronischen Rechanlagen.

In der folgenden Untersuchung wird deshalb die Anwendung der automatischen Bildverarbeitung für die Erhebung der verkehrsrelevanten Größen aus Luftbildern überprüft. Die Bilddaten werden dabei von einer CCD-Kamera aufgenommen und vom Rechner automatisch ausgewertet. Die Entwicklung geeigneter Datenauswertungs- und Verarbeitungsverfahren ist damit wesentlichste Aufgabe der Arbeit:

- Es ist zu überprüfen, wie und welche Verkehrsgrößen aus dem Bildmaterial bestimmt werden können, welche Eigenschaften sie besitzen und wie sie mit Verkehrsgrößen verglichen bzw. kombiniert werden können, die aus anderen Beobachtungen errechnet wurden.

Ergebnis dieser Auswertung sind zum einen die relevanten Einzelfahrzeugdaten (Ort, Zeit, Geschwindigkeit, Verlauf der Zeit-Weg-Fahrlinie) sowie zum anderen verschiedene globale Verkehrsparameter (mittlere Geschwindigkeit, Verkehrsdichte, o.ä.). Aus diesen Verkehrsgrößen sollen Aussagen über die Verkehrssituation während der Beobachtungszeit im beobachteten Streckenabschnitt gewonnen werden. Gegebenenfalls sind aus dem zeitlichen und/oder räumlichen Verlauf der Kenngrößen Erkenntnisse über Einflußfaktoren auf die Verkehrssituation ableitbar. Verkehr könnte durch ein solches System nicht nur analysiert, sondern ggf. auch prognostiziert und damit (bei Verwendung von schnellen Rechnern und on-line-Datenverarbeitung) in der Zukunft möglicherweise sogar direkt gesteuert werden.

Das angestrebte System zur Auswertung von Beobachtungen aus der Luft besteht aus den in Tabelle 1 beschriebenen Komponenten:

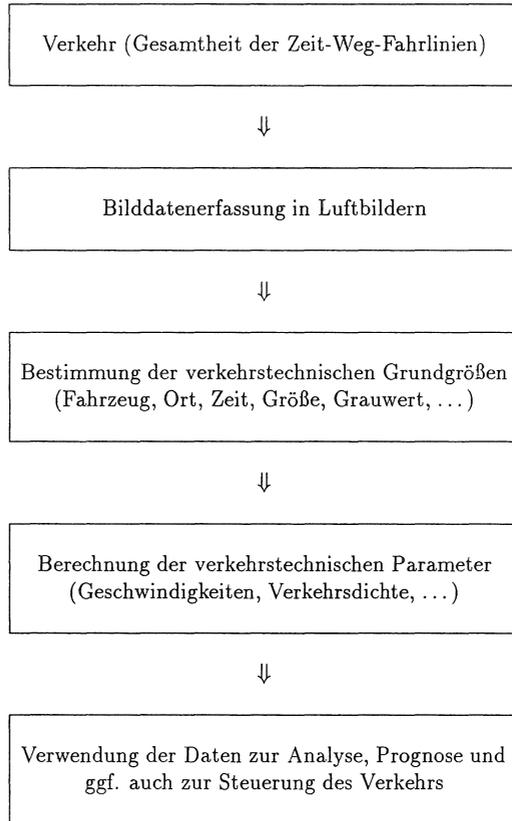


Tabelle 1:
(Systematisierte) Vorgehensweise zur Verwendung von Luftbildaufnahmen im Verkehrswesen

Der Bilddatenerfassung und der automatischen Bestimmung der Fahrzeuggrößen – dies sind die ersten beiden Schritte der obigen Systematik – widmet sich eine parallellaufende Untersuchung von VÖGTLE (1989), in der in enger Abstimmung die Voraussetzungen zur vorliegenden Untersuchung erarbeitet wurden. Auf die dort erreichten Ergebnisse stützen sich sämtliche hier vorgestellten Verfahren.

Im folgenden Abschnitt wird deshalb kurz auf andere Ansätze zur Verkehrsdatenbestimmung aus Luftbildern verwiesen und der Bezug zu dem von VÖGTLE (1989) entwickelten Bildauswerteverfahren gezeigt, das ebenfalls skizziert wird.

3 Aufnahme und Verarbeitung der Bilddaten

Ohne auf spezielle Ansätze einzugehen, sollen im folgenden sowohl die bisher entwickelten als auch die der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Elemente der Bilderfassungs- und -auswertesysteme beschrieben werden. Zur Beantwortung von Detailfragen bezüglich des entwickelten Bildauswertesystems sei auf die umfassende Arbeit von VÖGTLE (1989) verwiesen.

3.1 Aufnahme der Bilddaten

Für Luftbildaufnahmen wurden in der Vergangenheit verschiedene Kamerasysteme benutzt. WOHL (1958) verwendet z.B. eine Filmkamera ohne Verschuß, die permanent eine sehr kleine Fläche fotografischen Films belichtet. Bei der überwiegenden Mehrzahl aller Anwendungen wurden dagegen Aufnahmekammern eingesetzt, die zu festgelegten, diskreten Zeitpunkten jeweils ein Bild belichteten. Allerdings wurden dabei – je nach Ansatz – unterschiedliche Bildformate gewählt; zwischen photogrammetrischen Plattenaufnahmen (im Format 230x230mm) und der Verwendung von 135-er Kleinbildfilm (im Negativformat 24x36mm) sind annähernd alle Bildgrößen anzutreffen. Die für verkehrstechnische Luftbildaufnahmen charakteristischen Ansätze sind in Tab. 2 zusammengestellt. Nähere Informationen sind den im Literaturverzeichnis aufgeführten Arbeiten zu entnehmen.

Bei allen Ansätzen, die auf Kameras zurückgreifen, werden dabei in festen Zeitabständen (1,0 bis 12 Sekunden) Aufnahmen ausgelöst. Für die Bildaufnahme werden daher zunehmend Fotoapparate durch Filmkameras ersetzt; in aller Regel findet dann ein 16mm-Filmformat Verwendung. Die Größe des fotografischen Bildes sinkt bis auf etwa 7x9mm (HURDLE u.a., 1986).

Aus Tabelle 2 ist eine Entwicklung zu kleineren Bildformaten zu erkennen, die mit einer Erhöhung der Zahl von Bildern pro Zeitintervall einhergeht. Dabei geschieht bei allen bisherigen Ansätzen die Verarbeitung und Auswertung der Bildaufnahmen in einem manuellen Verfahren. Daraus resultieren hohe Auswertekosten bzw. -zeiten.

Um die hohen Kosten bzw. den hohen Zeitaufwand der bisher üblichen manuellen Auswertung zu verringern, ist eine möglichst vollständige Bildverarbeitung und -auswertung in Computern anzustreben. Aus verschiedenen Gründen scheiterte dies bisher. Auswertungen in elektronischen Rechenanlagen sind nur möglich, wenn die vorliegende Bildinformation dem Rechner in digitaler Form zur Verfügung gestellt werden kann. Dazu müssen die aufgenommenen Bilddaten in möglichst viele Bildpunkte aufgeteilt und diese "digitalisiert" werden. "Digitalisiert" bedeutet in

diesem Zusammenhang, daß der Grau- oder Farbwert jedes Bildpunktes in digitalen Ziffern einer definierten Skala ausgedrückt wird. Bei den hier beschriebenen Aufnahmesystemen bedeutet dies weiter, daß in einem (beliebigen) Glied der Übertragungskette eine Wandlung vom Analog- zum Digital-Signal notwendig ist, um die Verarbeitung im Rechner zu ermöglichen. Danach liegen "digitale Bilddaten" vor, die innerhalb des Auswerteprogramms bearbeitet werden können.

LAND	JAHR	AUTOR	BILDFORMAT	SONSTIGES
USA	1958	WOHL	kontinuierl.	Streifenfotogr.
USA	1963	JORDAN	230x230mm	Standardformat
USA	1963	WAGNER/MAY	130x130mm	phot. Film
D	1963/66	LEUTZBACH	230x230mm	Standardformat
D	1966	DÖHLER	230x230mm	Standardformat
USA	1966/69	TREITERER	56x56mm	bzw. 70x70mm
ISRAEL	1973	PELEG u.a.	130x130mm	phot. Film
GB	1973	WYBORN	60x60mm	bzw. 7x9mm
D	1974	WOLFERTS	60x60mm	bis 7x24mm
CAN	1975	ASHWOOD u.a.	60x60mm	phot. Film
USA	1981/82	ARDEKANI u.a.	230x230mm	Standardformat
D	1982	ALBERTZ u.a.	230x230mm	Standardformat
USA	1983/85	SMITH u.a.	24x36mm	Filmkamera
F	1983/85	ROBIN u.a.	?mm	phot. Film
CH	ca. 1984	SWISSAIR	95x120mm	Farbdiafilm
JAPAN	1985	MAKIGAMI	24x36mm	2 KB-Kameras
CAN	1986	PERSAUD u.a.	7x9mm	feste Filmkamera
D	1986/87	VOEGTLE	388x577Pixel (= 7x9mm)	CCD-Videokamera

Tabelle 2:

Übersicht über verwendete Film-/Kameratypen und Ansätze zur Verkehrsdatenbestimmung aus Luftbildern

Erleichtert wurde diese Vorgehensweise durch die Entwicklung von CCD- (Charge Coupled Device-) Kameras. In diesen Kameras wird kein fotografischer Film belichtet; vielmehr besteht die Bildebene aus einer Vielzahl lichtempfindlicher Elemente, die die Stärke der empfangenen Lichtmenge messen, indem im lichtempfindlichen Element eine Spannung aufgebaut wird, die der Helligkeit des Bildpunktes ent-

spricht. Diese Spannung kann gemessen und in Zahlenwerten (digital) ausgedrückt werden. Ein Bild besteht in diesem Fall nur noch aus der Angabe der Helligkeits- oder Farbwerte jedes Bildpunktes.

Die in der vorliegenden Untersuchung verwendete CCD-Kamera ermöglicht die Aufnahme von 25 digitalen Video-Bildern pro Sekunde, wobei jedes Bild aus 388×577 Bildelementen (Pixeln) aufgebaut ist. Die CCD-Kamera ist dabei für die Erzielung der notwendigen Ergebnisdaten ausreichend genau; eine fehlertheoretische Untersuchung sowie die Kalibrierung der Kameraparameter von VÖGTLE (1988) ergab entsprechende, zufriedenstellende Werte. Dies gilt selbst dann, wenn nicht alle, sondern nur drei bis fünf der 25 vorliegenden Bilder (pro Sekunde) ausgewertet werden. Da der Rechenzeitbedarf bei der photogrammetrischen Auswertung direkt von der Zahl der bearbeiteten Aufnahmen abhängt, bedeutet dies gegenüber der Auswertung aller verfügbaren Bilddaten eine Verkürzung des Rechenzeitbedarfs auf 12-20% des ursprünglichen Bedarfs.

3.2 Speicherung der Bilddaten

Die von der CCD-Kamera gelieferten Bilddaten können sofort von elektronischen Rechenanlagen verarbeitet werden. Zur Zeit können marktübliche Rechner, die sich für diese Aufgabe eignen, wegen ihrer Abhängigkeit von einer festen, geregelten Spannungsquelle und ihrer Stoßempfindlichkeit noch nicht im Flugzeug mitgeführt werden. Zwar existieren bereits sogenannte "handheld Computer" mit eigener Spannungsversorgung; ihre Rechenkapazität ist allerdings noch begrenzt. Es ist jedoch damit zu rechnen, daß in den nächsten Jahren schnellere, kostengünstige und portable Industrierechner für die Verarbeitung von (Luft-)Bilddaten verfügbar sein werden. Das derzeitige Fehlen solcher Geräte bedeutet, daß aufgenommene Bilddaten bis zur Auswertung zwischengespeichert werden müssen.

Die während der Bildaufnahme insgesamt anfallende Datenmenge ist enorm groß, wie die folgende Übersichtsrechnung zeigt:

- In einem Bild können etwa 75 m Straßenoberfläche erfaßt werden. Die Flugeschwindigkeit darf nicht kleiner als ca. 25 m/s sein. Um sicherzustellen, daß auch bei Rückflügen schnelle Pkw ($v = 50$ m/s) in mindestens zwei Bildern erfaßt werden, müssen zumindest drei Bilder pro Sekunde ausgewertet werden.
- Selbst bei optimaler Datenreduktion (= Entfernung redundanter oder unwichtiger Bildteile) besteht jedes Bild noch aus ca. $500 \cdot 200$ Bildelementen (Pixeln), von denen jedes durch einen Wert im Bereich von $[0-255]$ "Grauwertstufen" dargestellt wird und deshalb ein "byte" Speicherplatz benötigt.

Ein "Bild" besteht damit aus rund 100.000 Grauwerten und belegt einen Speicherplatz von 100 KB; es entsteht eine Datenmenge von mindestens 300 KB pro Sekunde. Für einen einstündigen Flug ergeben sich – bei günstigen Annahmen – über 1000 MB an Nutzinformation.

Derzeit kann diese gewaltige Datenmenge während des Fluges noch nicht digital gespeichert werden. Die Entwicklung geeigneter Compact-Disc-(CD-)Speicherplatten kann mittelfristig möglicherweise zu einer Lösung dieses Problems führen. Im Moment ist eine Zwischenspeicherung der Bilddaten nur in analoger (magnetisierter) Form möglich. So wurde auch bei den im Rahmen des Projekts durchgeführten realen Befliegungen vorgegangen.

3.3 Automatische photogrammetrische Auswertung

Die automatische, photogrammetrische Auswertung der auf Videoband gespeicherten Luftbilder erfolgt innerhalb des von VÖGTLE (1988) entwickelten Rechenprogramms durch eine Reihe von Algorithmen, die auf Standardprozeduren der Bildverarbeitung und der Photogrammetrie zurückgreifen. Auf die Entwicklung eigener, spezialisierter (und damit evtl. schnellerer) Geräte, Prozessoren oder Prozeduren wurde verzichtet. Im Gegensatz zu einer Reihe anderer Ansätze (s. ABRAMCZUK, 1982 u. 1987 oder SMITH u. ROSKIN, 1985) wurde damit kein hochspezialisiertes und optimiertes Verarbeitungsprogrammsystem geschaffen. Grundsatz der Rechner-Programm-Konzeption war es, die Verfahren und Geräte "so einfach wie möglich, so komplex wie nötig" zu halten.

Als Rechnersystem wurde eine PDP 11/73 und das Bildverarbeitungssystem "Micropicture" von VTE verwendet. Dieses System kann bis zu vier "Bilder" gleichzeitig speichern und seriell auswerten.

Nach jedem Beobachtungsflug werden die gespeicherten Bilddaten im Labor ausgewertet. Dazu wird auf einem Monitor dasjenige Bild identifiziert, in dem die ersten (manuell gemessenen) Paßpunkte am Beginn der Untersuchungsstrecke abgebildet sind; dabei kann es sich um eine Autobahnausfahrt, eine Brücke, eine Fahrbahnmarkierung o.ä. handeln. Dem Rechner ist dann die Position des ersten Bildes bekannt, und das Programm läuft bis zum (vordefinierten) Ende der Untersuchungsstrecke automatisch ab. Lediglich gewisse Fehlerkorrekturabfragen sowie die Datenübergabe vom Recorder an den Rechner erfordern derzeit noch interaktive Eingaben.

Innerhalb des Auswerteverfahrens werden in jedem Folgebild alle Fahrzeuge, die bereits vorher beobachtet wurden, identifiziert. Für diese Fahrzeuge werden Größe,

Grauwert, Geschwindigkeit und Ort/Zeit bestimmt und im Ausgabefile abgespeichert. Fahrzeuge, die im nächsten Bild nicht mehr erscheinen, wurden also mindestens zweimal beobachtet; ihre Verkehrsparameter wurden gemessen. Fahrzeuge, die erstmals auftreten, werden – z.B. mit der Differenzbildmethode – erkannt und erfaßt. Sodann wird das nächste zu untersuchende Bild in den Rechner eingespielt; die beiden "Bildern" gemeinsamen Paßpunkte werden mit Hilfe von Korrelationsverfahren bestimmt und neue Paßpunkte im erstmals erfaßten Bildteil zusätzlich definiert. Aus der Verschiebung und Position der Paßpunkte kann die zwischenzeitlich erfolgte Änderung von Flugzeug oder Kamera bestimmt werden. Der Abbildungsmaßstab wird über die Breite des Fahrstreifens errechnet. Damit sind die Positionen des Flugzeugs und der Fahrzeuge im neuen Bild festgelegt und die Fahrzeuguntersuchungen können weitergeführt werden.

Dieser Prozeß wiederholt sich alternierend bis zum Streckenende. Zwischen dem Ende eines Hin- und dem Beginn des Rückflugs "pausiert" das Verfahren. Wegen der größeren relativen Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Flugzeug und Fahrzeugen sind die Aufnahmen der Rückflüge allerdings in kürzeren Zeitabständen auszuwerten. Da somit deutlich mehr Bilder untersucht werden müssen, steigt der Zeitbedarf für die Auswertung, während die Genauigkeit der errechneten Größen abnimmt. Daher werden auf Rückflügen erfaßte Bilddaten nur ausgewertet, wenn sie – z.B. für die Fahrzeugzuordnung – benötigt werden.

Insgesamt entsteht somit ein System zur automatischen Fahrzeugerkennung und -messung. VÖGTLE (1989) beschreibt ausführlich alle charakteristischen Ansätze, die Besonderheiten sowie die Vor- und Nachteile. Die Arbeiten am photogrammetrischen Auswerteprogramm sind abgeschlossen. Wie z.B. die Auswertungen von Befliegungen der BRENNER-Autobahn (RUDELSTORFER u.a., 1987) zeigen, steht ein lauffähiges Verfahren zur Verfügung.

Die auf diese Weise bestimmten Daten bilden die Grundlage aller verkehrstechnischen Auswertungen. Berechnung, Analyse und Verwendung der verkehrstechnischen Größen aus den so berechneten Eingangsdaten werden in den folgenden Abschnitten untersucht.

Zur Beantwortung der Frage, welche Verkehrsgrößen auf welche Weise bestimmt werden können, müssen zunächst die charakteristischen Eigenschaften der "bewegten Beobachtung" in Luftbildern untersucht werden. Es ist zu klären, wie sich die bewegte Beobachtung in das System der verschiedenen anderen Beobachtungsarten einfügt und wo die Unterschiede liegen.

4 Unterschiede und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Beobachtungsarten

In Abschnitt 2 wurden die charakteristischen Eigenschaften einer “bewegten Beobachtung” (mit oder entgegen dem Verkehrsstrom) beschrieben. Abb. 2 zeigt die Illustration der Unterschiede zu den anderen Beobachtungsarten.

Damit stellt sich die Frage, wie sich die bewegte Beobachtung in das System der Beobachtungsarten momentan, lokal und räumlich-zeitlich einordnen läßt und ob Unterschiede/Zusammenhänge zwischen den aus verschiedenen Beobachtungen ermittelten Verkehrsgrößen bestehen. So gibt z.B. LEUTZBACH (1972) funktionale Abhängigkeiten zwischen momentaner und lokaler Beobachtung (bei Annahme konstanter Geschwindigkeitsverteilungen) an. Solche Abhängigkeiten sind für die Parameter der bewegten Beobachtung bisher nicht bekannt. Vergleiche zwischen verschiedenen Beobachtungsarten bzw. Umrechnungen gemessener Größen in vergleichbare Parameter anderer Beobachtungsarten werden möglich, wenn die systematischen Unterschiede zwischen diesen bekannt sind und eliminiert werden können. Im folgenden werden deshalb die Eigenschaften der vier Beobachtungsarten untersucht und Formeln entwickelt, die die Unterschiede zwischen ihnen eliminieren.

Da solche Abhängigkeiten nur angegeben werden können, wenn die verschiedenen Beobachtungen denselben Verkehrszustand erfassen, werden in dieser Arbeit bestimmte Eigenschaften für die zugrundeliegende Verkehrssituation unterstellt. Dazu werden folgende Definitionen getroffen:

Def. 16: Fahrzeugbewegungslinien sind “unabhängig” voneinander, wenn zu keinem Zeitpunkt ein Einfluß einer Bewegungslinie auf eine andere vorliegt.

Damit bewegen sich bei Unabhängigkeit alle Fahrzeuge so, als wären sie allein unterwegs. Begegnen sich zwei oder mehr Fahrzeuge, so kann jedes weiterfahren, als ob die anderen Fahrzeuge nicht vorhanden wären. Das bedeutet in der Praxis, daß z.B. Überholungen immer und sofort stattfinden können. Kein Fahrzeug muß wegen eines anderen Fahrzeuges abbremsen oder beschleunigen (s. z.B. JACOBS, 1970).

Def. 17: “Freier” Verkehr liegt vor, falls alle Bewegungslinien voneinander unabhängig sind.

Def. 18: Verkehr ist “stationär über die Zeit”, wenn kein Einfluß der Zeit auf die diesen Verkehr beschreibenden Größen vorliegt. Für jeden (beliebigen) Ver-

kehrsparameter P gilt dann:

$$P(t_i) = P(t_j) = \text{konstant "für alle" } t_i, t_j$$

Def. 19: Verkehr wird "stationär über den Weg" genannt, wenn kein Einfluß des Weges auf die den Verkehr beschreibenden Größen vorliegt. Für jeden (beliebigen) Verkehrsparameter P gilt dann:

$$P(x_i) = P(x_j) = \text{konstant "für alle" } x_i, x_j$$

"Stationarität der Verkehrsgrößen" bedeutet also, daß sich die jeweiligen Verkehrsgrößen weder räumlich noch zeitlich ändern. Dies gilt im vorliegenden Fall insbesondere für Geschwindigkeitsparameter; bei stationärem Verkehr ergeben sich zu allen Zeitpunkten und an allen Querschnitten identische Geschwindigkeitsverteilungen. In der Realität wird dies sicher nur in Ausnahmefällen zutreffen. Die Definitionen erweisen sich aber als hilfreich zur Bestimmung der systematischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Beobachtungsarten.

JACOBS (1970) fordert zur Erfüllung von Stationarität, daß für alle Parameterwerte entweder die endlich dimensionalen Verteilungsfunktionen oder aber deren Momente erster und zweiter Ordnung (Mittelwerte und Varianzen) frei von zeitlichen oder räumlichen Einflüssen sind. Im zweiten Fall ergeben sich zwar weniger harte Bedingungen, die jedoch bei allen praxisrelevanten Fragestellungen zum gleichen Ergebnis führen.

Um die Wirkungen der unterschiedlichen Beobachtungsarten abzuschätzen, wird in Abschnitt 4 unterstellt:

- (a) Es liegt freier Verkehr vor.
- (b) Der Verkehr ist stationär über Zeit und Weg.

4.1 Momentane Beobachtung

Die "momentane Beobachtungsmethode" spiegelt die zu einem Zeitpunkt auf der Untersuchungsstrecke augenblicklich ("momentan") vorliegende Situation exakt wider. In ihr wird jedes zum Beobachtungszeitpunkt auf dem Streckenabschnitt anwesende Fahrzeug mit gleicher Gewichtung in die Stichprobe einbezogen. Grundlage dieser Beobachtung ist z.B. ein Luftbild mit großem Bildbereich. Die so beobachtete Geschwindigkeitsverteilung wird im folgenden mit $g_m(v)$ bezeichnet.

Wird Verkehr als Funktion des Weges über der Zeit betrachtet (s. Abschnitt 1), so entspricht die momentane Beobachtung einer Übersicht über alle vorhandenen Fahrzeuge zum gewählten Zeitpunkt – die momentane Beobachtung wird so in gewisser Weise zu einer Grundform aller Beobachtungsarten. Alle Fahrzeuge, die einer momentanen Beobachtung zugrundeliegen, halten sich tatsächlich zum jeweiligen Zeitpunkt am beobachteten Ort auf. Sowohl physikalisch als auch mathematisch (s.u.) stellt die momentane Beobachtung in diesem Sinne einen “Grundzustand” und die mittlere momentane Geschwindigkeit eine Basisgröße dar.

Werden N Fahrzeuge mit individueller Geschwindigkeit v_i ($1 \leq i \leq N$) auf dem Streckenabschnitt der Länge X beobachtet, so gilt für die momentanen Verkehrsgrößen:

$$k = \frac{N}{X} \quad [\text{Fz/m}] \text{ oder } [\text{Fz/km}] \quad (1)$$

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad [\text{m/s}] \text{ oder } [\text{km/h}] \quad (2)$$

$$g_m(v) = \frac{\text{Anz. Fz mit } v_i = v}{N} \quad (3)$$

Die Varianz (oder auch “mittlere quadratische Abweichung der Grundgesamtheit”) ergibt sich zu:

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v}_m)^2 \quad (4)$$

Da in einer – zeitlich befristeten – Beobachtung nicht alle Fahrzeuge der Grundgesamtheit erfaßt werden, ist statt der Varianz die sogenannte Stichprobenvarianz (BAMBERG u. BAUR, 1980) zu verwenden:

$$s_m^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v}_m)^2 = \frac{N}{N-1} \cdot \sum_v (v - \bar{v}_m)^2 \cdot g_m \quad (5)$$

σ_m^2 und s_m^2 werden in der Regel verschieden groß sein. s_m^2 ist allerdings ein erwartungstreuer Schätzwert für σ_m^2 .

Weiter gilt für die Verkehrsstärke q :

$$q = k \cdot \bar{v}_m = \frac{N}{X} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{X} \quad [\text{Fz/h}] \text{ oder } [\text{Fz/s}] \quad (6)$$

Die nach (6) berechnete Verkehrsstärke entspricht allerdings einem theoretischen Wert der Verkehrsstärke “für die Gesamtstrecke X”, der i.d.R. nicht direkt beobachtet werden kann.

Momentane Verkehrsgrößen besitzen folgende Vorteile:

- Momentane Werte bevorzugen im Gegensatz zu den anderen Beobachtungsarten nicht einzelne Geschwindigkeitsgruppen (s.u.).
- Momentane Werte sind nach Definition einem exakten Zeitpunkt und damit einer tatsächlich vorliegenden Verkehrssituation zuzuordnen.
- Momentane Werte reagieren schnell auf zeitliche Veränderungen der Verkehrssituation. Der Unterschied ist direkt aus dem Vergleich zweier Beobachtungen erkenntlich; Mittelwerte über Zeitintervalle (wie bei lokalen Größen) müssen nicht bestimmt werden.
- Momentane Werte sind für feste (aber beliebig große) Streckenabschnitte definiert. Treten keine Änderungen im Verkehrsablauf und der Streckencharakteristik auf, so lassen Unterschiede zwischen den momentanen Größen zweier unterschiedlicher Streckenabschnitte auf räumliche Einflüsse schließen.

Wie noch gezeigt wird, gilt für momentane Verkehrsgrößen weiter:

- Momentane und räumlich-zeitliche Parameter entsprechen einander direkt. Dadurch ist ein Vergleich mit unterschiedlichen Zeit-Weg-Flächen möglich.
- Momentane Werte lassen sich auch aus anderen Beobachtungen leicht bestimmen und in vergleichbare Parameter umrechnen.

Im folgenden wird deshalb die “momentane Beobachtung” als Ausgangsform und Bezugsgröße gewählt. Die anderen Beobachtungsformen werden auf sie zurückgeführt und mit ihr verglichen. Selbstverständlich könnte auch jede andere Beobachtungsform als Basisgröße gewählt werden; bei der hier untersuchten Fragestellung sprechen aber sowohl systematische Gründe als auch die oben beschriebenen Vorteile für eine Verwendung der momentanen Beobachtung als Ausgangsform. Nicht zuletzt legt auch die Form der mathematischen Abhängigkeiten die Wahl momentaner Werte als Bezugsgröße nahe.

4.2 Lokale Beobachtung

Bei der in der Praxis fast immer verwendeten lokalen Beobachtung werden alle Fahrzeuge erfaßt, die den festgelegten Meßquerschnitt passieren. Die Beobachtungen sind leicht durchzuführen und erfordern nur geringen Materialeinsatz.

Allerdings werden bei einer lokalen Messung schnelle Fahrzeuge überrepräsentiert, wenn man die physikalische Anwesenheit der Fahrzeuge auf der Strecke zu einem Zeitpunkt ("momentane Beobachtung") zugrundelegt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß schnellere Fahrzeuge in der gleichen Zeit mehrere (hintereinander liegende) Meßquerschnitte passieren; mit anderen Worten überfahren schnelle Fahrzeuge "häufiger" einen lokalen Meßquerschnitt als es den tatsächlichen Anteilen der Fahrzeugpopulation auf der Strecke entspricht. Dieser Zusammenhang läßt sich sehr anschaulich am Beispiel der von HAIGHT (1963) oder von LEUTZBACH (1972) beschriebenen, kreisförmigen "Ringfahrbahn" demonstrieren.

Die Parameter der lokalen Beobachtungsmethode werden wie folgt bestimmt, wenn in der Beobachtungsdauer "T" genau "M" Fahrzeuge gezählt werden:

$$q = \frac{\text{Anz. beob. Fz}}{\text{Meßdauer T}} = \frac{M}{T} \quad [\text{Fz/h}] \text{ oder } [\text{Fz/s}] \quad (7)$$

$$\bar{v}_l = \frac{\sum_{i=1}^M v_i}{M} \quad [\text{m/s}] \text{ oder } [\text{km/h}] \quad (8)$$

Ein Wert für die Verkehrsdichte k ist zunächst nicht direkt bestimmbar, da \bar{v}_m aus den lokalen Größen noch nicht bestimmbar ist. Allerdings gilt nach LEUTZBACH (1972) für die Wahrscheinlichkeit, an einem Querschnitt eine bestimmte Geschwindigkeit v zu beobachten:

$$g_l(v) = \frac{v}{\bar{v}_m} \cdot g_m(v) \quad (9)$$

Für die zu erwartende mittlere lokale Geschwindigkeit ergibt sich dadurch:

$$\bar{v}_l(v) = \bar{v}_m(v) + \frac{\sigma_m^2}{\bar{v}_m} \quad (10)$$

Die mittlere lokale Geschwindigkeit ist also nie kleiner als die mittlere momentane Geschwindigkeit. Falls ein Unterschied besteht, beträgt er σ_m^2/\bar{v}_m .

Die Beziehungen (9) und (10) geben an, wie Kenngrößen einer lokalen Verteilung aus momentanen Messungen bestimmt werden können. Die Berechnung in umgekehrter Richtung (Bestimmung momentaner Größen aus lokalen) wird erst möglich, wenn es gelingt, \bar{v}_m aus der lokalen Messung zu bestimmen. Ausgehend von (9) ergibt sich:

$$g_m(v) = \frac{g_l(v)}{v} \cdot \bar{v}_m$$

Da $\sum g_m(v) = 1$ folgt:

$$1 = \sum_v g_m(v) = \sum_v \frac{g_l(v)}{v} \cdot \bar{v}_m = \bar{v}_m \cdot \sum_v \frac{g_l(v)}{v}$$

\bar{v}_m wird also bestimmt zu:

$$\bar{v}_m = \frac{1}{\sum_v \frac{g_l(v)}{v}} \quad (11)$$

Nach (11) ist die mittlere momentane Geschwindigkeit aus der lokalen Geschwindigkeitsverteilung ableitbar.

Dieser makroskopische Weg besitzt den Nachteil, daß bei der Einordnung der mikroskopischen Fahrzeugdaten in die (diskreten) lokalen Geschwindigkeitsklassen Ungleichgewichte auftreten können (z.B. wenn ausschließlich Geschwindigkeiten von 39,9 m/s beobachtet wurden, die alle der relativ groben Klasse 35 m/s – 40 m/s zugeordnet wurden). Solche Ungleichgewichte bei der Einordnung wirken sich bei der Umrechnung in andere Beobachtungen als Verfälschungen aus, da implizit für die Umrechnungen der Klassenmittelwert (z.B. 37,5 m/s) als repräsentativ angesehen wird. Dieses Vorgehen birgt also gewisse Risiken. Wünschenswert wären deshalb Umrechnungsbeziehungen auf der Ebene der mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten.

Nach LEUTZBACH (1972) läßt sich \bar{v}_m auch aus dem Mittelwert der lokalen Langsamkeit \bar{w}_l berechnen:

$$\bar{v}_m = \frac{1}{\bar{w}_l} = \frac{M}{\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} + \dots + \frac{1}{v_M}} \quad (12)$$

Auch daraus läßt sich (11) direkt ableiten; beide Aussagen sind identisch. Allerdings ist (12) bei der Verwendung von Einzelfahrzeugdaten genauer, da die gemessenen Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten direkt in die Berechnung eingehen und

somit nicht die o.a. Ungleichgewichte bei der Verwendung von Klassenhäufigkeiten auftreten können.

Da die mittlere momentane Geschwindigkeit bekannt ist, kann aus der lokalen Messung die entsprechende Geschwindigkeitsverteilung berechnet werden:

$$g_m(v) = \frac{g_l(v)}{v} \cdot \bar{v}_m = \frac{g_l(v)}{v \cdot \sum_v \frac{g_l(v)}{v}} \quad (13)$$

Bezieht man (10) und (13) auf die Varianz (bzw. die Standardabweichung) der Grundgesamtheit, so gilt:

$$\sigma_l^2 = \sum_v (v - \bar{v}_l)^2 \cdot g_l(v) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M (v - \bar{v}_l)^2 \quad (14)$$

Bedingung hierfür ist, daß die Grundgesamtheit aller Verkehrsteilnehmer durch die "M" Fahrzeuge gegeben ist. Da dies nicht anzunehmen ist, sollte stattdessen die Varianz der beobachteten Stichprobe verwendet werden:

$$s_l^2 = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{i=1}^M (v - \bar{v}_l)^2 = \frac{M}{M-1} \cdot \sum_v (v - \bar{v}_l)^2 \cdot g_l(v) \quad (15)$$

(Wie üblich, entspricht die Standardabweichung der Wurzel dieses Ausdrucks.)

Selbstverständlich sind damit auch Varianz (und Standardabweichung) der momentanen Verteilung bestimmt:

$$\sigma_m^2 = \sum_v (v - \bar{v}_m)^2 \cdot g_m(v)$$

Für die Varianz der lokalen Beobachtung bedeutet das:

$$\sigma_l^2 = \sum_v v^2 \cdot g_l(v) - \bar{v}_l^2 = \sum_v v^2 \cdot \frac{v}{\bar{v}_m} \cdot g_m(v) - \left(\bar{v}_m + \frac{\sigma_m^2}{\bar{v}_m}\right)^2$$

Unter Verwendung von:

$$E(v^3) = E(v - \bar{v})^3 + 3 \cdot \bar{v} \cdot E(v^2) - 2 \cdot \bar{v}^3$$

ergibt sich nach mehreren Umformungen (analog für s^2):

$$\sigma_l^2 = \sigma_m^2 - \frac{\sigma_m^4}{\bar{v}_m^2} + \frac{E_m(v - \bar{v}_m)^3}{\bar{v}_m} \quad (16)$$

Lokale und momentane Geschwindigkeitsverteilungen sind damit vollständig ineinander überföhrbar.

Dadurch wird es weiter möglich, die einer lokalen Beobachtung entsprechende Verkehrsdichte k zu bestimmen:

$$k = q \cdot \sum_v \frac{g_l(v)}{v} \quad [\text{Fz/km}] \text{ oder } [\text{Fz/m}] \quad (17)$$

Die so bestimmte Verkehrsdichte stellt allerdings einen, aus den Beobachtungen am zugrundeliegenden Querschnitt abgeleiteten, theoretischen Wert für die zu erwartende Verkehrsdichte dar. Es kann nicht angenommen werden, daß dieser Verkehrsdichtewert auch tatsächlich während der Beobachtungszeit auf der gesamten Untersuchungsstrecke angetroffen wird.

Insgesamt läßt sich die lokale Beobachtungsart wie folgt charakterisieren:

- In der Praxis werden in aller Regel lokale Verkehrsparameter bestimmt.
- Lokale Parameter bevorzugen in gewisser Weise die schnelleren Geschwindigkeitsgruppen; d.h. schnellere Fahrzeuge besitzen statistisch ein größeres Gewicht.
- Lokale Parameter repräsentieren nur den Verkehrszustand an dem jeweiligen Beobachtungsquerschnitt.
- Zur Bestimmung der zeitlichen Änderung lokal bestimmter Verkehrsgrößen ist eine Intervallbildung notwendig. Die Verkehrsgrößen müssen zunächst für zwei aufeinanderfolgende Intervalle getrennt errechnet werden. Aus dem Vergleich beider Werte kann auf die Veränderung geschlossen werden. Dabei ist die Wahl von Intervallbeginn und -länge von großer Bedeutung.

4.3 Bewegte Beobachtung

Eine "bewegte Beobachtung" erfaßt alle Fahrzeuge, die während einer Meßfahrt vom Beobachter überholt werden bzw. den Beobachter überholen. Bewegte Beobachtungen werden damit stark von der Eigengeschwindigkeit des Beobachtungsflugzeugs (oder -fahrzeugs) bestimmt. Die Messung der mikroskopischen Fahrzeug-Kenngrößen erfolgt lediglich am Treffpunkt der Zeit-Weg-Linien von Beobachtungsflugzeug (-fahrzeug) und beobachtetem Fahrzeug. Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, ergeben sich als Sonderfälle der bewegten Beobachtung die

- lokale Verkehrserfassung (Beobachtungsgeschwindigkeit Null)
- momentane Verkehrserfassung (Beobachtungsgeschwindigkeit "unendlich")

Der Eigengeschwindigkeit des Beobachters kommt bei bewegten Beobachtungen besondere Bedeutung zu, weil dadurch in gewissem Sinne auch die jeweils erfaßten Fahrzeuge ausgewählt werden. Man unterscheidet deshalb prinzipiell zwischen einer Beobachtung im Hinflug (bei der sich der Beobachter in Fahrtrichtung der beobachteten Fahrzeuge bewegt) und der Verkehrserfassung im Rückflug (der Beobachter bewegt sich entgegen der Fahrtrichtung der Fahrzeuge) (s. Def. 10).

In Hin- und Rückflügen werden Fahrzeuge unterschiedlicher Geschwindigkeitsklassen deshalb häufiger bzw. seltener erfaßt, weil die Wahrscheinlichkeit für das Beobachten einer Geschwindigkeit in dem Maße abnimmt, in dem sich diese Geschwindigkeit der des Beobachters annähert (siehe z.B. HAIGHT, 1963; siehe ebenfalls Abb. 2). Die "relative Geschwindigkeitsdifferenz" bestimmt die Wahrscheinlichkeit für das Beobachten einer bestimmten Geschwindigkeit:

- Ist die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Flug- und Fahrzeug Null, so wird das Fahrzeug niemals im Bild erfaßt (es fährt parallel zur Fluglinie). Theoretisch möglich ist, daß sich ein Fahrzeug synchron zur Fluglinie bewegt (und in jedem Bild erscheint). Die Wahrscheinlichkeit dafür ist aber wegen des begrenzten Aufnahmebereichs und der geringen Wahrscheinlichkeit identischer Geschwindigkeiten von Flug- und Fahrzeug sehr klein bzw. praktisch Null.
- Ist die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Flug- und Fahrzeug sehr groß, so trifft die Bewegungslinie des Beobachters häufiger Bewegungslinien solcher Fahrzeuge. Im Verhältnis zur tatsächlichen, physikalischen Anwesenheit von Fahrzeugen dieser Geschwindigkeitsklasse auf einem Streckenabschnitt würde die bewegte Beobachtung unverhältnismäßig viele Fahrzeuge dieser Geschwindigkeitsgruppe erfassen.

In Hinflügen, in denen die Geschwindigkeitsdifferenz zu langsamen Fahrzeugen groß ist, werden diese deshalb überrepräsentiert sein. In Rückflügen ist dagegen der Geschwindigkeitsunterschied zu schnellen Fahrzeugen am größten; hier werden schnelle Fahrzeuge überrepräsentiert sein. Aus diesem Grund werden die beiden Beobachtungsarten "Hinflug" und "Rückflug" getrennt untersucht.

Ein weiterer Grund für diese Trennung liegt in der Tatsache, daß in Rück- und Hinflügen selbst bei unveränderten Verkehrsverhältnissen unterschiedlich viele Fahrzeuge angetroffen werden. Dieser Effekt entsteht, weil auch das Flugzeug für jeden Hin- bzw. Rückflug eine gewisse Zeit benötigt und in dieser Zeit einige Fahrzeuge zusätzlich auf die Untersuchungsstrecke auffahren oder sie verlassen. Die während des Hinflugs ausgefahrenen Fahrzeuge werden deshalb *nicht*, die während des Rückflugs neu eingefahrenen Fahrzeuge werden *zusätzlich* zu den momentan vorhandenen Fahrzeugmengen erfaßt.

Auf andere, spezielle Verfahren bewegter Beobachtungen (z.B. die MOVING-OBSERVER-Methode (CHARLESWORTH u. WARDROP, 1954; BLEHER, 1987) oder die FLOATING-CAR-Methode (LEUTZBACH u. EGERT, 1959; WRIGHT, 1973) soll nicht getrennt eingegangen werden. Zum einen handelt es sich bei den dort entwickelten Methoden nur um grundsätzlich ähnliche, aber spezialisierte Formen bewegter Beobachtungen; zum anderen bestimmen die Verfahren häufig nur Mittelwerte (Verkehrsstärke oder mittlere Reisezeit). Der Vollständigkeit wegen sei auch die von FRICKER und TSAY (1985) beschriebene Methode einer bewegten Beobachtung erwähnt, in der nur die Zahl der (aktiven oder passiven) Überholungen eines Beobachters registriert und daraus eine Geschwindigkeitsverteilung bestimmt wird.

Prinzipiell gelten die hier getroffenen Aussagen auch für die genannten Verfahren. In Abschnitt 5.4.3 wird zusätzlich gezeigt, daß die Ergebnisse von Beobachtungen im Hin- oder Rückflug mit Meßwerten übereinstimmen, die nach der MOVING-OBSERVER-Methode (CHARLESWORTH, 1954) berechnet wurden.

4.3.1 Bewegte Beobachtung im Hinflug

Im Hinflug ist die Geschwindigkeit des Beobachters innerhalb des betrachteten Bezugssystems positiv. Die Größe der Fluggeschwindigkeit kann dabei weitgehend frei gewählt werden. Da Flugzeuge zur Erhaltung des notwendigen Auftriebs eine Mindestgeschwindigkeit (v_F^{min} , minimum critical speed) einhalten müssen, wird die Fluggeschwindigkeit in den meisten Fällen größer als die anzutreffende Geschwindigkeit der beobachteten Fahrzeuge sein. Das bedeutet, daß im Hinflug langsame Fahrzeuge häufiger angetroffen werden als schnelle. Langsame Fahrzeugklassen werden deshalb überbewertet (im Vergleich zur momentan vorhandenen Situation).

Zunächst kann selbstverständlich auch für die bewegte Beobachtung eine mittlere beobachtete Geschwindigkeit \bar{v}_{bew} , eine Geschwindigkeitsverteilung $g_{bew}(v)$ sowie eine Varianz σ_{bew}^2 (Varianz der Stichprobe: s_{bew}^2) wie gewohnt berechnet werden.

Bereits HAIGHT (1963) beschrieb den funktionalen Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeitsverteilungen der bewegten, momentanen und lokalen Beobachtungsform unter gewissen Randbedingungen. Nach LEUTZBACH (1972) entspricht bei einer konstanten Fluggeschwindigkeit v_F die Wahrscheinlichkeit für das Beobachten einer Geschwindigkeit v im Hinflug dem Wert:

$$g_{bew}(v/v_F) = \frac{(v_F - v) \cdot g_m(v)}{\bar{v}_m - v_F + 2 \cdot \sum_0^{v_F} (v_F - v) \cdot g_m(v)} \quad (18)$$

Das Auflösen der Klammer im Nenner ergibt:

$$g_{bew}(v/v_F) = \frac{(v_F - v) \cdot g_m(v)}{\bar{v}_m - v_F + 2 \cdot v_F \cdot \sum_0^{v_F} g_m(v) - 2 \cdot \sum_0^{v_F} v \cdot g_m(v)}$$

Die Fluggeschwindigkeit kann sicher so gewählt werden, daß sie größer als jede Fahrzeuggeschwindigkeit ist ($v_F = 50 - 60 \text{ m/s}$). Damit gilt:

$$v_F > v_i \quad \text{für alle Fahrzeuge "i"}$$

$$\begin{aligned} \text{Es ergibt sich : } g_{bew}(v/v_F) &= \frac{(v_F - v) \cdot g_m(v)}{\bar{v}_m - v_F + 2 \cdot v_F \cdot 1 - 2 \cdot \bar{v}_m} \\ &= \frac{(v_F - v)}{(v_F - \bar{v}_m)} \cdot g_m(v) \end{aligned} \quad (19)$$

Die Analogie zu (9) kann nicht überraschen; in (19) werden lediglich anstelle der absoluten Geschwindigkeiten v und \bar{v} die Geschwindigkeiten relativ zur Fluggeschwindigkeit ($(v_F - v)$ bzw. $(v_F - \bar{v}_m)$) eingesetzt.

Für die mittlere beobachtete Geschwindigkeit gilt:

$$\bar{v}_{bew} = \sum_v v \cdot g_{bew}(v) = v_F \cdot \sum_v \frac{v \cdot g_m(v)}{v_F - \bar{v}_m} - \sum_v \frac{v^2 \cdot g_m(v)}{v_F - \bar{v}_m} \quad (20)$$

$$\text{Mit } \sum_v v^2 \cdot g_m(v) = E_m(v^2) = \sigma_m^2 + \bar{v}_m^2$$

$$\begin{aligned} \text{folgt: } \bar{v}_{bew} &= \frac{v_F \cdot \bar{v}_m - \sigma_m^2 - \bar{v}_m^2}{v_F - \bar{v}_m} \\ &= \bar{v}_m \cdot \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F - \bar{v}_m} - \frac{\sigma_m^2}{v_F - \bar{v}_m} \end{aligned}$$

oder gekürzt, in Analogie zu (10):

$$\bar{v}_{bew} = \bar{v}_m - \frac{\sigma_m^2}{v_F - \bar{v}_m} \quad (21)$$

Die bestimmte mittlere beobachtete Geschwindigkeit des Hinflugs ist also niemals größer als die mittlere momentane Geschwindigkeit. Der Unterschied beträgt:

$$-\frac{\sigma_m^2}{v_F - \bar{v}_m}$$

Wieder stellt sich die Frage, wie \bar{v}_m aus \bar{v}_{bew} errechnet werden kann:

$$g_m(v) = g_{bew}(v) \cdot \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F - v} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_m &= \sum_v v \cdot g_m(v) = (v_F - \bar{v}_m) \cdot \sum_v \frac{v \cdot g_{bew}(v)}{v_F - v} \\ \bar{v}_m + \bar{v}_m \cdot \sum_v \frac{v \cdot g_{bew}(v)}{v_F - v} &= v_F \cdot \sum_v \frac{v \cdot g_{bew}(v)}{v_F - v} \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$\bar{v}_m = \frac{v_F \cdot \sum_v \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)}{1 + \sum_v \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)} \quad (23)$$

Auf der rechten Seite der Gleichung stehen nur Parameter der bewegten Beobachtung; damit ist die mittlere momentane Geschwindigkeit bekannt. Es ist nun

ebenfalls möglich, aus der bewegten die momentane Geschwindigkeitsverteilung für jede einzelne Geschwindigkeitsklasse "v" zu errechnen:

$$g_m(v) = \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v) \quad (24)$$

Bei der dabei notwendigen Verwendung von (23) muß allerdings berücksichtigt werden, daß der (diskreten) beobachteten Geschwindigkeitsverteilung in aller Regel eine Klasseneinteilung zugrunde liegt. In den Umrechnungsprozeß nach (24) werden diese Geschwindigkeitsklassen "v" mit ihrem Mittelwert eingehen, während die Klassen selbst häufig "unbalanciert" besetzt sein werden. Liegen dagegen sämtliche Einzelfahrzeugdaten vor, so kann diese Abweichung vermieden werden. In diesem Fall ergibt sich für die Beobachtung von "h" Fahrzeugen im Hinflug:

$$\bar{v}_m = \frac{v_F \cdot \sum_{i=1}^h \frac{v_i}{v_F - v_i} \cdot \frac{1}{h}}{1 + \sum_{i=1}^h \frac{v_i}{v_F - v_i} \cdot \frac{1}{h}} \quad (25)$$

Jede Fahrzeuggeschwindigkeit wird also nach einer entsprechenden Gewichtung mit dem gleichen Anteil ($\frac{1}{h}$) in die Beziehung zur Berechnung von \bar{v}_m eingehen. Vereinfacht bedeutet dies:

$$\bar{v}_m = \frac{v_F \cdot \sum_{i=1}^h \frac{v_i}{v_F - v_i}}{h + \sum_{i=1}^h \frac{v_i}{v_F - v_i}} \quad (26)$$

Die sich nach (26) ergebende mittlere momentane Geschwindigkeit ist, sofern Einzelfahrzeugdaten vorliegen, exakter als der nach (23) bestimmte Wert, weil der Informationsverlust durch die Klasseneinteilung vermieden wird.

Für die Varianz der auf dem Hinflug gemessenen Geschwindigkeiten gilt dann:

$$\sigma_{bew}^2 = \sum v^2 \cdot \frac{v_F - v}{v_F - \bar{v}_m} \cdot g_m(v) - [\bar{v}_m + \frac{\sigma_m^2}{\bar{v}_m - v_F}]^2 \quad (27)$$

Nach dem Verfahren, das zu (16) führte, wird daraus:

$$\sigma_{bew}^2 = \sigma_m^2 - \frac{\sigma_m^4}{(v_F - \bar{v}_m)^2} - \frac{E_m(v - \bar{v}_m)^3}{v_F - \bar{v}_m} \quad (28)$$

(analog für die Varianz der betrachteten Stichprobe)

Damit sind alle vergleichbaren Werte berechenbar. Auch hier ist es also möglich, aus den beobachteten (bewegten) Geschwindigkeiten direkt die vergleichbaren momentanen Werte zu bestimmen und umgekehrt. Basierend auf den momentanen Größen können in einem weiteren Schritt selbstverständlich auch die entsprechenden lokalen oder räumlich-zeitlichen Parameter errechnet werden.

4.3.2 Bewegte Beobachtung im Rückflug

Im Gegensatz zur Beobachtung auf dem Hinflug ist im Rückflug die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Flugzeug und dem schnellsten Fahrzeug am größten. Dies ist darauf zurückzuführen, daß v_F^B im gewählten Bezugssystem negativ wird. Dadurch werden im Rückflug prinzipiell schnelle Fahrzeugklassen über-, langsamere Fahrzeuge unterrepräsentiert. Bei Rückflügen ergibt sich damit eine qualitativ ähnliche Tendenz wie bei lokalen Beobachtungen.

Ausgehend von (18) ist die Wahrscheinlichkeit für das Beobachten einer Geschwindigkeit v im Rückflug ($v_F < 0$):

$$g_{bew}(v/v_F) = \frac{v - v_F}{\bar{v}_m - v_F} \cdot g_m(v) \quad (29)$$

Auch die mathematische Form spiegelt die Ähnlichkeit zur lokalen Beobachtung (s. Abschnitt 4.2) wider. Der Unterschied zwischen (29) und (9) besteht lediglich in der Verwendung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Flug- und Fahrzeugen. Schnelle Fahrzeuge werden häufiger erfaßt.

Die mittlere beobachtete Geschwindigkeit beträgt dann für einen Rückflug:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{bew} &= \sum_v v \cdot g_{bew}(v/v_F) = \sum_v v \cdot \frac{v - v_F}{\bar{v}_m - v_F} \cdot g_m(v) \\ &= \sum \frac{v^2}{\bar{v}_m - v_F} \cdot g_m(v) - v_F \cdot \sum \frac{v}{\bar{v}_m - v_F} \cdot g_m(v) \\ &= \frac{1}{\bar{v}_m - v_F} \cdot \left[\sum_v v^2 \cdot g_m(v) - v_F \cdot \sum_v v \cdot g_m(v) \right] \\ &= \frac{1}{\bar{v}_m - v_F} \cdot [\sigma_m^2 + \bar{v}_m^2 - v_F \cdot \bar{v}_m] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\bar{v}_m}{\bar{v}_m - v_F} (\bar{v}_m - v_F) + \frac{\sigma_m^2}{\bar{v}_m - v_F} \\
&= \bar{v}_m + \frac{\sigma_m^2}{\bar{v}_m - v_F} \tag{30}
\end{aligned}$$

Die während des Rückflugs beobachtete mittlere Geschwindigkeit ist damit niemals kleiner als die mittlere momentane Geschwindigkeit, da der Bruch nicht negativ werden kann. Bringt man (30) in die Form von Gleichung (21), so folgt:

$$\bar{v}_{bew} = \bar{v}_m - \frac{\sigma_m^2}{v_F - \bar{v}_m} \quad (v_F < 0) \tag{31}$$

Die Gleichungen (30), (31) und (21) sind damit identisch. Für die Hin- und die Rückflüge gelten dieselben mathematischen Beziehungen. Unterschiede ergeben sich bei der absoluten Größe der Abweichungen von der mittleren momentanen Geschwindigkeit. Der Unterschied zur momentanen Beobachtung beträgt beim Hinflug:

$$-\frac{\sigma_m^2}{|v_F| - \bar{v}_m} \quad (\text{da } v_F = |v_F| > 0) \tag{32}$$

und beim Rückflug (siehe (30)):

$$+\frac{\sigma_m^2}{|v_F| + \bar{v}_m} \quad (\text{da } -v_F = |v_F| > 0) \tag{33}$$

Damit ist die absolute Differenz zwischen der momentanen Messung und der Beobachtung auf dem Hinflug (siehe (21)) größer als die Differenz zwischen der momentanen Messung und der Beobachtung auf dem Rückflug ((30) und (31)). Dies ist von Bedeutung, weil Hinflüge leichter und genauer ausgewertet werden können. Sie werden auch in der Praxis häufiger verwendet als Rückflüge.

Zur direkten Umrechnung der beobachteten Kenngrößen muß \bar{v}_m bekannt sein:

$$\begin{aligned}
\bar{v}_m &= \sum_v v \cdot g_m(v) = \sum_v v \cdot g_{bew}(v) \cdot \frac{\bar{v}_m - v_F}{v - v_F} \\
&= \bar{v}_m \cdot \sum \frac{v}{v - v_F} \cdot g_{bew}(v) - v_F \cdot \sum \frac{v}{v - v_F} \cdot g_{bew}(v)
\end{aligned}$$

Die Auflösung nach \bar{v}_m ergibt:

$$\bar{v}_m = \frac{v_F \cdot \sum_v \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)}{1 + \sum_v \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)} \quad (34)$$

(34) und (23) sind ebenfalls identisch; für beide Flugrichtungen ergeben sich dieselben mathematischen Beziehungen.

Im Rückflug tritt die schon in 4.3.1 diskutierte Ungenauigkeit bei Verwendung relativ grober Klasseneinteilungen für die (diskrete) Geschwindigkeitsverteilung ebenfalls auf. Liegen die tatsächlichen Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten vor, so sollte deshalb die mittlere momentane Geschwindigkeit entsprechend (26) bestimmt werden. Dadurch ergeben sich exakte Werte.

Damit kann aus der bewegten Beobachtung im Rückflug die momentane Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bestimmter Geschwindigkeiten bestimmt werden:

$$g_m(v) = \frac{\bar{v}_m - v_F}{v - v_F} \cdot g_{bew}(v) \quad (35)$$

Alle Größen der rechten Seite sind aus der bewegten Beobachtung bestimmt. Die Varianz der im Rückflug erfaßten Geschwindigkeiten wird gemäß (16) und (28) zu:

$$\begin{aligned} \sigma_{bew}^2 &= \sum_v v^2 \cdot g_{bew}(v) - \bar{v}_{bew}^2 \\ &= \sum_v v^2 \cdot \frac{v - v_F}{\bar{v}_m - v_F} \cdot g_m(v) - \left[\bar{v}_m - \frac{\sigma_m^2}{v_F - \bar{v}_m} \right]^2 \\ &= \sum_v \frac{v^2 \cdot v}{\bar{v}_m - v_F} \cdot g_m(v) - v_F \cdot \sum_v \frac{v^2}{\bar{v}_m - v_F} \cdot g_m(v) \\ &\quad - \bar{v}_m^2 + \frac{2 \cdot \bar{v}_m \sigma_m^2}{v_F - \bar{v}_m} - \frac{\sigma_m^4}{(v_F - \bar{v}_m)^2} \end{aligned}$$

Zusammengefaßt ergibt sich (analog für s^2):

$$\sigma_{bew}^2 = \sigma_m^2 - \frac{\sigma_m^4}{(v_F - \bar{v}_m)^2} - \frac{E(v - \bar{v}_m)^3}{v_F - \bar{v}_m} \quad (36)$$

Dies bedeutet, daß alle vom Flugzeug aus beobachteten Geschwindigkeiten in momentane (und damit auch alle anderen) Verteilungen umgerechnet werden können und umgekehrt, falls $v_F > v_i^{max}$ oder $v_F < 0$.

Ein Vergleich zwischen den in Abschnitt 4.3.1 bzw. 4.3.2 bestimmten Abhängigkeiten zeigt, daß die entwickelten Formeln für Hin- und Rückflug in allen Punkten übereinstimmen. Dies ist auf die Interpretation des Rückflugs als Hinflug in negativer Geschwindigkeit zurückzuführen. Häufig anzutreffende Unterschiede in Berechnungen für Hin- und Rückflüge werden damit hinfällig; beide Formen der bewegten Beobachtung besitzen dieselben Eigenschaften.

Insgesamt ergeben sich damit relativ einfache Beziehungen. Entsprechende Parameter anderer Beobachtungsarten können – unter den getroffenen Annahmen – problemlos aus bewegten Beobachtungen berechnet werden. Die entwickelten Beziehungen erlauben die Elimination der systematischen Unterschiede, die sich sonst in verzerrten Geschwindigkeitsparametern niederschlagen würden.

4.4 Räumlich-zeitliche Beobachtungen

Die räumlich-zeitliche Beobachtung kann als allgemeinste Form aller Beobachtungsarten betrachtet werden. Jeder räumlich-zeitlichen Beobachtung liegt ein exakt definierter Zeit-Weg-Bereich zugrunde. In der Beobachtungsstichprobe werden alle Fahrzeuge erfaßt, die diesen Bereich (Abb. 2) ganz oder teilweise durchfahren.

Die räumlich-zeitliche Beobachtung dient in der Praxis vor allem zum Vergleich der Situation in verschiedenen Zeit-Weg-Bereichen. Durch die größere Ausdehnung der "Beobachtungsfläche" sind in ihr z.B. auch die Auswirkungen unterschiedlicher – räumlich und/oder zeitlich wirkender – Verkehrsphänomene erfaßbar.

4.4.1 Beschreibung der räumlich-zeitlichen Beobachtung

Voraussetzung für die Erhebung räumlich-zeitlicher Beobachtungswerte ist zunächst die Festlegung zeitlicher und räumlicher Meßgrenzen. Durch diese Definition muß eine feste, abgeschlossene Fläche der Zeit-Weg-Ebene eingegrenzt werden. Ist in der Zeit-Weg-Ebene eine solche Fläche definiert, so werden für diese Fläche "A" die räumlich-zeitlichen Mittelwerte wie folgt bestimmt (siehe z.B. COERS, 1970 oder LEUTZBACH, 1972):

Berücksichtigt werden alle "n" Fahrzeuge, die den Zeit-Weg-Bereich A ganz oder teilweise durchfahren. Für jedes beobachtete Fahrzeug "i" ist die in A zurückgelegte Strecke Δx_i und die dafür benötigte Verweilzeit Δt_i (s. Def. 13) zu messen. Es gilt:

$$k_{RZ} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{A} \quad [\text{Fz/km}] \text{ oder } [\text{Fz/m}] \quad (37)$$

$$q_{RZ} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{A} \quad [\text{Fz/h}] \text{ oder } [\text{Fz/s}] \quad (38)$$

$$\bar{v}_{RZ} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad [\text{km/h}] \text{ oder } [\text{m/s}] \quad (39)$$

Die Fläche "A" besitzt in der Regel die Form eines Rechtecks mit den Seitenlängen "X" (Streckenlänge) und "T" (Beobachtungsdauer): $A = X \cdot T$.

Die Bestimmung der in "A" zurückgelegten Strecken und der dafür benötigten Verweilzeiten erfolgt häufig so, daß die eigentlichen Beobachtungen nur an den Grenzen der Beobachtungsfläche durchgeführt werden. In der Praxis werden häufig zwei lokale (am Streckenbeginn und -ende) und zwei momentane Beobachtungen (am Anfangs- und Endzeitpunkt der Beobachtung) kombiniert.

Aus der Beobachtung an den Begrenzungslinien der Zeit-Weg-Fläche sind allerdings keine Informationen über das Verhalten der Fahrzeuge im Innern der Fläche zu erhalten: Damit sind auch zunächst die fahrzeugindividuellen Parameter Δx_i und Δt_i unbekannt, da nicht feststellbar ist, welches der ausfahrenden Fahrzeuge einem einfahrenden entspricht. Es ist aber möglich, aus allen Ein- und Ausfahrzeiten bzw. allen Ein- und Ausfahrorten (beobachtet an den Grenzen der Beobachtungsfläche) die von allen Fahrzeugen insgesamt in "A" zurückgelegte Entfernung sowie die dafür benötigte Zeit zu berechnen. Die Bestimmung der von jedem Fahrzeug in der Zeit-Weg-Fläche zurückgelegten individuellen Fahrstrecke Δx_i und der dazugehörigen Verweilzeit Δt_i ist dazu nicht notwendig (LEUTZBACH, 1972):

Da:

$$\Delta x_i = x_i^{Aus} - x_i^{Ein}$$

folgt:

$$\sum_i \Delta x_i = \sum_i (x_i^{Aus} - x_i^{Ein}) = \left(\sum_i x_i^{Aus} \right) - \left(\sum_i x_i^{Ein} \right)$$

Die Summe aller "Ausfahrorte" abzüglich der Summe aller "Einfahrorte" entspricht der in "A" zurückgelegten Summe aller Fahrstrecken. Dies gilt auch für die Summe der Verweilzeiten Δt_i . Damit sind die räumlich-zeitlichen Größen nach (37) bis (39) bestimmbar.

Wie werden nun aus einer bewegten Beobachtung räumlich-zeitliche Größen bestimmt? Dazu muß zunächst geklärt werden, wie aus Befliegungen eine abgeschlossene Grundfläche der Zeit-Weg-Ebene definiert werden kann.

Eine solche Fläche der Zeit-Weg-Ebene muß abgeschlossen und durch zwei stetige Funktionen beschreibbar sein. Die Bewegungslinie des Flugzeugs stellt eine Funktion über die Zeit dar: Da keine Bewegung "zeitlich rückwärts" möglich ist, kann durch ein Flugzeug nur eine "Grenzlinie" für die Beobachtungsfläche vorgegeben werden. Für die Definition der Beobachtungsfläche "A" muß deshalb eine zweite Grenzlinie (Funktion 2) gefunden werden. Die Problematik wird in Abb. 6 erläutert.

Im folgenden werden deshalb Möglichkeiten zur Festlegung räumlich-zeitlicher Beobachtungsbereiche (und dabei insbesondere zur Definition einer zweiten Begrenzungslinie) aus bewegten Beobachtungen untersucht. Zur Begrenzung der Beobachtungsfläche A bieten sich prinzipiell die drei Möglichkeiten an, die in den Kapiteln 4.4.2 bis 4.4.4 beschrieben werden.

4.4.2 Verwendung eines zusätzlichen Beobachters

Beobachtungen erfolgen in diesem Fall entlang den Bewegungslinien zweier Beobachtungsfahrzeuge, ggf. auch zweier Beobachtungsflugzeuge oder eines Fahr- und eines Flugzeugs. Dabei müssen die beiden Beobachtungsreihen wechselseitig koordiniert werden; dies kann etwa so erfolgen, daß sich die Beobachter am Streckenbeginn und am Streckenende begegnen, dazwischen aber möglichst "entfernt" (zeitlich und räumlich) voneinander die Strecke durchfahren. Folgendes Vorgehen wäre möglich:

- Zwei Beobachter treffen sich zur Zeit t_A am Punkt x_A . Ein Fahrzeug/Flugzeug durchfährt die Untersuchungsstrecke X und hält am Streckenende x_E zur Zeit t_1 . Zum Zeitpunkt t_2 startet das zweite Fahr-/Flugzeug am Ort x_A und durchfährt ebenfalls die Strecke X ; es erreicht den Endpunkt x_E zur Zeit t_E . Damit ergibt sich die in Abb. 7 dargestellte räumlich-zeitliche Beobachtungsfläche.

Dieses Verfahren ist aufwendig und teuer (zwei Kameras, zwei Beobachter); auch werden sich in der Praxis Koordinierungsprobleme einstellen. Für die hier un-

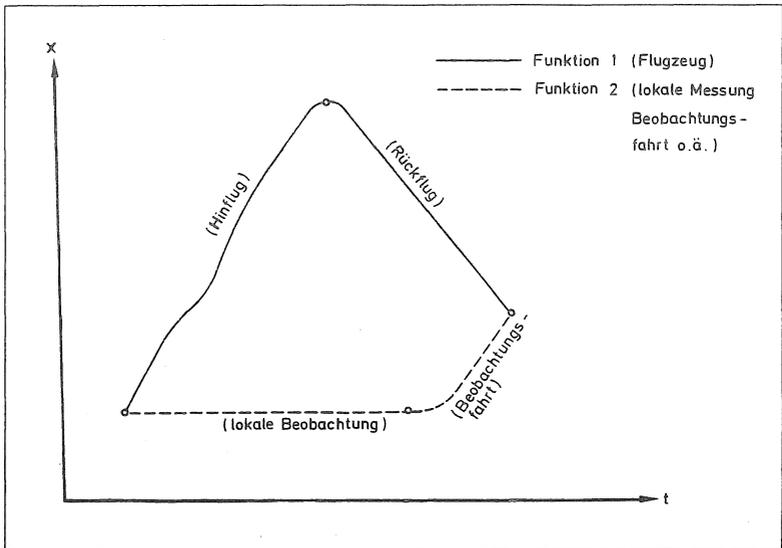


Abbildung 6:

Festlegung einer begrenzten "Zeit-Weg"-Fläche durch zwei stetige Funktionen $x = f(t)$

tersuchte Erfassung in Luftbildern ist das Verfahren deshalb nicht einsetzbar, weil Flugzeuge nicht an einer Stelle der Untersuchungsstrecke verharren ("warten") können. In diesem Fall wären Hubschrauber notwendig, deren Kosten ungleich höher liegen. Dagegen ist der Ansatz besser durchführbar, wenn Beobachtungsfahrzeuge verwendet werden. Hier sind jedoch die üblichen Nachteile (Störungen anderer Verkehrsteilnehmer, Auswirkungen von Verkehrsstörungen auf das Beobachtungsfahrzeug, Zeitverluste beim Wenden, usw.) zu erwarten.

In der vorliegenden Arbeit wird dieser Ansatz deshalb nicht weiterverfolgt.

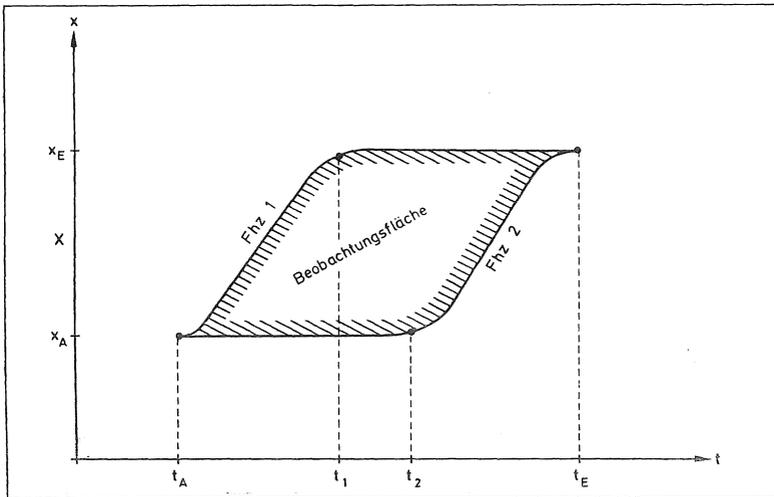


Abbildung 7:

Definition einer Beobachtungsfläche durch die Fahrlinien zweier Beobachtungsfahrflugzeuge

4.4.3 Einführung einer zusätzlichen lokalen Beobachtung

Neben der bewegten Beobachtung vom Flugzeug aus kann auch eine lokale Beobachtung am Beginn (oder – falls verfügbar – am Ende) der zu beobachtenden Strecke zur Begrenzung der Zeit-Weg-Fläche verwendet werden. Aus Hin- und Rückflug sowie der lokalen Messung wird eine räumlich-zeitliche Dreiecksfläche exakt beschrieben (s. Abb. 8).

In Abb. 4 erfolgt eine lokale Beobachtung am Beginn der Strecke; ohne Beschränkung der Allgemeinheit wäre dies auch am Streckenende möglich. Zur möglichst vollständigen Verkehrserfassung wären lokale Beobachtungen sowohl am Streckenanfang als auch am Streckenende wünschenswert; der Verkehrsablauf könnte dann vollständig aufgezeichnet werden. Zwei zusätzliche lokale Messungen erhöhen den Aufwand aber bereits beträchtlich. Neben der Notwendigkeit zusätzlicher lokaler Messungen sind als Nachteile die zwangsläufige Lage der Querschnitte an Streckenbeginn/-ende zu nennen.

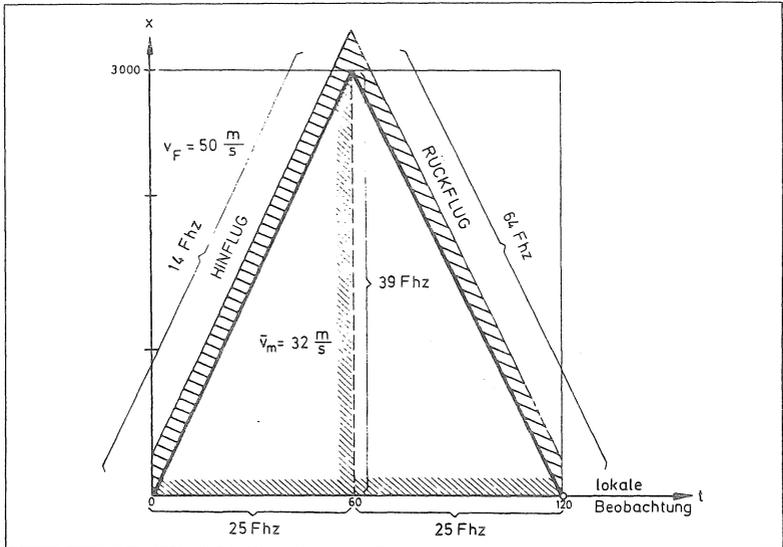


Abbildung 8:
Definition einer Beobachtungsfläche durch Hin- und Rückflug sowie eine lokale Beobachtung

Im praktischen Einsatz wird dieser Nachteil allerdings relativiert:

- Auf einer Vielzahl von Autobahnstrecken oder Schnellstraßen sind bereits Induktionsschleifen installiert, die die benötigten Daten liefern können. Sollten keine Induktionsschleifen verfügbar sein, so kann eine automatische Messung mit einem Radargerät, Druckschläuchen o.ä. erfolgen. In Extremfällen reicht selbst eine einfache Zeitmessung (leicht realisierbar mittels eines sogenannten "Portable Computer") vollkommen aus.

Nach diesem Verfahren würde jeder Meßzyklus als Ergebnis drei Datensätze liefern:

- HIN: - ein Datensatz, der Ort/Zeit der auf dem Hinflug überflogenen Fahrzeuge enthält:

START	t = 10:00	x = 5000
Fz 1	t = 10:00	x = 5008
Fz 2	t = 10:01	x = 5060
:	:	:
Fz h	t = 10:59	x = 7980
ENDE	t = 11:00	x = 8000

- RÜCK: - ein Datensatz, der Ort/Zeit der auf dem Rückflug überflogenen Fahrzeuge enthält:

START	t = 11:00	x = 8000
Fz 1	t = 11:01	x = 7950
Fz 2	t = 11:01	x = 7940
:	:	:
Fz r	t = 11:58	x = 5055
ENDE	t = 12:00	x = 5000

- QUER: - ein Datensatz, der die Überfahrzeitpunkte der Fz am lokalen Querschnitt enthält:

START	t = 10:00	x = 5000
Fz 1	t = 10:03	x = 5000
Fz 2	t = 10:06	x = 5000
:	:	:
Fz M	t = 11:58	x = 5000
ENDE	t = 12:00	x = 5000

Da jedes Fahrzeug, das am Querschnitt oder auf dem Hinflug ($v_F^H > v_i^{max}$) beobachtet wird, auch auf dem Rückflug erfaßt werden muß, erlaubt die Beziehung $M + h = r$ eine erste Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse. Die räumlich-zeitlichen Größen ergeben sich beim Vorgehen nach (b) zu:

$$q_{RZ} = \frac{\sum_{i=1}^r x_i^R - \sum_{i=1}^h x_i^H - M \cdot x_{Anfang}}{F} \quad (40)$$

$$k_{RZ} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i^R - \sum_{i=1}^h t_i^H - \sum_{i=1}^M t_i^Q}{F} \quad (41)$$

$$\bar{v}_{RZ} = \frac{\sum_{i=1}^r x_i^R - \sum_{i=1}^h x_i^H - M \cdot x_{Anfang}}{\sum_{i=1}^r t_i^R - \sum_{i=1}^h t_i^H - \sum_{i=1}^M t_i^Q} \quad (42)$$

Für die Größe F der zeitlich-räumlichen Beobachtungsfläche gilt:

$$F = \frac{1}{2} \cdot (t_{\text{Ende}} - t_{\text{Anfang}}) \cdot (x_{\text{Ende}} - x_{\text{Anfang}}) = \frac{1}{2} \cdot T \cdot X$$

Unabhängig von der gewählten Flugzeuggeschwindigkeit werden bei diesem Vorgehen exakt 50% der gesamten Zeit-Weg-Fläche $A = (X \cdot T)$ als Datengrundlage für die Bestimmung der räumlich-zeitlichen Parameter erfaßt.

Hauptnachteil des geschilderten Verfahrens bleibt die Notwendigkeit der zusätzlichen Messung. Dies bedeutet eine Erhöhung des Aufwands, eine eingeschränkte Verwendbarkeit sowie eine erst nach Beendigung des Fluges mögliche Auswertung. Ist in einem Anwendungsfall ein lokaler Meßquerschnitt bereits vorhanden, so können die dort erhobenen Daten in der beschriebenen Weise verwendet werden. Liegt ein solcher Querschnitt nicht vor, so sollte der folgende Ansatz gewählt werden.

4.4.4 Einführung einer theoretisch definierten Begrenzungslinie

Um die genannten Nachteile zu vermeiden, sollten für die Berechnung räumlich-zeitlicher Parameter aus bewegten Beobachtungen möglichst keine zusätzlichen Fahrzeu-gerfassungen benötigt werden. Dies scheint zunächst – auch aus prinzipiellen Gründen – nicht möglich zu sein. Der folgende Ansatz verwendet eine lediglich theoretisch formulierte Begrenzungslinie zur Festlegung einer räumlich-zeitlichen Beobachtungsfläche, entlang der keine realen Verkehrsbeobachtungen durchgeführt werden müssen. Er beruht auf folgender Überlegung:

Die vom Flugzeug während des Hinflugs beobachteten Fahrzeuge werden sicher auch während des Rückflugs (oder der Wende, s.o.) erfaßt. Dabei muß berücksichtigt werden, daß im Hinflug weniger und im Rückflug mehr Fahrzeuge beobachtet werden, als tatsächlich zu einem bestimmten Zeitpunkt (momentan) auf der Strecke vorhanden sind (s. Abb. 8 und die dort genannten Zahlen beobachteter Fahrzeuge).

Zur Verdeutlichung wird zunächst angenommen, daß sich alle Fahrzeuge mit einer identischen Geschwindigkeit \bar{v} über die Untersuchungsstrecke der Länge X bewegen. In Abb. 9 sind die Bewegungen von Flugzeug und Fahrzeugen dargestellt. Für die dort eingezeichneten Strecken X_1 und X_2 gilt:

$$X_1 = \frac{X}{v_F^H} \cdot \bar{v}_m \quad (43)$$

$$X_2 = \frac{X}{-v_F^R} \cdot \bar{v}_m \quad (44)$$

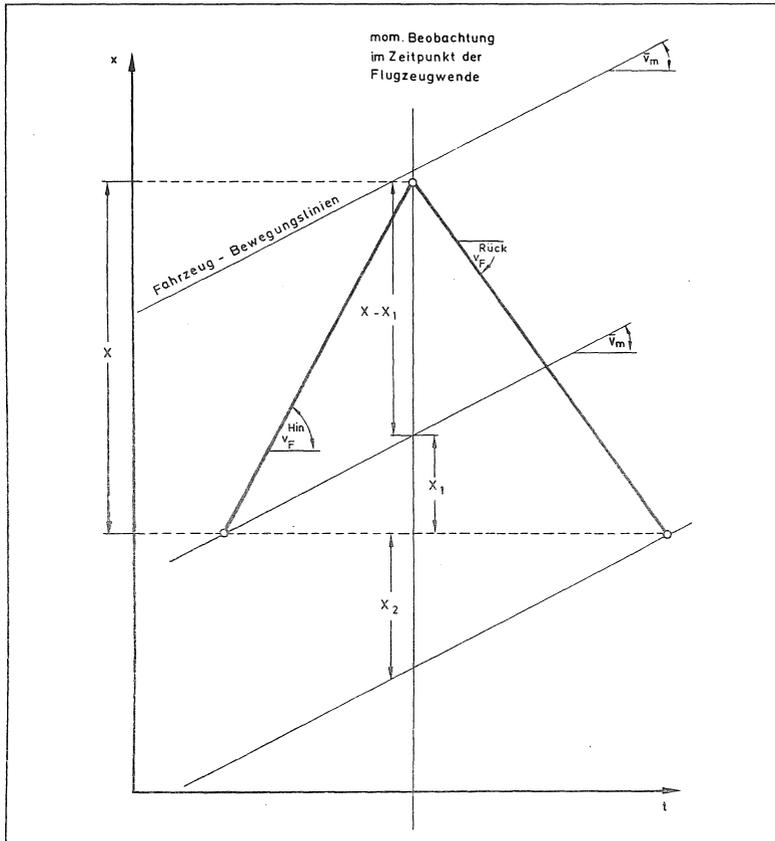


Abbildung 9:
Beobachtung von Fahrzeugen auf einem Hin- und Rückflug zur Bestimmung der Verkehrsdichte

Während des Hinflugs wird zwar die gesamte Strecke X überflogen, aber nur Fahrzeuge, die sich bei momentaner Betrachtung im Zeitpunkt der Wende auf der Strecke $(X - X_1)$ befinden, werden beobachtet. Auf dem Rückflug werden jene Fahrzeuge angetroffen, die sich bei momentaner Betrachtung im Wendezeitpunkt auf den Streckenabschnitten $(X - X_1) + X_1 + X_2 = (X + X_2)$ befinden.

Läßt man die (in der Realität sicher unzutreffende) Annahme einer konstanten Geschwindigkeit \bar{v} aller Fahrzeuge fallen, so stellt sich die Frage, welche mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit die Strecken X_1 bzw. X_2 am besten bestimmt. Da die Beobachtung im Zeitpunkt der Flugzeugwende einer momentanen Beobachtung (Bewegungslinie des momentanen Beobachters parallel zur X -Achse) entspricht, ist zur Bestimmung der Strecken X_1 und X_2 die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m einzusetzen.

- Hauptidee des entwickelten Ansatzes ist nun, als "Begrenzung" die gedachte Zeit-Weg-Linie eines bei Beginn des Hinflugs in den Streckenabschnitt einfahrenden imaginären Fahrzeugs (bei mittlerer momentaner Geschwindigkeit \bar{v}_m) zu verwenden.

Zur Grundlage der Meßauswertung werden damit alle "h" auf dem Hinflug beobachteten Fahrzeuge sowie die ersten "h" Fahrzeuge, die auf dem Rückflug erfaßt werden; alle anderen Fahrzeuge werden vernachlässigt. Aus Einfahrzeit/-ort und Ausfahrzeit/-ort lassen sich unter Verwendung von (37) bis (39) die charakteristischen Größen q , k , \bar{v}_{RZ} ermitteln.

Dies bedeutet, daß nur die in Abb. 11 schraffiert eingezeichnete Fläche "beobachtbar" ist. Es wird quasi impliziert, daß ein imaginäres Beobachtungsfahrzeug zum Zeitpunkt des Flugbeginns mit der Geschwindigkeit \bar{v}_m am Streckenbeginn losfährt. Die "Fahrlinie" dieses Fahrzeugs stellt dann die zweite Begrenzungslinie der Zeit-Weg-Fläche dar – allerdings können keine Messungen von diesem "imaginären Beobachtungsfahrzeug" aus erfolgen. Informationen über Fahrzeuge, die die so definierte zweite Begrenzungslinie schneiden, stehen dem Verfahren also nicht zur Verfügung. Der Nachteil einer solchen Vorgehensweise relativiert sich bei einer Verwendung in der Praxis aus zwei Gründen:

- (a) Entlang der so definierten Begrenzungslinie fahren nur Fahrzeuge, die das imaginäre Fahrzeug überholen oder von ihm überholt werden, in den Zeit-Weg-Bereich ein oder aus. Im Vergleich zu allen anderen Begrenzungslinien ist diese Zahl von Fahrzeugen für die Linie des mit mittlerer Geschwindigkeit fahrenden imaginären Fahrzeugs minimal.
- (b) Die mittlere Geschwindigkeit für das imaginäre Fahrzeug ergibt sich dadurch, daß im Rückflug nur so viele Fahrzeuge wie im Hinflug berücksichtigt werden. Zusätzliche Fahrzeuge können das imaginäre Fahrzeug

überholen und in den T-X-Bereich einfahren ohne das Meßergebnis zu beeinflussen, wenn sie kein zweites reales Fahrzeug überholen.

Allerdings ist es möglich, daß trotz der Betrachtung gleichgroßer Fahrzeugmengen verschiedene Einzelfahrzeuge berücksichtigt werden. Die dabei auftretenden Situationen sind in Abb. 10 dargestellt.

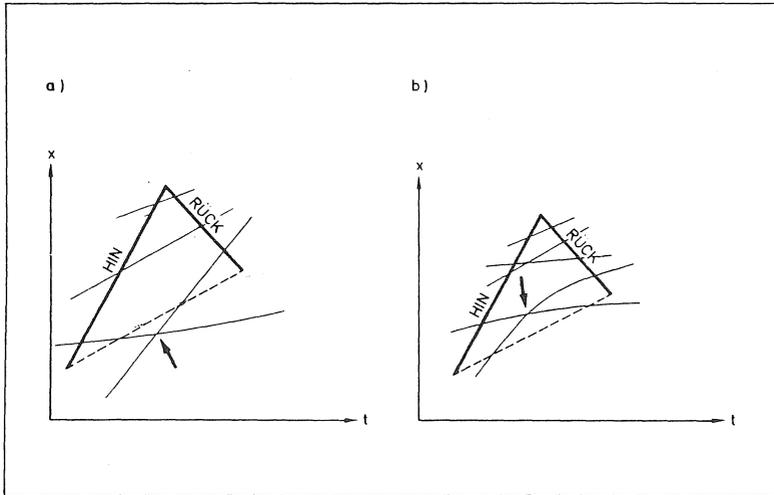


Abbildung 10:
Grundsituation der Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrzeuge trotz Verwendung gleichgroßer Fahrzeugmengen

In Abb. 10 a) überholen sich zwei erfaßte Fahrzeuge außerhalb der T-X-Fläche. Hier werden $\sum \Delta t_i$ und $\sum \Delta x_i$ vergleichsweise zu groß, in Fall 10 b) (Überholen innerhalb der Fläche) zu klein bestimmt. Dadurch ergibt sich ein Verfahrensfehler, der innerhalb des Ansatzes nicht korrigiert werden kann.

Allerdings sind die in 10 a) und 10 b) dargestellten Fälle einerseits im Vergleich zur gesamten Beobachtungsfläche vernachlässigbar selten, andererseits treten sie zufallsverteilt auf. Da sich die Effekte der beiden Fälle zudem gegenseitig kompensieren, wird der zu erwartende Fehler nochmals kleiner.

Werden die auf diese Weise ermittelten "gesamten Wegstrecken" und "gesamten

Fahrzeiten” zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit verwendet, so werden auch dadurch die Unterschiede weiter verkleinert. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sowohl $\sum(\Delta t_i)$ als auch $\sum(\Delta x_i)$ entweder “beide zu groß” oder “beide zu klein” bestimmt werden – durch die Division bei der Berechnung der Geschwindigkeiten wird der Verfahrensfehler also ebenfalls kleiner.

Bei den mit Simulationsdaten und Daten realer Befliegungen durchgeführten Tests und Fehlerschätzungen ergaben sich bei allen Verkehrszuständen (Stau mit $\bar{v}_{RZ} < 4m/s$, teilgebundener und freier Verkehr) größere Fehler durch die Probleme bei der Bildaufnahme und der Bestimmung der verkehrlichen Grundgrößen als durch die Vernachlässigung der auf diese Weise unbemerkt in die Beobachtungsfläche ein- oder ausfahrenden Fahrzeuge. Damit scheint der Ansatz für die Verwendung in der Praxis geeignet zu sein.

Das geschilderte Vorgehen benötigt damit keine Meßdaten aus einer zweiten, realen Beobachtung. Wie groß ist nun aber die Beobachtungsfläche bzw. ihr Anteil an der gesamten Zeit-Weg-Fläche?

Erster Einflußfaktor auf die Größe des Beobachtungsbereichs ist die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit: Ist die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit klein, so nähert sich der Anteil der Beobachtungsfläche der in 4.4.3 beschriebenen 50%-Grenze. Ist \bar{v}_m dagegen sehr groß und nähert sich die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit der Geschwindigkeit des Flugzeugs auf dem Hinflug, so geht der Anteil der Beobachtungsfläche an der Gesamtfläche gegen Null. Allerdings ist die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit nicht beeinflussbar; beeinflussbar ist lediglich die Geschwindigkeit des Flugzeugs (v_F^H bzw. v_F^R), die als zweiter Einflußfaktor relevant wird. Hin- und Rückfluggeschwindigkeit gehen dabei in unterschiedlichem Maße in die Formel zur Bestimmung der Beobachtungsfläche ein. Abb. 11 erläutert die Einflußfaktoren auf die Größe der beobachtbaren Zeit-Weg-Fläche (schraffiert).

Das Flugzeug fliegt zur Zeit $t = 0$ am Beginn der Untersuchungsstrecke los; die Fluggeschwindigkeit betrage konstant v_F^H . Zur Zeit t_1 wendet das Flugzeug am Ende der Strecke und fliegt mit konstant v_F^R ($v_F^R < 0$) zurück. Der Ausgangspunkt wird zur Zeit t_2 erreicht.

Die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf dem Streckenabschnitt sei \bar{v}_m . Ein Fahrzeug, das ebenfalls bei $t = 0$ losfährt, wird vom Flugzeug zum Zeitpunkt t_3 auf dem Rückflug erfaßt. Die bei dem entwickelten Ansatz insgesamt beobachtbare Zeit-Weg-Fläche kann durch die Punkte $P_0(0/0)$, $P_1(t_1, x)$ und $P_3(t_3, t_3 \cdot \bar{v}_m)$ festgelegt werden.

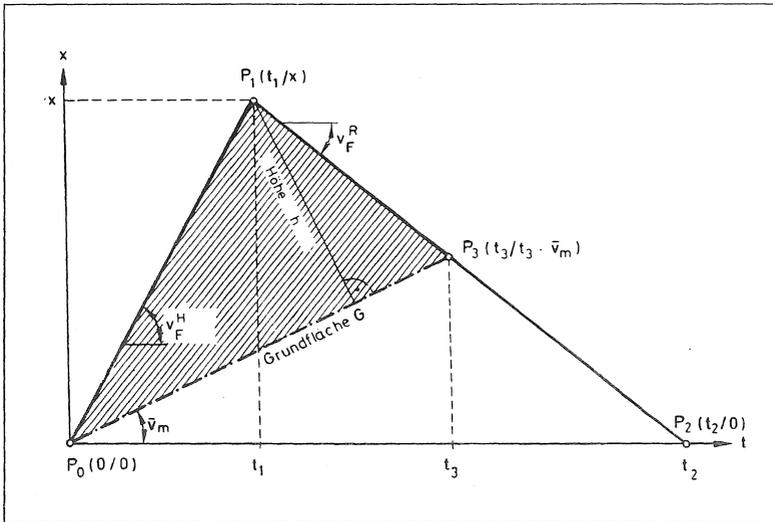


Abbildung 11:
Einfluß von v_F^H und v_F^R auf die Größe der beobachtbaren Zeit-Weg-Fläche

Der überwachte Zeit-Weg-Bereich beträgt damit:

$$F = \frac{X^2 \cdot (v_F^H - v_F^R) \cdot (v_F^H - \bar{v}_m)}{2 \cdot v_F^{H^2} \cdot (\bar{v}_m - v_F^R)} \quad (45)$$

Wichtig ist nicht allein die absolute Größe der Zeit-Weg-Fläche, sondern vor allem der Anteil des beobachteten Bereichs am gesamten Untersuchungsbereich A. Dieser beobachtete Anteil beträgt:

$$\frac{F}{A} = \frac{(-v_F^R) \cdot (v_F^H - \bar{v}_m)}{2 \cdot v_F^H \cdot (\bar{v}_m - v_F^R)} \quad (v_F^R < 0) \quad (46)$$

Dabei gilt für die Größe des Untersuchungsbereichs A:

$$A = X \cdot T = X^2 \left(\frac{v_F^H - v_F^R}{-v_F^R \cdot v_F^H} \right) \quad (47)$$

Der beobachtete Anteil wird größer, wenn die Geschwindigkeit des Flugzeugs zunimmt (gleichgültig, ob auf dem Hin- oder Rückflug). Wie aus den ersten Ableitungen der Funktion ersichtlich wird, wächst dabei der beobachtete Anteil der Zeit-Weg-Fläche bei einer Erhöhung der (absoluten) Hinflugsgeschwindigkeit stärker als bei einer gleichgroßen absoluten Geschwindigkeitszunahme im Rückflug. Die Auswirkungen einer Geschwindigkeitserhöhung von v_F^H und v_F^R sind gleich, wenn gilt:

$$v_F^H = \bar{v}_m - v_F^R \quad (v_F^R < 0) \quad (48)$$

Das bedeutet für eine möglichst vollständige Erfassung:

- Die Fluggeschwindigkeiten sind so groß wie möglich zu wählen; auf dem Rückflug aber sollen sie betragsmäßig um die mittlere momentane Fahrzeuggeschwindigkeit kleiner sein als auf dem Hinflug.

Begrenzt wird die Funktion und damit der Anteil der beobachteten Zeit-Weg-Fläche nur durch die Maximalgeschwindigkeit des Flugzeugs; für sehr große Geschwindigkeiten nähert sie sich der 50%-Grenze und entspricht dann dem Bereich, der bei einem Vorgehen nach 4.4.3 erfaßt wird. Realistisch ist dagegen ein Wert von 20–25%.

Wie groß die optimale Fluggeschwindigkeit ist, hängt neben der mittleren momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit vor allem von photogrammetrischen Gesichtspunkten ab. An dieser Stelle sei dazu wiederum auf VÖGTLE (1989) verwiesen.

Insgesamt sinkt beim beschriebenen Ansatz der “Beobachtungsbereich” gegenüber einem Vorgehen nach 4.4.3. Dafür kann aber auf die Einführung einer zweiten (Querschnitts-) Messung verzichtet werden. Dieser Vorteil ist von großer Bedeutung für die Verwendung in der Praxis. Deshalb wird hier diese Methode zur Bestimmung räumlich-zeitlicher Faktoren verwendet. Kennwerte für die Parameter Dichte, Stärke und Geschwindigkeit werden ggf. räumlich-zeitlich nach (37) bis (39) sowie (45) berechnet.

Bereits jetzt soll aber darauf verwiesen werden, daß nach der annähernden Bestimmung von Fahrzeug-Bewegungslinien (s. Abschnitt 6) die Berechnung räumlich-zeitlicher Kenngrößen für jeden beliebigen Zeit-Weg-Bereich möglich ist, selbst wenn dieser Bereich eigentlich nicht vom Flugzeug aus beobachtet wurde.

4.4.5 Definition einer räumlich-zeitlichen Geschwindigkeitsverteilung

Unter Verwendung des obigen Ansatzes lassen sich aus Befliegungen die räumlich-zeitlichen Parameter Verkehrsdichte, Verkehrsstärke und mittlere Geschwindigkeit bestimmen. Vor allem bei der Untersuchung von Geschwindigkeiten ist die ausschließliche Bestimmung von Mittelwerten aber häufig nicht ausreichend, denn Mittelwerte sagen nichts über die Form der Verteilung aus. Ob die Geschwindigkeitsanteile in einem engen oder weiten Bereich gestreut sind, ob auffällige Besonderheiten vorliegen und wo die verkehrstechnisch häufig verwendeten 15, 50 und 85%-Anteilswerte liegen, ist so nicht feststellbar. Aussagen hierzu würde lediglich eine räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung erlauben.

Eine solche räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung ist bisher nicht bekannt. Um diese Lücke zu schließen, wurden deshalb im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verschiedene Definitionen für räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilungen analysiert. Aus der Reihe der untersuchten Ansätze kristallisierte sich die folgende Definition heraus, da sie am besten mit anderen Beobachtungsarten verträglich und vom theoretischen Ansatz her sinnvoll ist.

Die zeitlich-räumliche Beobachtungsfläche "A" sei vorgegeben. Fahrzeuge durchfahren diese Fläche in jeweils einer "Bewegungslinie"; jede Fahrt wird vor allem durch die Ein- und Ausfahrorte repräsentiert. Aus der Kenntnis der Ein- und Ausfahrten in die bzw. aus der Fläche "A" kann man eine Reisegeschwindigkeit für jedes Fahrzeug ableiten:

$$\bar{v}_i = \frac{x_i^{Aus} - x_i^{Ein}}{t_i^{Aus} - t_i^{Ein}} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i}$$

Im folgenden wird zunächst vereinfachend angenommen, diese Geschwindigkeit sei während der Verweilzeit des Fahrzeugs in "A" konstant, die Fahrlinie also eine Gerade. Werden während der Meßperiode in konstantem, kurzem Zeitabstand insgesamt "L" momentane Luftbilder aufgenommen, so wird ein bestimmtes Fahrzeug in einer seiner Verweilzeit entsprechenden Zahl von Beobachtungen "l_i" erscheinen:

$$L = \text{Gesamtzahl aller Bilder während } T \\ (\text{in konstanten Zeitabschnitten } \Delta t)$$

$$l_i = \text{Zahl der Bilder, auf denen Fahrzeug "i" erfaßt wurde}$$

Es gilt:

$$\begin{aligned}\Delta t &\simeq \frac{T}{L} \\ l_i &\simeq \frac{t_i^{Aus} - t_i^{Ein}}{\Delta t} \\ \frac{l_i}{L} &\simeq \frac{t_i^{Aus} - t_i^{Ein}}{T}\end{aligned}\quad (49)$$

Grundidee der Definition ist die Überlegung, daß ein Fahrzeug nur in der Zeit, die es in der Fläche "A" verbringt, einen Beitrag zur räumlich-zeitlichen Geschwindigkeitsverteilung leistet. Das bedeutet, daß zur Bestimmung der räumlich-zeitlichen Geschwindigkeitsverteilung jede individuelle Fahrzeuggeschwindigkeit mit der Zeit, in der dieses Fahrzeug sich in "A" befindet, gewichtet werden muß.

Mathematisch ergibt sich bei dieser Gewichtung der Fahrzeuggeschwindigkeiten mit der Verweilzeit als Mittelwert exakt der Wert, der in (39) als mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit definiert wurde (s. EDIE, 1963 oder COERS, 1970):

$$\sum_i v_i \cdot \frac{\Delta t_i}{\sum_i \Delta t_i} = \frac{\sum_i \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} \cdot \Delta t_i}{\sum_i \Delta t_i} = \frac{\sum_i \Delta x_i}{\sum_i \Delta t_i} = \bar{v}_{RZ} \quad (50)$$

Die räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung kann also aus vielen "momentanen" Beobachtungen durch eine Gewichtung mit der Verweilzeit der Fahrzeuge abgeleitet werden. Damit ergibt sich allgemein eine räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung für beliebige Flächen "A" im Zeit-Weg-Diagramm:

Def. 20:

$$g_{RZ}(v) = \frac{\sum_{\bar{v}_i=v} t_i}{\sum_{0 \leq \bar{v}_i \leq v_{max}} t_i} \quad (51)$$

Die Wahrscheinlichkeit für das Beobachten der Geschwindigkeit v ist also gleich der Summe der Verweilzeiten aller Fahrzeuge mit der Geschwindigkeit v , dividiert durch die Summe der Verweilzeiten aller Fahrzeuge.

Aus dem beschriebenen Vorgehen ergibt sich auch der generelle Zusammenhang zwischen der räumlich-zeitlichen Beobachtung und der momentanen Messung.

Dazu wird wiederum angenommen, daß die Fläche "A" durch "L" momentane Beobachtungen überwacht wurde, die zeitlich sehr rasch aufeinanderfolgten (Bildfolgezeit Δt sei sehr klein und konstant). Globale momentane Werte können aus den "L" verschiedenen momentanen Beobachtungen durch Gewichtung mit der Zahl der in jeder Beobachtung erfaßten Fahrzeuge ($N_1 \dots N_L$) bestimmt werden:

$$\begin{aligned} g_m^{global}(v) &= \frac{N_1 \cdot g_{m1}(v) + N_2 \cdot g_{m2}(v) + \dots + N_L \cdot g_{mL}(v)}{N_1 + N_2 + \dots + N_L} \\ &= \frac{\text{Anz. Fz mit Reisegeschw. } v \text{ in allen Beob.}}{\text{Anz. Fz in allen Beobachtungen}} \end{aligned} \quad (52)$$

Jedes Fahrzeug der Reisegeschwindigkeit v erscheint insgesamt in einer seiner Verweilzeit entsprechenden Zahl von Bildern:

$$l_i \approx \frac{\Delta t_i}{T} \cdot L$$

Dies bedeutet (i = Laufindex Fahrzeuge):

$$g_m^{global}(v) = \frac{\sum_{\bar{v}_i=v} \frac{\Delta t_i}{T} \cdot L}{\text{Anz. Fz in allen Beob.}} \quad (53)$$

Die Zahl der in allen Bildern beobachteten Fahrzeuge entspricht analog den Verweilzeiten aller Fahrzeuge:

$$\begin{aligned} g_m^{global}(v) &= \frac{\frac{L}{T} \cdot \sum_{v_i=v} \Delta t_i}{\frac{L}{T} \cdot \sum_{0 \leq v_i \leq v_{max}} \Delta t_i} \\ &= \frac{\sum_{v_i=v} \Delta t_i}{\sum_{0 \leq v_i \leq v_{max}} \Delta t_i} = g_{RZ}(v) \end{aligned}$$

Damit ergeben sich bei konstanten Fahrzeuggeschwindigkeiten für die beschriebene räumlich-zeitliche Beobachtung Werte, die identisch zur entsprechenden momentanen Geschwindigkeitsverteilung sind: Die (globale) räumlich-zeitliche und die momentane Verteilung sind gleich. Dies gilt selbstverständlich auch für alle anderen Kenngrößen, die davon abgeleitet werden, wie Mittelwerte (s.o.), Varianzen oder Standardabweichungen.

Falls das Verhalten aller Fahrzeuge innerhalb des gesamten T-X-Beobachtungsbereichs aus momentanen Beobachtungen in kurzen Zeitabständen bestimmt werden kann, ist auch die Festlegung der konstanten, individuellen Reisegeschwindigkeit \bar{v}_i nicht mehr notwendig. In diesem Fall sind lediglich die momentanen Geschwindigkeiten der in allen Luftbildern auftretenden Fahrzeuge mit gleicher Gewichtung in der Geschwindigkeitsverteilung zu berücksichtigen. Die entstehende "globale" momentane Verteilung ist ebenfalls identisch mit einer globalen räumlich-zeitlichen Geschwindigkeitsverteilung, die sich aus vielen (sehr kleinen), nach (51) definierten räumlich-zeitlichen (und mit der Zahl der Fahrzeuge gewichteten) Geschwindigkeitsverteilungen zusammensetzt.

Dies ergibt sich auch aus der Tatsache, daß eine räumlich-zeitliche Beobachtung der Größe $A = X \cdot T$ so lange in viele kleinere räumlich-zeitliche Beobachtungen der Größe $a = t_m \cdot x_n$ aufgeteilt werden kann, bis die Fahrzeuggeschwindigkeiten überall als konstant betrachtet werden können und die Fahrzeuge tatsächlich während der gesamten Teil-Beobachtungszeit t_m in "a" verweilen (t_m ist u.a. aus meßtechnischen Gründen nach unten begrenzt). Da dann für alle Fahrzeuge die Verweilzeit in "a" gleich ist, entspricht die nach (51) definierte räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung für Teilbereiche der momentanen Geschwindigkeitsverteilung.

Aus den räumlich-zeitlichen Geschwindigkeitsverteilungen für Teilbereiche wird die globale Geschwindigkeitsverteilung durch Mittelwertbildung bestimmt. Dabei geht – und das ist wesentlich – jedes Fahrzeug in so viele räumlich-zeitliche Bereichsbeobachtungen ein, wie seiner Verweilzeit in "A" entsprechen. Insgesamt gilt wiederum: Aus den (quasi-)momentanen Beobachtungen wird die globale räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung durch die Gewichtung mit der Verweilzeit (bei dieser Geschwindigkeit) bestimmt.

Dieser Zusammenhang ist auch anschaulich auf andere Beobachtungsarten übertragbar: Umfaßt die Fläche A nur einen sehr kurzen Streckenabschnitt über längere Zeit hinweg, so entsteht faktisch eine quasi-lokale Beobachtung. Die bei dieser Beobachtungsart überrepräsentierten schnellen Fahrzeuge verweilen aber nur kurze Zeit auf dem beobachteten Abschnitt – sie werden bei einem Ansatz nach (51) nur schwach gewichtet. Langsame Fahrzeuge dagegen benötigen eine größere Durchfahrzeit und gehen entsprechend stärker in die Gewichtung ein. Als Ergebnis erhält man die räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung sowie – siehe dazu Abschnitt 4.2 – als Ergebnis der Gewichtung momentane Größen.

Erfolgen andererseits zwei Beobachtungen eines längeren Streckenabschnitts in sehr kurzen Zeitabständen (z.B. zwei "Luftbildaufnahmen"), so ergibt sich eine quasi-momentane Messung. Ist der Aufnahmebereich AB groß genug, so werden alle Fahrzeuge in beiden Bildern erfaßt und alle Durchfahrzeiten sind gleich groß (sie entsprechen dem Zeitabschnitt zwischen beiden Luftbildern). Dadurch wird in (51)

jedes Fahrzeug gleich gewichtet (d.h. entsprechend der Zahl der pro Geschwindigkeitsklasse tatsächlich vorhandenen Fahrzeuge); die Definition nach (51) liefert den momentanen Größen entsprechende Werte.

Als weiteres Resultat ist festzuhalten, daß momentane und räumlich-zeitliche Parameter ohne Umrechnung miteinander vergleichbar sind und sich deshalb in gleichem Maße für die Beschreibung der Verkehrssituation eignen.

4.5 Übersicht über die Zusammenhänge

Die entwickelten Beziehungen erlauben Umrechnungen und Vergleiche zwischen den verschiedenen Beobachtungsarten.

Für die Praxis ist die Vergleichbarkeit der mittleren Geschwindigkeiten aus verschiedenen Beobachtungen von großer Bedeutung. Vorteile – vor allem für wissenschaftliche Fragestellungen – besitzt auch die Möglichkeit, direkt die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Geschwindigkeitsklassen ineinander umrechnen zu können. Diese Vergleichbarkeit von Geschwindigkeitsverteilungen erlaubt es auch, davon abgeleitete Größen (z.B. Varianz, Standardabweichung, v_{15} -, v_{50} - oder v_{85} -Perzentilwerte) direkt aus Beobachtungen verschiedener Beobachtungsarten zu bestimmen. Als Bezugsgröße wird die momentane Beobachtung (bzw. die identische Werte liefernde räumlich-zeitliche Beobachtung) verwendet.

In den folgenden Tabellen 3, 4, 5 und 6 sind Umrechnungsbeziehungen für

- die mittleren Geschwindigkeiten,
- die Geschwindigkeitsverteilungen,
- die Geschwindigkeitsvarianzen (der Grundgesamtheit) und
- die Parameter q , \bar{v}_m und k der Zustandsgleichung

zusammengestellt. Je nach Art der vorhandenen Daten (die gegebene Beobachtungsart ist in der ersten Spalte auszuwählen) können die gesuchten Kenngrößen durch die Beziehungen in der jeweils zutreffenden Spalte bestimmt werden.

Umrechnungsbeziehungen für mittlere Geschwindigkeiten				UB	4 / 88
gesucht gegeben	momentan	lokal	bewegt	räuml.- zeitlich	
(momentan) $g_m(v)$ \bar{v}_m G_m^2 $k \left[\frac{N}{X} \right]$		$\bar{v}_l = \bar{v}_m + \frac{G_m^2}{\bar{v}_m}$	$\bar{v}_{bew} = \bar{v}_m - \frac{G_m^2}{v_F - \bar{v}_m}$	$\bar{v}_{RZ} = \bar{v}_m$	
(lokal) $g_l(v)$ \bar{v}_l G_l^2 $q \left[\frac{M}{T} \right]$	$\bar{v}_m = \frac{1}{\bar{w}_l} = \frac{1}{\sum \frac{1}{v} \cdot g_l(v)}$		$\bar{v}_{bew} = \frac{1}{(v_F \bar{w}_l - 1)} \cdot \sum \frac{1}{v} (v_F - v) \cdot g_l(v)$	$\bar{v}_{RZ} = \frac{1}{\bar{w}_l} = \frac{1}{\sum \frac{1}{v} \cdot g_l(v)}$	
(bewegt) $g_{bew}(v)$ \bar{v}_{bew} G_{bew}^2 $v_F < 0$ oder $v_F > v_{i\max}$	$\bar{v}_m = \frac{v_F \cdot \sum \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)}{1 + \sum \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)}$	$\bar{v}_l = \left(\frac{v_F - \bar{v}_m}{\bar{v}_m} \right) \cdot \sum \frac{v^2}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)$ mit \bar{v}_m wie links		$\bar{v}_{RZ} = \frac{v_F \cdot \sum \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)}{1 + \sum \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)}$	
(räuml.- zeitlich) $g_{RZ}(v)$ \bar{v}_{RZ} G_{RZ}^2 X, T	$\bar{v}_m = \bar{v}_{RZ}$	$\bar{v}_l = \bar{v}_{RZ} + \frac{G_{RZ}^2}{\bar{v}_{RZ}}$	$\bar{v}_{bew} = \bar{v}_{RZ} - \frac{G_{RZ}^2}{v_F - \bar{v}_{RZ}}$		

Tabelle 3: Umrechnungsbeziehungen für mittlere Geschwindigkeiten

Tabelle 4: Umrechnungsbeziehungen für Geschwindigkeitsverteilungen $g(v)$

Umrechnungsbeziehungen für Geschwindigkeitsverteilungen $g(v)$				UB	4 / 88
gesucht gegeben	momentan	lokal	bewegt	räuml.- zeitlich	
(momentan) $g_m(v)$ \bar{v}_m σ_m^2 $k \left[\frac{N}{X} \right]$		$g_l(v) = \frac{v}{\bar{v}_m} \cdot g_m(v)$	$g_{bew}(v) = \frac{v_F - v}{v_F - \bar{v}_m} \cdot g_m(v)$	$g_{RZ}(v) = g_m(v)$	
(lokal) $g_l(v)$ \bar{v}_l σ_l^2 $q \left[\frac{M}{T} \right]$	$g_m(v) = \frac{\bar{v}_m}{v} \cdot g_l(v)$ $= \frac{1}{\bar{w}_l} \cdot \frac{1}{v} \cdot g_l(v)$		$g_{bew}(v) = \frac{1}{v_F \cdot \bar{w}_l - 1} \cdot \frac{v_F - v}{v} \cdot g_l(v)$	$g_{RZ}(v) = \frac{\bar{v}_{RZ}}{v} \cdot g_l(v)$ $= \frac{1}{\bar{w}_l} \cdot \frac{1}{v} \cdot g_l(v)$	
(bewegt) $g_{bew}(v)$ \bar{v}_{bew} σ_{bew}^2 $v_F < 0$ oder $v_F > v_{i,max}$	$g_m(v) = \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)$ mit bekanntem \bar{v}_m	$g_l(v) = (v_F \cdot \bar{w}_l - 1) \cdot \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)$ mit bekanntem \bar{w}_l		$g_{RZ}(v) = \frac{v_F - \bar{v}_{RZ}}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)$ mit bekanntem \bar{v}_m	
(räuml.-zeitlich) $g_{RZ}(v)$ \bar{v}_{RZ} σ_{RZ}^2 X, T	$g_m(v) = g_{RZ}(v)$ $= \frac{\sum_{v_F=v} \Delta t_i}{\sum_{v_i} \Delta t_i}$	$g_l(v) = \frac{v}{\bar{v}_{RZ}} \cdot g_{RZ}(v)$	$g_{bew}(v) = \frac{v_F - v}{v_F - \bar{v}_{RZ}} \cdot g_{RZ}(v)$		

Umrechnungsbeziehungen für Geschwindigkeitsvarianzen				UB	4 / 88
gesucht gegeben	momentan	lokal	bewegt	räuml.- zeitlich	
(momentan) $g_m(v)$ \bar{v}_m σ_m^2 $k \left[\frac{N}{X} \right]$		$\sigma_l^2 = \sigma_m^2 - \frac{\sigma_m^4}{\bar{v}_m^2}$ $+ \frac{\sum (v - \bar{v}_m)^3 \cdot g_m(v)}{\bar{v}_m}$	$\sigma_{bew}^2 = \sigma_m^2 - \frac{\sigma_m^4}{(v_F - \bar{v}_m)^2}$ $- \frac{\sum (v - \bar{v}_m)^3 \cdot g_m(v)}{(v_F - \bar{v}_m)}$	$\sigma_{RZ}^2 = \sigma_m^2$	
(lokal) $g_l(v)$ \bar{v}_l σ_l^2 $q \left[\frac{M}{T} \right]$	$\sigma_m^2 = \frac{1}{\bar{w}_l} \cdot (\bar{v}_l - \frac{1}{\bar{w}_l})$ $= \bar{v}_m \cdot (\bar{v}_l - \bar{v}_m)$		$\sigma_{bew}^2 = \bar{v}_m (\bar{v}_l - \bar{v}_m)$ $- \frac{\bar{v}_m^2 (\bar{v}_l - \bar{v}_m)^2}{(v_F - \bar{v}_m)^2}$ $- \frac{\bar{v}_m}{v_F - \bar{v}_m} \cdot \sum \frac{(v - \bar{v}_m)^3}{v} g_l(v)$	$\sigma_{RZ}^2 = \frac{1}{\bar{w}_l} \cdot (\bar{v}_l - \frac{1}{\bar{w}_l})$ $= \bar{v}_{RZ} (\bar{v}_l - \bar{v}_{RZ})$	
(bewegt) $g_{bew}(v)$ \bar{v}_{bew} σ_{bew}^2 $v_F < 0$ oder $v_F > v_{i \max}$	$\sigma_m^2 = (v_F - \bar{v}_m) \cdot (\bar{v}_m - \bar{v}_{bew})$ mit bekanntem \bar{v}_m	$\sigma_l^2 = (v_F - \bar{v}_m) (\bar{v}_m - \bar{v}_{bew})$ $- \frac{(v_F - \bar{v}_m)^2 \cdot (\bar{v}_m - \bar{v}_{bew})^2}{\bar{v}_m^2}$ $+ \frac{v_F - \bar{v}_m}{\bar{v}_m} \sum \frac{(v - \bar{v}_m)^3}{(v_F - v)} g_{bew}(v)$		$\sigma_m^2 = (v_F - \bar{v}_m) \cdot (\bar{v}_m - \bar{v}_{bew})$ mit bekanntem \bar{v}_m	
(räuml.- zeitlich) $g_{RZ}(v)$ \bar{v}_{RZ} σ_{RZ}^2 X, T	$\sigma_m^2 = \sigma_{RZ}^2$	$\sigma_l^2 = \sigma_{RZ}^2 - \frac{\sigma_{RZ}^4}{\bar{v}_{RZ}^2}$ $+ \frac{\sum (v - \bar{v}_{RZ})^3 \cdot g_{RZ}(v)}{\bar{v}_{RZ}}$	$\sigma_{bew}^2 = \sigma_{RZ}^2 - \frac{\sigma_{RZ}^4}{(v_F - \bar{v}_{RZ})^2}$ $- \frac{\sum (v - \bar{v}_{RZ}) \cdot g_{RZ}(v)}{(v_F - \bar{v}_{RZ})}$		

Tabelle 5:
Umrechnungsbeziehungen für Geschwindigkeitsvarianzen (bezogen auf die Grund-
gesamtheit)

Tabelle 6: Umrechnungsbeziehungen für Parameter der Zustandsgleichung

Umrechnungsbeziehungen für Parameter der Zustandsgleichung $q = k \cdot \bar{v}_m$			UB 4 / 88
gesucht gegeben	$q_{(l)}$	$k_{(m)}$	\bar{v}_m
momentan : $g_m (v)$ \bar{v}_m $k \left[\frac{N}{X} \right]$	$q_{(l)} = k \cdot \bar{v}_m$		
lokal : $g_l (v)$ $v_l (\bar{w}_l)$ $q \left[\frac{M}{T} \right]$		$k_{(m)} = \frac{q_{(l)}}{\bar{v}_m}$ $= q_{(l)} \cdot \bar{w}_l$ $= q_{(l)} \cdot \sum \frac{1}{v} \cdot g_l (v)$	$\bar{v}_m = \frac{1}{\bar{w}_l}$ $= \frac{1}{\sum \frac{1}{v} \cdot g_l (v)}$
bewegt : $g_{bew} (v)$ \bar{v}_{bew} $v_F < 0$ oder $v_F > v_{i,max}$	$q_{(l)} = k_{(m)} \cdot \bar{v}_m$ mit $k_{(m)} \cdot \bar{v}_m$ wie rechts \rightarrow	$k_{(m)} = \frac{\# \text{ beob. Fhz}}{\text{Strecke } X}$ $\cdot \frac{v_F}{v_F - \bar{v}_m}$	$\bar{v}_m = \frac{v_F \cdot \sum \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew} (v)}{1 + \sum \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew} (v)}$
räumlich-zeitl. $g_{RZ} (v)$ \bar{v}_{RZ} X, T	$q_{(l)} = k \cdot \bar{v}_{RZ}$	$k_{(m)} = \bar{k}_{RZ}$	$\bar{v}_m = \bar{v}_{RZ}$

4.6 Kombination verschiedener Beobachtungsarten

Bei stationärem Verkehrsablauf lassen sich die entwickelten Beziehungen in beliebiger Weise kombinieren. Liegen Parameter aus verschiedenen Beobachtungen vor, so bietet sich zunächst eine Umrechnung in momentane Verkehrsgrößen an, die als Basis für einen eventuellen Vergleich dienen. Auch können zwei verschiedene Beobachtungen unterschiedlicher Fahrzeugkollektive in gemeinsamen Parametern erfaßt werden; dazu sind die entsprechenden (ggf. umgerechneten) momentanen Werte mit der Zahl der jeweils zugrundeliegenden beobachteten Fahrzeuge zu gewichten. Aus der Gewichtung ergeben sich direkt die gemeinsamen Verkehrsgrößen. Ein Beispiel soll das Vorgehen erläutern:

Gesucht sei z.B. die momentane Geschwindigkeitsverteilung auf der gesamten überflogenen Strecke zu dem Zeitpunkt, an dem das Flugzeug am Streckenende wendet (t_{Wende}). Angenommen wird nun, daß in der betrachteten Situation zwei verschiedene Beobachtungen vorliegen:

- (a) die auf dem Hinflug für "h" Fahrzeuge beobachtete "bewegte" Geschwindigkeitsverteilung (4.3.1) und
- (b) eine "lokale" Geschwindigkeitsverteilung (siehe 4.2) für "M" Fahrzeuge, die am Beginn der Strecke im Zeitraum (t_{Anfang}, t_{Wende}) erfaßt wurden.

In diesem Fall kann für jede der beiden Verteilungen die vergleichbare momentane Verteilung bestimmt werden. Es liegen somit zwei momentane Verteilungen vor, die in der Regel ungleich sind und unterschiedliche Fahrzeugkollektive repräsentieren.

Die Überführung beider Verteilungen in eine gemeinsame, momentane Verteilung (zum Zeitpunkt t_{Wende}) ergibt:

– für die lokale Beobachtung ("M" Fahrzeuge):

$$g_m(v) = \frac{\bar{v}_m}{v} \cdot g_l(v) \quad (\text{siehe 9})$$

– für die bewegte Beobachtung ("h" Fahrzeuge):

$$g_m(v) = \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v) \quad (\text{siehe 24})$$

– für die gemeinsame Beobachtung ("M" + "h" Fahrzeuge):

$$g_m^{gemeinsam}(v) = \frac{M \cdot \frac{\bar{v}_m}{v} \cdot g_l(v) + h \cdot \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)}{M + h} \quad (54)$$

Aus dieser – beiden Beobachtungen gemeinsam entsprechenden – momentanen Verteilung können nach den üblichen Definitionen Mittelwerte und Varianzen bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist prinzipiell für alle Beobachtungsarten möglich.

Das Beispiel kann daneben auch zur Ableitung weiterer Beziehungen verwendet werden. Wie aus Abb. 8 erkennbar ist, beschreiben eine bewegte und eine lokale Beobachtung den Anfangs- und den Endpunkt einer momentanen Beobachtung, z.B. zum Zeitpunkt der Flugzeugwende. Alle Fahrzeuge, die in der momentanen Stichprobe zum Zeitpunkt der Wende enthalten sind, müssen dann entweder in der lokalen Beobachtung (in der Zeit zwischen dem Beginn des Hinflugs und der Flugzeugwende) oder in der bewegten Beobachtung (im selben Zeitraum) erfaßt worden sein. Unter der Annahme, daß keine Geschwindigkeitsänderungen aufgetreten sind, bedeutet dies z.B. für die zum Zeitpunkt der Flugzeugwende zu erwartende momentane Geschwindigkeitsverteilung:

$$g_m(v) = \frac{h \cdot g_{bew}(v) + M \cdot g_l(v)}{h + M} \quad (55)$$

Der Mittelwert der momentanen Geschwindigkeit wird damit rechtechnisch einfach bestimmt zu:

$$\begin{aligned} \bar{v}_m &= \frac{1}{n} [h \cdot \bar{v}_{bew} + M \cdot \bar{v}_l] = \frac{1}{n} \left[h \cdot \frac{\sum_{i=1}^h v_i}{h} + M \cdot \frac{\sum_{i=1}^M v_i}{M} \right] \\ &= \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^h v_i + \sum_{i=1}^M v_i \right) \end{aligned}$$

wobei $N = h + M$ die Zahl aller erfaßten Fahrzeuge angibt.

Durch die Summation der in zwei verschiedenen Beobachtungen gemessenen Geschwindigkeiten egalisiert sich in diesem Fall die (gegenüber momentanen Beobachtungen):

- Bevorzugung schneller Fahrzeuge in lokalen und die
- Bevorzugung langsamer Fahrzeuge in bewegten (Hinflugs-)Beobachtungen.

Sind die Zahlen der beobachteten Fahrzeuge ("h", "M") unbekannt, so kann auch ohne ihre Kenntnis eine momentane Verteilung errechnet werden. Dabei wird davon

ausgegangen, daß sich im Wendezeitpunkt etwa "n" Fahrzeuge auf der Strecke der Länge X befinden. Davon sind statistisch $100 \cdot (X - X_1)/X\%$ im Hinflug und $100 \cdot X_1/X\%$ am Querschnitt erfaßt worden (s. Abb. 9).

Mit

$$X_1 = \frac{X}{v_F} \cdot \bar{v}_m \quad (\text{siehe } 43)$$

werden damit im Mittel beobachtet:

$$n \cdot \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F} \quad \text{Fahrzeuge auf dem Hinflug und}$$

$$n \cdot \frac{\bar{v}_m}{v_F} \quad \text{Fahrzeuge am Querschnitt.}$$

Die jeweils getrennt bestimmten Verteilungen (lokal und bewegt) werden nun nach dem beschriebenen Verfahren mit diesen Schätzungen für die erwartete Fahrzeuganzahl gewichtet und ergeben wiederum momentane Kenngrößen:

$$g_m(v) = g_{bew}(v) \cdot \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F} + g_l(v) \cdot \frac{\bar{v}_m}{v_F} \quad (56)$$

Beweis (durch Umformen der rechten Seite):

$$\begin{aligned} & g_{bew}(v) \cdot \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F} + g_l(v) \cdot \frac{\bar{v}_m}{v_F} \\ = & \frac{(v_F - \bar{v}_m)}{v_F} \cdot \frac{(v_F - v)}{(v_F - \bar{v}_m)} \cdot g_m(v) + \frac{\bar{v}_m}{v_F} \cdot \frac{v}{\bar{v}_m} \cdot g_m(v) \\ = & g_m(v) \cdot \left[\frac{v_F}{v_F} - \frac{v}{v_F} + \frac{v}{v_F} \right] = g_m(v) \end{aligned}$$

Für die Mittelwerte der Geschwindigkeiten gilt dann:

$$\begin{aligned} \bar{v}_m &= \sum_v v \cdot g_m(v) \\ &= \sum_v v \cdot g_{bew}^H(v) \cdot \frac{v_F - \bar{v}_m}{v_F} + \sum_v v \cdot g_l(v) \cdot \frac{\bar{v}_m}{v_F} \\ &= \sum_v v \cdot g_{bew}(v) \cdot \frac{v_F}{v_F} - \sum_v v \cdot g_{bew}(v) \cdot \frac{\bar{v}_m}{v_F} + \sum_v v \cdot g_l(v) \cdot \frac{\bar{v}_m}{v_F} \\ &= \bar{v}_{bew} + \bar{v}_m \left[\frac{\bar{v}_l}{v_F} - \frac{\bar{v}_{bew}}{v_F} \right] = \bar{v}_{bew} + \frac{\bar{v}_m}{v_F} (\bar{v}_l - \bar{v}_{bew}) \end{aligned}$$

Wird die Gleichung nach \bar{v}_m aufgelöst, so ergibt sich damit z.B. für die Kombination von lokaler und bewegter Beobachtung im Hinflug die einfache Beziehung:

$$\bar{v}_m = \frac{\bar{v}_{bew} \cdot v_F}{v_F - \bar{v}_l + \bar{v}_{bew}} \quad (57)$$

Die Varianz sowie alle anderen Kenngrößen werden am einfachsten aus der Geschwindigkeitsverteilung (z.B. unter Verwendung von (54) und (55)) errechnet.

Durch die Messung der Geschwindigkeiten beim Hinflug und am Querschnitt (bei Streckenbeginn oder -ende) ergibt sich eine einfache Möglichkeit, momentane Kenngrößen zu bestimmen. Allgemein können auf dem beschriebenen Weg zwei oder mehrere verschiedene Beobachtungen durch entsprechende Gewichtung und Addition in eine gemeinsame (momentane) Beobachtung überführt werden.

4.7 Zusammenfassung von Abschnitt 4

Bei der Messung von Geschwindigkeiten ergeben sich je nach Art der Beobachtung unterschiedliche Ergebnisse und Verzerrungen für identische Fahrzeugkollektive, die z.B. beim Vergleich verschiedener Beobachtungen berücksichtigt werden müssen. Für den Fall einer konstanten Geschwindigkeitsverteilung (Stationarität) wurden auf der Basis der Arbeiten von LEUTZBACH (1972 u. 1988) Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Beobachtungsarten erarbeitet, die auch die Kombination unterschiedlicher Beobachtungen erlauben. Basis dieser Beziehungen sind die momentanen (bzw. räumlich-zeitlichen) Kenngrößen. Somit können vom bewegten Beobachter gemessene und/oder am Querschnitt erfaßte Geschwindigkeiten mit momentanen (und damit auch allen anderen) Werten verglichen oder kombiniert werden.

Im Fall einer räumlich-zeitlichen Betrachtung können aus bewegten Beobachtungen relativ einfach Mittelwerte der Geschwindigkeit bestimmt werden. Um auch die Geschwindigkeitsunterschiede berücksichtigen zu können, wurde eine Definition für eine räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilung entwickelt. Die damit berechneten Parameter sind identisch mit den Werten der entsprechenden (globalen) momentanen Beobachtung.

Allerdings wird der in der Realität anzutreffende Verkehrsablauf zumeist instationär sein; verschiedene Beobachtungen liefern dann verschiedene Ergebnisse. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Beobachtungsarten in der beschriebenen Form wird nicht mehr anzutreffen sein. Somit gelten die Ergebnisse jeder Beobachtung ausschließlich für den jeweils zugrundeliegenden Beobachtungsbereich. Immerhin lassen sich noch aus den Beobachtungen "theoretisch entsprechende momentane Kenngrößen" bestimmen, die miteinander verglichen werden können und Anhaltspunkte, z.B. für die Veränderung der Verkehrssituation, bieten.

Momentane Größen besitzen im Rahmen der vorliegenden Fragestellung eine Reihe von Vorteilen gegenüber allen anderen Parametern, die ihre Wahl als Bezugsgröße geboten erscheinen lassen (vergleiche dazu auch BENYEI, AMBRUS u. CSORJA, 1984). Hier sind vor allem die Tatsache, daß momentane Beobachtungen Fahrzeuge aus verschiedenen Geschwindigkeitsklassen weder "bevorzugen" noch "benachteiligen", und die sich aus Gleichung (54) ergebende Identität zwischen momentanen und räumlich-zeitlichen Kenngrößen zu nennen.

5 Direkte Berechnung von Verkehrsgrößen

Inhalt von Abschnitt 5 ist die Beschreibung von Ansätzen, die die Zusammenhänge aus Abschnitt 4 berücksichtigen und aus den bewegten Beobachtungen direkt Verkehrsgrößen berechnen. Dazu wird angenommen, daß ein Beobachtungsflugzeug die Untersuchungsstrecke mit festgelegter, optimaler Geschwindigkeit mehrmals in beiden Richtungen (Hin- und Rückflug) überfliegt und dabei die Fahrzeuge in Bildaufnahmen erfaßt.

Im Rahmen der parallel laufenden Untersuchungen von VÖGTLE (1989) wurden photogrammetrische Bildaufnahme- und Verarbeitungsverfahren für diese Beobachtungen entwickelt (s. Abschnitt 3.3), die die mikroskopischen Grundgrößen der beobachteten Fahrzeuge bestimmen. Diese Verkehrsdaten werden in der vorliegenden Arbeit als Ausgangsbasis für die weitere Auswertung im Bereich des Verkehrswesens verwendet.

Damit befindet sich an dieser Stelle der Untersuchung die Schnittstelle zwischen

- der primären (automatischen) Datenerfassung und -verarbeitung mittels photogrammetrischer Aufnahme- und Auswertverfahren und
- der sekundären (automatischen) Datenaufbereitung und Dateninterpretation.

Aus den Eingangsdaten sollen repräsentative Verkehrsgrößen bestimmt werden, die den Verkehrsablauf bzw. Verkehrszustand zutreffend beschreiben. Generell kommen hierfür die Verkehrsdichte, die Verkehrsstärke, die angetroffenen Geschwindigkeiten, die Verteilung der Fahrzeuge auf die verfügbaren Fahrstreifen, der Anteil von Lastkraftwagen, die Zahl der Spurwechsel oder andere Größen in Frage. Die Berechnung solcher Größen wird – soweit dies ohne Kenntnis der individuellen Zeit-Weg-Fahrlinien der Fahrzeuge möglich ist – im folgenden beschrieben.

5.1 Beschreibung der verwendeten Eingangsdaten

Eingangsgrößen der Verfahren sind automatisch ausgewertete Daten des Verkehrs im untersuchten Streckenabschnitt (VÖGTLE, 1989). Das Flugzeug überfliegt dabei die Strecke in einer relativ geringen Höhe. Im Hinflug beträgt die Geschwindigkeit etwa 160 - 200 km/h; es ist lediglich sicherzustellen, daß das Flugzeug nicht von Fahrzeugen überholt wird. Im Rückflug liegt die Geschwindigkeit niedriger

(120 - 160 km/h). Hier ist die langsamste Geschwindigkeit zu wählen, bei der noch ein ruhiger Flug möglich ist (ggf. "flaps out"). Der in jedem "Bild" erfaßte Aufnahmebereich AB beträgt etwa 60 - 80 m der zu untersuchenden Strecke. Nach der Auswertung stehen folgende Informationen zur Verfügung:

1. Länge der untersuchten Strecke (z.B. $X = 4000$ m)
2. Daten über die Flugzeugbewegung, z.B. der Art:

Start 1. Hinflug 10:00:07, Pos = 50 m, $v = 50$ m/s
 Start 1. Rückflug 10:02:05, Pos = 4000 m, $v = 38$ m/s
 usw. ...

3. Daten über die beobachteten Fahrzeuge:

Flugnr.	Zeit	Ort	Geschw.	Größe	Grauwert
Hinflug 1	10:00:08	20m	29m/s	15P.	244
Hinflug 1	10:00:19	507m	33m/s	7P.	45
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Hinflug 1	10:01:26	3952m	20m/s	40P.	135
Rückfl. 1	10:02:10	3879m	18m/s	43P.	210
Rückfl. 1	10:02:15	3610m	36m/s	9P.	121
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Hinflug 2	10:03:55	57m	21m/s	30P.	67
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Die Fahrzeuggröße kann beispielsweise in Pixeln (Bildpunkten) oder in m^2 gemessen werden; der Grauwert (bzw. die Fahrzeugfarbe) wird in Werten einer definierten Skala ausgedrückt. Für das vorgestellte Verfahren ist dabei zunächst unwichtig, ob diese Daten bereits während des Fluges bestimmt oder zunächst nur die Bildaufnahmen abgespeichert wurden. Im zweiten Fall kann bei der Datenbearbeitung im Labor u.U. ein genaueres Ergebnis (genauere Rechenverfahren) erreicht werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde die unterschiedliche Genauigkeit der photogrammetrischen Eingabeparameter berücksichtigt. Folgende Minimalvoraussetzungen

wurden – unter Einbeziehung der Ergebnisse von VÖGTLE (1989) – als erfüllt betrachtet:

- Ort (absolut) : mittl. Fehler $< \pm 10m$
- Ort (relativ, in Folgebildern) : mittl. Fehler $< \pm 0,2m$
- Zeit (absolut) : mittl. Fehler $< \pm 0,2s$
- Zeit (relativ, im Folgebild) : mittl. Fehler $< \pm 0,002ms$
- mittl. Fluggeschwindigkeit : mittl. Fehler $< \pm 0,1m/s$
(Hin- oder Rück)
- Fahrzeuggeschwindigkeit (Hin) : mittl. Fehler $< \pm 1m/s$
- Fahrzeuggeschwindigkeit (Rück) : mittl. Fehler $< \pm 2m/s$
- Grauwert der Fahrzeuge : Einordnung in minimal 5 Klassen
- Größe der Fahrzeuge : Einordnung in minimal 8 Klassen
[m^2]

Die Qualität der Eingabedaten ist die wichtigste Einflußgröße auf die Qualität der Endergebnisse. Werden falsche Eingabeparameter verwendet, so können die entwickelten Verfahren ebenfalls nur falsche Ergebnisse liefern. Die Qualität der Eingabedaten sollte deshalb in jedem Einzelfall daraufhin überprüft werden, ob sie den jeweils relevanten Fragestellungen genügt.

Da in der vorliegenden Arbeit die systematische Weiterverwendung der Daten von Interesse ist und insbesondere keine Genauigkeitsuntersuchung des bei VÖGTLE (1989) beschriebenen Bildauswertesystems erfolgen soll und kann, wird auf die Analyse der Auswirkungen fehlerbehafteter Eingabedaten verzichtet. Zur Abschätzung der zu erwartenden Meßfehler im Einzelfall sei auf VÖGTLE (1989) verwiesen. Da die Formeln für die Bestimmung der Verkehrsgrößen jeweils explizit angegeben werden, können die mittleren Fehler der abgeleiteten Größen bei Bedarf aus den mittleren Fehlern der Beobachtung nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz bestimmt werden. Zusätzliche Fehler aus der Berechnung ergeben sich für die in diesem Abschnitt beschriebenen Größen nicht.

5.2 Berechnung von Geschwindigkeitskenngrößen

Zunächst wird auf die Berechnung von Geschwindigkeitskenngrößen eingegangen, da diese häufig im Vordergrund stehen. Direkt im Anschluß an die Auswertung der Bilddaten können die jeweiligen "bewegten Geschwindigkeitsverteilungen" für die "Hin- und Rückflugpaare" errechnet werden. Damit sind verfügbar:

- a) die auf dem Hinflug beobachtete Geschwindigkeitsverteilung $g_{bew}^H(v)$ und
 - b) die auf dem Rückflug beobachtete Geschwindigkeitsverteilung $g_{bew}^R(v)$,
- sowie
- c) die mittlere beobachtete Geschwindigkeit auf dem Hinflug \bar{v}_{bew}^H und
 - d) die mittlere beobachtete Geschwindigkeit auf dem Rückflug \bar{v}_{bew}^R .

Auch daraus abgeleitete Parameter (Varianz o.ä.) der bewegten Beobachtung können direkt berechnet werden.

Wegen der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Verzerrungen bei der Beobachtung bestimmter Geschwindigkeitsklassen in Hin- und Rückflügen sind die so errechneten Werte allerdings wenig aussagekräftig. Die Verzerrungen können durch die Gewichtung mit den entsprechenden Faktoren (Beziehungen (19), (24), (29) und (35)) eliminiert werden. Dazu muß die mittlere momentane Fahrzeuggeschwindigkeit nach (23), (25), (26) und (34) bestimmt werden. Die sich danach ergebenden Geschwindigkeitsverteilungen entsprechen momentanen Größen und können mit solchen verglichen werden. Folgende Fahrzeugkenngrößen sind dann verfügbar:

- e) die momentane Geschwindigkeitsverteilung des Hinflugs $g_m^H(v)$,
- f) die momentane Geschwindigkeitsverteilung des Rückflugs $g_m^R(v)$,
- g) die mittlere momentane Geschwindigkeit des Hinflugs \bar{v}_m^H ,
- h) die mittlere momentane Geschwindigkeit des Rückflugs \bar{v}_m^R

sowie alle daraus abgeleiteten Parameter.

Die so erhaltenen Größen entsprechen direkt momentanen Werten. Sie können deshalb ohne weitere Umrechnung untereinander, mit momentanen oder auch mit räumlich-zeitlichen Kenngrößen verglichen oder in Verbindung (z.B. bei der Bildung von "Mittelwerten") gebracht werden.

Da das Vorhandensein einer zweiten, (zusätzlichen) lokalen oder bewegten Beobachtung nicht generell unterstellt werden kann, sind räumlich-zeitliche Größen zu-

nächst nur nach den in 4.4.3 beschriebenen Verfahren berechenbar. Die mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit wird nach (39) aus den Ein- bzw. Ausfahrzeiten und -orten aller "h" im Hinflug erfaßten Fahrzeuge bestimmt. Grundlage der Berechnung sind alle im Hinflug beobachteten, aber nur die ersten "h" der im Rückflug erfaßten Fahrzeuge – ohne Rücksicht darauf, ob dies dieselben oder ggf. unterschiedliche Fahrzeuge sind. Die so bestimmte

i) mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit \bar{v}_{RZ}

dürfte im Mittel zwischen den nach (g) und (h) bestimmten momentanen Größen liegen und gilt für die nach (45) (oder (46)) berechnete Zeit-Weg-Fläche. Räumlich-zeitliche Geschwindigkeitsverteilungen o.ä. können zu diesem Zeitpunkt nicht berechnet werden, da die Fahrlinien der Fahrzeuge (noch) unbekannt sind.

5.3 Berechnung der (momentanen) Verkehrsdichte

Zur Bestimmung der Verkehrsdichte auf einem Streckenabschnitt stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Im Prinzip ist die Frage zu beantworten, wie viele Fahrzeuge sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einem definierten Streckenabschnitt befinden.

5.3.1 Bestimmung der Verkehrsdichte aus einem Luftbild

Prinzipiell kann die Verkehrsdichte aus jedem Luftbild bestimmt werden, indem die Zahl der im Bild erfaßten Fahrzeuge (ggf. pro Fahrstreifen) durch die Länge des Aufnahmebereichs dividiert wird. Theoretisch kann so zu jedem Zeitpunkt des Fluges eine "aktuelle Verkehrsdichte" bestimmt werden. Dieser Ansatz führt aus drei Gründen zu unsicheren bzw. verfälschten Werten:

- Im hier vorliegenden Fall eines relativ kleinen Aufnahmebereichs ($50\text{m} \leq AB \leq 80\text{m}$) können in jedem Bild nur wenige Fahrzeuge (pro Fahrspur) erfaßt werden. Bei frei fließendem Verkehr sind größenordnungsmäßig ca. 1 - 2 Fahrzeuge, bei Stau ca. 10 Fahrzeuge pro Fahrstreifen und "Bild" zu erwarten. Aussagen zur Verkehrsdichte aus Bildern mit wenigen (oder keinen) Fahrzeugen sind mit großer Unsicherheit behaftet und i.d.R. nicht repräsentativ für die gesamte Untersuchungsstrecke.
- Durch die Eigengeschwindigkeit des Flugzeugs werden Fahrzeuge unterschiedlicher Geschwindigkeitsgruppen je nach ihrer Geschwindigkeit häufiger oder weniger oft (als ihrer tatsächlichen Anwesenheit in der Stichprobe entspricht) beobachtet (siehe Abschnitt 4.3). Dadurch treten bei der Bestimmung der

Verkehrsdichte Verzerrungen auf, deren Größenordnung im wesentlichen von der Fluggeschwindigkeit abhängt: Fliegt das Flugzeug sehr schnell, so sinkt der Fehlerfaktor. Bei den üblicherweise vorliegenden Fluggeschwindigkeiten kann der Fehler nicht vernachlässigt werden (s.u.).

- Werden Luftbilder mit kleinem Aufnahmebereich zur Bestimmung der Verkehrsdichte auf aufeinanderfolgenden Teilstrecken verwendet, so sind die errechneten Verkehrsdichten nicht unabhängig voneinander. Vor allem im Hinflug werden in aufeinanderfolgenden Luftbildern in der Regel dieselben Fahrzeuge beobachtet. Auch dadurch wird die Verwendbarkeit einer direkten Bestimmung der Verkehrsdichte eingeschränkt.

Deshalb scheint die Berechnung der Verkehrsdichte für einzelne Luftbilder nicht sinnvoll.

5.3.2 Bestimmung der Verkehrsdichte aus lokaler und bewegter Beobachtung

Die Verkehrsdichte auf einem Streckenabschnitt kann sehr exakt bestimmt werden, wenn neben der bewegten Beobachtung auch eine lokale Erfassung am Beginn (bzw. Ende) der Untersuchungsstrecke verfügbar ist. In diesem Fall ist jedes Fahrzeug, das sich zu einem beliebigen Zeitpunkt auf der bereits "überflogenen" Strecke befindet, entweder am Querschnitt oder in der bewegten Beobachtung erfaßt worden. Grundlage der Dichtebestimmung sind dann nicht einzelne Luftbilder, sondern die (wesentlich größere) Zahl der insgesamt erfaßten Fahrzeuge sowie die (ebenfalls größere) bereits überflogene Streckenlänge. So kann zu jedem Zeitpunkt ein Wert für die (momentane) Fahrzeugdichte bestimmt werden.

- Falls das Fahrzeug den Wendepunkt noch nicht erreicht hat, gilt zur Zeit t_j ($v_F > v_i^{max}$):

$$k(t_j) = \frac{n_j^H + n_j^Q}{x_j} = \frac{n_j^H + n_j^Q}{v_F^H \cdot t_j} \quad (58)$$

Dabei sind die Größen (s. Abb. 12) wie folgt definiert:

x_j = überflogene Streckenlänge zum Zeitpunkt t_j
(seit Beginn des Hinflugs)

n_j^H = Zahl der auf dem Hinflug beobachteten Fahrzeuge zum Zeitpunkt t_j (seit Beginn des Hinflugs)

n_j^Q = Zahl der am Querschnitt beobachteten Fahrzeuge zum Zeitpunkt t_j (seit Beginn des Hinflugs)

- In dem Moment, in dem das Flugzeug den Wendepunkt am Ende der Untersuchungsstrecke erreicht, gilt:

$$k(t_{Wende}) = \frac{h + n^Q}{X} \quad (59)$$

„h“ entspricht der Gesamtzahl der im Hinflug beobachteten Fahrzeuge, n^Q ist die Zahl aller Fahrzeuge, die in der Zeit vom Beginn des Hinflugs bis zum Erreichen des Streckenendes (zum Zeitpunkt t_{Wende}) am Querschnitt erfaßt wurden.

- Falls sich das Flugzeug auf dem Rückflug befindet, gilt für die Zeit t_j ($t_j > t_{Wende}$): ($v_F^R < 0$)

$$k(t_j) = \frac{h + n_j^Q - n_j^R}{X + (t_j - t_{Wende}) \cdot v_F^R} = \frac{h + n_j^Q - n_j^Q - n_j^R}{x_j} \quad (60)$$

Dabei ist analog:

n_j^R = Zahl der auf dem Rückflug beobachteten Fahrzeuge zum Zeitpunkt t_j (seit Beginn des Rückflugs)

Allerdings gelten diese Verkehrsdichtewerte für wechselnde Teile der Untersuchungsstrecke (s. Nenner der Beziehungen (58) bis (60)). Während der am Beginn liegende Teil der Strecke praktisch immer in den Werten der Verkehrsdichte berücksichtigt wird, wird der am Ende liegende Streckenteil lediglich zu einem einzigen Zeitpunkt („im Moment der Wende“) in die Berechnung einbezogen. Dies wirkt sich nachteilig auf die Verwendbarkeit des Ansatzes aus. Daneben steht vor allem die Notwendigkeit einer zweiten – lokalen – Verkehrsbeobachtung einer praktischen Verwendung entgegen.

- Die Geschwindigkeit des Flugzeugs betrage im Hinflug 100 m/s, im Rückflug 50 m/s. Es werden nacheinander 25 Hin- und 25 Rückflüge einer Untersuchungsstrecke der Länge 4.000 m durchgeführt. Die Beobachtungsdauer beträgt 75 Minuten. Während dieser Beobachtungszeit sei die zweistreifige Untersuchungsstrecke für 10 Minuten vollständig blockiert. Diese Streckenblockade bewirkt deutliche Dichteschwankungen.

Werden Verkehrsdichten lediglich aus der in jedem Flug beobachteten Fahrzeugzahl bestimmt, so ergibt sich für die 50 Hin- und Rückflüge die in Abb. 13 dargestellte Dichteganglinie:

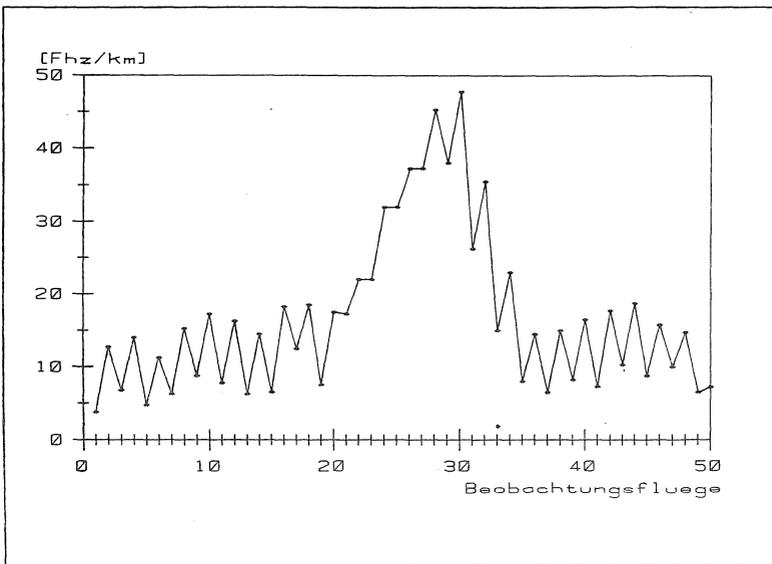


Abbildung 13:
(Durch die Bewegung des Flugzeugs) verzerrte Verkehrsdichte aus 50 aufeinanderfolgenden Hin- und Rückflügen

Der Grund für die deutlich erkennbaren, alternierenden Schwankungen für Hin- und Rückflüge liegt in der Tatsache, daß das Flugzeug für den Überflug der Strecke eine

gewisse Zeit (für einen Hinflug 60s, für einen Rückflug 120s) benötigt. Dadurch werden im Hinflug alle Fahrzeuge, die in dieser Zeit auf die Untersuchungsstrecke auffahren (bzw. sie verlassen), nicht erfaßt. Im Rückflug werden nicht nur die im Moment der Wende auf der Straße anwesenden, sondern auch die während der Zeit des Rückflugs einfahrenden Fahrzeuge erfaßt.

Diese Verzerrungen lassen sich beseitigen, indem die tatsächlich beobachteten Fahrzeugzahlen mit einem Umrechnungsfaktor multipliziert werden. Er ergibt sich, indem man die im Hinflug beobachtete Fahrzeugzahl "h" (bzw. die im Rückflug beobachtete Fahrzeugzahl "r") nicht auf die gesamte Länge X der Untersuchungsstrecke, sondern auf die zu einem bestimmten Zeitpunkt "effektiv überwachte" Strecke bezieht.

Zur Bestimmung der "effektiven Streckenlängen" von Hin- und Rückflügen sei auf Abb. 9 verwiesen:

Betrachtet werden Bewegungslinien mit der mittleren momentanen Geschwindigkeit \bar{v}_m . Im gesamten Hinflug werden dann nur die Fahrzeuge beobachtet, die sich im Moment der Flugzeugwende auf der Strecke $(X - X_1)$ befinden. Fahrzeuge, die erst nach Abflug des Flugzeugs am Streckenbeginn einfahren, befinden sich zu diesem Zeitpunkt noch auf der Strecke X_1 und dürfen nicht berücksichtigt werden. Für die Strecke X_1 gilt:

$$X_1 = \frac{X}{v_F^H} \cdot \bar{v}_m \quad (\text{siehe 43})$$

Auf dem Rückflug werden zusätzlich zu den im Zeitpunkt der Wende (momentan) anwesenden Fahrzeugen auch diejenigen Fahrzeuge erfaßt, die sich auf einem Wegstück X_2 vor Beginn der Strecke X befinden (s. Abb. 9):

$$X_2 = \frac{X}{-v_F^R} \cdot \bar{v}_m \quad (v_F^R < 0) \quad (\text{siehe 44})$$

Damit ergibt sich die "effektive Streckenlänge":

$$\text{im Hinflug: effektive Streckenlänge} = X - X_1$$

$$\text{im Rückflug: effektive Streckenlänge} = X + X_2$$

Bezieht man die in Hin- oder Rückflügen beobachteten Fahrzeugmengen auf die "effektiven" Streckenabschnitte, so ergeben sich unverzerrte (momentane) Verkehrsdichten:

$$\text{Im Hinflug: } k = \frac{h}{X - X_1} = \frac{\text{Anz. im Hinflug beob. Fz}}{\text{“effektive Länge” Hinflug}}$$

$$\text{im Rückflug: } k = \frac{r}{X + X_2} = \frac{\text{Anz. im Rückflug beob. Fz}}{\text{“effektive Länge” Rückflug}}$$

Berücksichtigt man, daß im verwendeten Koordinatensystem die Fluggeschwindigkeit im Rückflug negativ ist, so lassen sich beide Beziehungen zu einer Formel für Hin- und Rückflug zusammenfassen:

$$k = \frac{\text{Anz. beob. Fz}}{X \cdot (1 - \frac{\bar{v}_m}{v_F})} = \frac{\text{Anz. beob. Fz}}{X} \cdot \frac{v_F}{v_F - \bar{v}_m} \quad (61)$$

In Fortführung des oben beschriebenen Beispiels (Beobachtung einer 4.000 m langen Strecke mit 10-minütiger Vollsperrung) wurden nach diesem Verfahren unverzerrte Verkehrsdichten für jeden der 50 Hin- bzw. Rückflüge ermittelt. Es ergibt sich die in Abb. 14 dargestellte Dichtegangleinie.

Diese Gangleinie zeigt weiter die deutlich höheren Dichtewerte im Zeitraum der Vollsperrung (etwa Flüge 20 - 30), während die Schwankungen der Verkehrsdichte aus aufeinanderfolgenden Hin- und Rückflügen (s. Abb. 13) verschwunden sind. Alle in Abb. 14 sichtbaren, kleineren Veränderungen der Verkehrsdichte sind auf die üblichen Schwankungen dieser Größe im Rahmen des (instationären) Verkehrsablaufs zurückzuführen.

Das beschriebene Vorgehen liefert damit – nur abhängig von der jeweiligen Fluggeschwindigkeit und der mittleren momentanen Geschwindigkeit des Fahrzeugkollektivs – Verkehrsdichtewerte, die miteinander vergleichbar sind und momentanen Dichten entsprechen. Diese Werte repräsentieren damit die während des Überflugs vorhandene Verkehrssituation am besten. Die bekannten – systematischen – Verzerrungen für alternierende Hin- bzw. Rückflüge (s. Abb. 13) werden eliminiert.

Zur Verwendung von (61) muß die mittlere momentane Geschwindigkeit bekannt sein. Hierfür bieten sich mehrere Wege an.

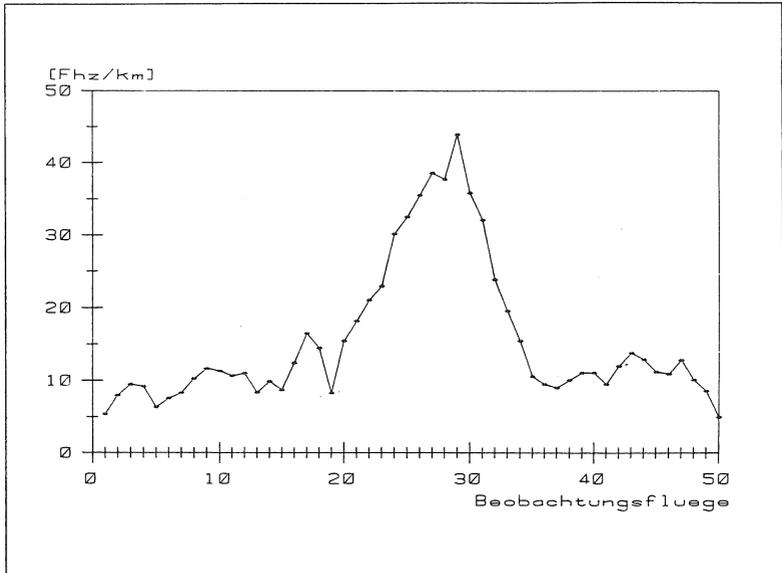


Abbildung 14:

Unverzerrte momentane Verkehrsdichte aus 50 aufeinanderfolgenden Hin- und Rückflügen

So kann in aufeinanderfolgenden Flügen die nach 5.2 (i) bestimmte mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit verwendet werden. Diese Vorgehensweise besitzt den Vorteil der einfacheren Handhabung, da keine individuellen Fahrzeuggeschwindigkeiten, sondern nur Ein- bzw. Ausfahrorte und -zeiten in der Zeit-Weg-Fläche bekannt sein müssen. Allerdings wird damit die Mittelung zwischen den Verhältnissen im Hin- und Rückflug vorgenommen, da die so bestimmte mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit für zwei Flüge (und damit zur Berechnung zweier Dichtewerte) verwendet werden muß.

Falls die individuellen Fahrzeuggeschwindigkeiten zum Zeitpunkt des Überflugs durch das Beobachtungsflugzeug verfügbar sind, sollten deshalb die nach 5.2 (g) oder 5.2 (h) bestimmten mittleren momentanen Geschwindigkeiten aus der bewegten Geschwindigkeitsmessung (beim Hin- oder Rückflug) verwendet werden. Auf diesem Weg ergeben sich präzise Dichtewerte.

Die so gewonnenen Verkehrsdichten lassen erste Schlüsse auf den aktuellen Verkehrszustand zu; wiederholtes Überfliegen der Strecke läßt den zeitlichen Verlauf ("Ganglinien") dieser Kenngröße erkennen. Selbstverständlich kann das beschriebene Verfahren auch für beliebige Teilstrecken der gesamten Untersuchungsstrecke X verwendet werden; die auf der Teilstrecke beobachteten Fahrzeuge sind dort mit der jeweiligen Länge in (61) einzusetzen. Allerdings sollten die Teilstrecken bei freiem Verkehrsablauf nicht kleiner als etwa 500 m bis 1.000 m (je nach Verkehrszustand) sein, da sonst ggf. keine oder nur sehr wenige Fahrzeuge erfaßt werden. Bei hohem Verkehrsaufkommen oder im Staubereich kann die Länge der zugrundegelegten Teilstrecken dagegen bis auf ca. 100 m sinken.

Die errechneten Verkehrsdichten für Teilstrecken sind voneinander unabhängig (niemals werden Fahrzeuge mehrfach erfaßt). Unter Verwendung der Werte für mehrere Flüge bzw. Teilstrecken können entzerrte Verkehrsdichtekarten oder Blockdiagramme (s. Abschnitt 7) erstellt werden. Aus solchen Karten lassen sich Aussagen über Verkehrszustand, zeitliche oder räumliche Einflußgrößen sowie über Parameter wie Dichtewellengeschwindigkeit o.ä. ableiten.

5.3.4 Bestimmung der Verkehrsdichte bei allen anderen Beobachtungsarten

Prinzipiell ist die Verkehrsdichte als "momentane" Größe definiert. Liegen andere Beobachtungen vor, so kann die Verkehrsdichte "k" wie folgt bestimmt werden:

- **Vorliegen einer lokalen Beobachtung:**
Liegt eine lokale Beobachtung vor, kann nach (11) eine mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m und daraus eine theoretische Verkehrsdichte $k = q/\bar{v}_m$ errechnet werden.
- **Vorliegen einer räumlich-zeitlichen Beobachtung:**
Steht eine räumlich-zeitliche Beobachtung zur Verfügung, so ist keine Umrechnung notwendig.
Die Argumentationsweise entspricht den in Abschnitt 4.4.4 getroffenen Überlegungen zur Umrechnung momentaner und räumlich-zeitlicher Größen. Unter Verwendung von (49) bzw. nach (50 - 54) ergibt sich:

$$k_m^{global} = \frac{\sum_i \frac{\Delta t_i}{T} \cdot L}{L \cdot X} = \frac{\frac{L}{T} \sum_i \Delta t_i}{L \cdot X} = \frac{\sum_i \Delta t_i}{T \cdot X} \quad (= k_{RZ}) \quad (62)$$

Die ‐globale‐ momentane Verkehrsdichte entspricht exakt der Definition der räumlich-zeitlichen Verkehrsdichte. Umrechnungen sind nicht notwendig. (Dies war zu erwarten, da auch die Geschwindigkeitsverteilungen für beide Beobachtungen identisch sind.)

5.4 Berechnung der (lokalen) Verkehrsstärke

In der Regel erfolgt die Berechnung der Verkehrsstärke ‐q‐ (s. Def. 13) aus lokalen Beobachtungen. Da bei Beobachtungen aus der Luft – je nach Ansatz – entweder momentane oder ‐bewegte‐ Kenngrößen errechnet werden, ist die Verkehrsstärke zunächst nicht bestimmbar. Allerdings bieten sich zwei Wege an, ‐q‐ aus der Zahl der in Luftbildern beobachteten Fahrzeuge zu bestimmen: Je nach Einsatzbereich kann die Verkehrsstärke entweder

- unter Verwendung einer zusätzlichen Querschnittszählung bei der Einfahrt der Fahrzeuge oder
- über die ‐Zustandsgleichung‐ $q = k \cdot \bar{v}_m$ bestimmt werden.

5.4.1 Bestimmung der Verkehrsstärke aus bewegten Beobachtungen

Die Verkehrsstärke an einem beliebigen Querschnitt x_j kann auf die folgende Art aus bewegten Beobachtungen ermittelt werden.

Zunächst sind für den Beobachtungsquerschnitt x_j die Zeiten zu bestimmen, an denen das Flugzeug den Querschnitt überflog. Dies kann direkt aus der Beobachtung oder unter Verwendung der Fluggeschwindigkeiten geschehen:

$$t_j^H = \frac{x_j}{v_F^H}$$

$$t_j^R = \frac{X}{v_F^R} + \frac{X-x_j}{-v_F^R} = \frac{X}{v_F^R} + \frac{X}{-v_F^R} - \frac{x_j}{-v_F^R} = t_F + \frac{x_j}{v_F^R} \quad (v_F^R < 0)$$

Dabei gibt t_j^H an, wann x_j auf dem Hinflug passiert wurde. Der entsprechende Wert für die Befliegung von x_j auf dem Rückflug wird t_j^R genannt. t_F stellt die Flugzeit für einen gesamten Flug dar. Für die Zeit zwischen dem Befliegen von x_j auf einem Hin- und dem nächsten Rückflug gilt dann:

$$q^{H,R}(x_j) = \frac{n_j^R + n_j^H - h}{t_j^R - t_j^H} \quad (63)$$

Hierbei ist $t_j^R > t_j^H$; "h" entspricht der Gesamtzahl aller auf dem Hinflug beobachteten Fahrzeuge, "r" der Zahl aller Fahrzeuge des Rückflugs. Zur Erklärung der Fahrzeugzählgrößen sei auf Abb. 12 verwiesen. Allgemein gibt n_j^R die Zahl der Fahrzeuge an, die vom Beginn des Rückflugs bis zum Zeitpunkt t_j^R beobachtet wurden. n_j^H steht für die Zahl der Fahrzeuge, die vom Beginn des Hinflugs bis zum Zeitpunkt t_j^H erfaßt wurden.

Analog kann für die Zeit zwischen einem Rückflug ("R") und dem darauffolgenden Hinflug ("H + 1") vorgegangen werden. t_j^{H+1} gibt die Zeit des Überflugs von Querschnitt j auf dem darauffolgenden Hinflug, t_j^R die entsprechende Zeit des vorhergehenden Rückflugs an ($t_j^{H+1} > t_j^R$). Es gilt:

$$q^{R,H+1}(x_j) = \frac{r - n_j^R - n_j^{H+1}}{t_j^{H+1} - t_j^R} \quad (64)$$

Die auf diese Weise gewonnenen Verkehrsstärken spiegeln unterschiedlich große Zeitintervalle wider. Liegt der Querschnitt x_j am Beginn oder am Ende der Untersuchungsstrecke, so kann nur einer der beiden Werte q^{HR} bzw. q^{RH} berechnet werden. Nur wenn x_j in der Mitte der Strecke X liegt, ist das Zeitintervall für beide Größen gleich groß. Es wäre allerdings wünschenswert, wenn alle Verkehrsstärken auf gleichgroßen Zeitintervallen basieren würden. Dies kann dadurch erreicht werden, daß immer ein kompletter "Flug" (bestehend aus Hin- und Rückflug) betrachtet wird. Die Zeitdauer eines Fluges beträgt:

$$t_F = t^H + t^R = \frac{X}{v_F^H} + \frac{X}{-v_F^R} \quad (65)$$

Dann gilt :

$$q(x_j) = \frac{n_j^R - h + n_j^H}{t^F} + \frac{r - n_j^R - n_j^{H+1}}{t^F} = \frac{r - h + n_j^H - n_j^{H+1}}{t^F} \quad (66)$$

(analog kann $q(x_j)$ auch für die Zeit zwischen zwei Rückflügen errechnet werden).

Auch hier zeigt sich, daß während eines gesamten Fluges (r-h) Fahrzeuge den Ein-fahrquerschnitt passieren. Fließenden Verkehr vorausgesetzt, wären an jedem Quer-schnitt der Untersuchungsstrecke ebenfalls (r-h) Fahrzeuge zu erwarten. Zur Be-stimmung exakter Werte genügt dieser “zu erwartende” Wert nicht; er muß noch um $(n_j^H - h_j^{H+1})$ Fahrzeuge korrigiert werden; erst dann ergibt sich die aktuelle (lokale) Verkehrsstärke am Querschnitt x_j .

Damit ist für jeden Querschnitt die Verkehrsstärke bestimmbar; Untersuchungen zur Änderung der Verkehrsstärke entlang des Weges (Verkehrsstärkeprofil) können durchgeführt werden. Allerdings repräsentieren die so ermittelten Werte die Ver-kehrssituation am Querschnitt nur, wenn davor und danach keine Fahrzeuge die Fahrbahn verlassen haben oder auf sie aufgefahren sind.

5.4.2 Bestimmung einer “theoretischen Verkehrsstärke” aus bewegten Beobachtungen

Daneben kann die Verkehrsstärke auch auf dem Umweg über die Berechnung der Verkehrsdichte und der mittleren momentanen Geschwindigkeit aus bewegten Be-obachtungen bestimmt werden:

- Aus der bewegten Beobachtung wird zunächst die mittlere, momentane Ge-schwindigkeit des beobachteten Fahrzeugkollektivs bestimmt. Gleichzeitig wird (siehe dazu 5.3) für den gesamten Streckenabschnitt (“X”) die Ver-kehrsdichte k errechnet. Es ergibt sich dann:

$$q^{theor.} = k \cdot \bar{v}_m = \frac{n^H}{X} \cdot \frac{v_F}{v_F - \bar{v}_m} \cdot \frac{v_F \cdot \sum_v \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)}{1 + \sum_v \frac{v}{v_F - v} \cdot g_{bew}(v)} \quad (67)$$

(67) gilt für Rück- und für Hinflüge, da im Rückflug v_F mit negativem Vor-zeichen in die Formel eingeht.

Dieser “theoretische Verkehrsstärkewert” ist allerdings vergleichsweise ungenau, da die fehlerbehaftete Messung der Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten verwendet wird. Zwar kann damit die Verkehrsstärke für beliebige Streckenabschnitte berechnet werden, aber es ist fraglich, ob die so bestimmten Werte auch tatsächlich auftraten. Der Umweg über momentane Werte ergibt deshalb lediglich einen Schätzwert für die Verkehrsstärke.

5.4.3 Vergleich von MOVING-OBSERVER und bewegter Beobachtung

Die von CHARLESWORTH (1954) vorgestellte MOVING-OBSERVER-Methode gestattet Berechnungen von Verkehrsstärke und mittlerer Reisezeit (und damit der mittleren Geschwindigkeit) aus den Beobachtungen, die während zweier Meßfahrten eines im Verkehrsstrom mitfahrenden Fahrzeugs erfolgen. Eine Beschreibung des Verfahrens sowie der durch mehrfache Messungen erzielbaren Genauigkeit findet sich z.B. bei BLEHER (1987).

Im folgenden wird gezeigt, daß die aus den Befliegungen abgeleiteten Verkehrsgrößen mit den nach der MOVING-OBSERVER-Methode ermittelten Parametern übereinstimmen.

In der MOVING-OBSERVER-Methode wurden ermittelt:

- M_p : Anzahl der Fahrzeuge, von denen das Beobachtungsfahrzeug auf der Hinfahrt überholt wurde (passiv)
- M_a : Anzahl der Fahrzeuge, die das Beobachtungsfahrzeug auf der Hinfahrt überholte (aktiv)
- v_{MO}^H : Geschwindigkeit des Beobachtungsfahrzeugs auf der Hinfahrt
- v_{MO}^R : Geschwindigkeit des Beobachtungsfahrzeugs auf der Rückfahrt
- E : Anzahl der Fahrzeuge, die dem Beobachtungsfahrzeug auf der Rückfahrt entgegen kamen

Die zugrundeliegende Verkehrssituation sei stationär und wird beschrieben durch die Parameter q , k und \bar{v}_m . Die Bezeichnungen für die Parameter v_F^H , v_F^R , h und r der bewegten Beobachtung bleiben unverändert.

Zunächst wird gezeigt, daß aus den Luftbilddaten errechnete Verkehrsstärken mit den Ergebnissen der MOVING-OBSERVER-Methode übereinstimmen:

$$q \text{ (aus Hin-/Rückflügen)} = q \text{ (M.O.- Methode)}$$

Nach (61) gilt für die beobachteten Fahrzeugmengen "h" und "r":

$$h = k \cdot X \cdot \left(1 - \frac{\bar{v}_m}{v_F^H}\right) \quad (68)$$

$$r = k \cdot X \cdot \left(1 - \frac{\bar{v}_m}{v_F^R}\right) \quad (v_F^R < 0) \quad (69)$$

Verschiedene Erweiterungen und Umformungen ergeben:

$$\begin{aligned}
q(\text{aus Hin-/Rückflügen}) &= \\
&= k \cdot \bar{v}_m = \frac{k \cdot \bar{v}_m \cdot v_F^H \cdot v_F^R (v_F^R - v_F^H) \cdot X}{v_F^H \cdot v_F^R (v_F^R - v_F^H) \cdot X} \\
&= \frac{k \cdot X \cdot \bar{v}_m \cdot v_F^H \cdot v_F^R}{X \cdot (v_F^R - v_F^H)} \cdot \left(\frac{1}{v_F^H} - \frac{1}{v_F^R} \right) \\
&= \frac{v_F^H \cdot v_F^R}{X \cdot (v_F^R - v_F^H)} \cdot \left(k \cdot X \cdot \frac{\bar{v}_m}{v_F^H} - k \cdot X \cdot \frac{\bar{v}_m}{v_F^R} - k \cdot X + k \cdot X \right) \\
&= \frac{v_F^H \cdot v_F^R}{X \cdot (v_F^R - v_F^H)} \cdot \left[k \cdot X \cdot \left(\frac{\bar{v}_m}{v_F^H} - 1 \right) + k \cdot X \cdot \left(-\frac{\bar{v}_m}{v_F^R} + 1 \right) \right] \\
&= \frac{v_F^H \cdot v_F^R}{X \cdot (v_F^R - v_F^H)} \cdot [r - h] = \frac{-h + r}{t^H + t^R} \quad (70)
\end{aligned}$$

Bei Beobachtungen vom fliegenden Flugzeug aus (bzw. bei M.O.-Messfahrten mit entsprechender Fahrzeuggeschwindigkeit) wird der Beobachter nicht von anderen Fahrzeugen überholt ($M_p = 0$). Die Anzahl der auf der Hinfahrt bzw. im Hinflug insgesamt beobachteten Fahrzeuge ist damit "aktiv" überholt worden ($M_a = h$). Alle im Rückflug beobachteten Fahrzeuge werden auch bei der Rückfahrt des M.O. erfaßt ($r=E$).

Die Zeit, die der Beobachter für die Strecke X benötigt, beträgt auf der Hin- bzw. Rückfahrt:

$$t^H = \frac{X}{v_F^H} \quad t^R = -\frac{X}{v_F^R}$$

Damit gilt:

$$q(\text{aus Hin-/Rückflügen}) = \frac{-h + r}{\frac{X}{v_F^H} - \frac{X}{v_F^R}} = \frac{0 - M_a + E}{t_{M.O.}^H + t_{M.O.}^R}$$

Die rechte Seite der Gleichung entspricht der Definition zur Bestimmung der Verkehrsstärke aus M.O.-Messungen. Damit sind die nach beiden Ansätzen bestimmten Verkehrsstärken gleich. Der Beweisweg ist (unter den genannten Voraussetzungen, insb. $M_p = 0$) umkehrbar.

Identische Werte ergeben sich selbstverständlich auch für die mittlere Reisezeit (bzw. Geschwindigkeit) des beobachteten Fahrzeugstroms. Es ist zu zeigen:

$$\bar{t}(\text{aus Hin-/Rückflug}) = \frac{X}{\bar{v}_m} = \bar{t} \quad (\text{M.O.-Methode})$$

Dazu wird zunächst wiederum erweitert und umgeformt:

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \frac{X}{\bar{v}_m} = \frac{X \cdot (v_F^R \cdot v_F^H) \cdot (v_F^R - v_F^H + \bar{v}_m - \bar{v}_m)}{\bar{v}_m \cdot (v_F^R \cdot v_F^H) \cdot (v_F^R - v_F^H)} \\ &= \frac{\frac{X}{v_F^R \cdot v_F^H} \cdot (v_F^R - \bar{v}_m) - \frac{X}{v_F^H \cdot v_F^R} \cdot (v_F^H - \bar{v}_m)}{\frac{\bar{v}_m \cdot v_F^R}{v_F^R \cdot v_F^H} - \frac{\bar{v}_m \cdot v_F^H}{v_F^R \cdot v_F^H} - 1 + 1} \\ &= \frac{\frac{X}{v_F^H} \cdot (1 - \frac{\bar{v}_m}{v_F^R}) - \frac{X}{v_F^R} \cdot (1 - \frac{\bar{v}_m}{v_F^H})}{(1 - \frac{\bar{v}_m}{v_F^R}) - (1 - \frac{\bar{v}_m}{v_F^H})} \cdot \frac{k \cdot X}{k \cdot X} \end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung von (68) bzw. (69) ergibt sich für die mittlere Reisezeit:

$$\bar{t} = \frac{\frac{X \cdot r}{v_F^H} - \frac{X \cdot h}{v_F^R}}{r - h}$$

Auch hier ist wieder die Fluggeschwindigkeit größer als alle Fahrzeuggeschwindigkeiten und deshalb $M_p = 0$. Die Anzahl der Fahrzeuge, die der Beobachter im Hinflug (aktiv) passiert, beträgt $M_a = h$; im Rückflug werden $E=r$ Fahrzeuge erfaßt. Damit gilt für $v_F^R < 0$:

$$\bar{t} = \frac{r \cdot (\frac{X}{v_F^H}) - (0 - h) \cdot \frac{X}{-v_F^R}}{(0 - h) + r} = \frac{E \cdot \frac{X}{v_F^H} - (M_p - M_a) \cdot (\frac{X}{-v_F^R})}{M_p - M_a + E}$$

Die rechte Seite der Gleichung entspricht der Definition der mittleren Reisezeit für Fahrzeuge aus M.O.-Beobachtungen. Der Beweisgang ist auch hier umkehrbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- Die bewegte Beobachtung entspricht einer MOVING-OBSERVER-Messung mit spezieller (sehr großer) Geschwindigkeit des Beobachters auf der Hinfahrt.

- Nach der M.O.-Methode kann die Verkehrsstärke, die mittl. Fahrzeuggeschwindigkeit und die mittl. Reisezeit für die Untersuchungsstrecke X bestimmt werden. Diese Größen sind mit den aus der Befliegung errechneten Größen identisch.
- Aus der Verkehrsbeobachtung vom Flugzeug aus lassen sich ungleich mehr und aussagekräftigere Verkehrsgrößen (Geschwindigkeitsverteilungen, Verkehrsdichten, Fahrstreifenverteilungen, o.ä.) bestimmen als aus MOVING-OBSERVER-Messungen.
- Die in der Praxis bei instationärem Verkehr notwendige Zahl von Beobachtungsfahrten/-flügen nach der M.O.-Methode zur Erzielung einer bestimmten statistischen Genauigkeit kann mit dem bei BLEHER (1987) vorgestellten Ansatz bestimmt werden und gilt damit auch für bewegte Beobachtungen vom Flugzeug aus.

5.5 Berechnung räumlich-zeitlicher Verkehrsgrößen

Wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben, können aus den Aufnahmen des Beobachtungsflugzeugs nur Informationen über den Verkehr in relativ kleinen (räumlich-zeitlichen) Teilbereichen der T-X-Ebene gewonnen werden. In Abschnitt 4.4.4 wurde deshalb ein Verfahren vorgestellt, das aus der Beobachtung von Fahrzeugen an den Rändern eines speziell definierten Untersuchungsbereichs räumlich-zeitliche Kenngrößen bestimmt und damit auch auf die Verkehrssituation im Innern dieses Bereichs schließen läßt.

Hierzu wird aus den Beobachtungen im Hin- bzw. Rückflug die insgesamt von allen "h" Fahrzeugen zurückgelegte Fahrstrecke bzw. die Summe der dafür benötigten Verweilzeiten bestimmt (s. Abschnitt 4.4.1). Unter Verwendung dieser "Gesamtfahrstrecken" bzw. "Gesamtverweilzeiten" und der nach (45) bestimmten Größe der überwachten Zeit-Weg-Fläche ergibt sich nach (37) bis (39):

- j) die mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit
- k) die mittlere räumlich-zeitliche Verkehrsstärke
- l) die mittlere räumlich-zeitliche Verkehrsdichte.

Von großer Bedeutung für die Aussagekraft der so bestimmten räumlich-zeitlichen Werte sind:

- die Berechnung der den Auswertungen zugrundeliegenden Beobachtungsfläche F nach (45) sowie
- die Bestimmung des Anteils dieser Beobachtungsfläche F an der gesamten Fläche A der T - X -Ebene nach (46).

Sinkt dieser Anteil, so sinkt auch die Aussagekraft der räumlich-zeitlichen Werte. Unterschreitet der Anteil an der $T - X$ -Fläche eine bestimmte Grenze oder sind (z.B. durch fehlerhaftes Bildmaterial) auch Fahrzeugpositionen bzw. Ein- und Ausfahrzeitpunkte nicht feststellbar, so kann lediglich noch eine Schätzung für \bar{v}_{RZ} getroffen werden:

m) Näherung für \bar{v}_{RZ} aus der Fahrlinie des "h"-ten Fahrzeugs:

Dazu müssen lediglich Ort und Zeit des Überflugs von Fahrzeug 1 auf dem Hinflug und des "h"-ten Fahrzeugs auf dem Rückflug bekannt sein. Es gilt:

$$\bar{v}_{RZ} \simeq \frac{x_h^R - x_1^H}{t_h^R - t_1^H} \quad (71)$$

Diese mittlere Reisegeschwindigkeit des "ersten" (auf dem Hinflug erfaßten) Fahrzeugs ist eine gute Näherung für die mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit. Sie verläuft - sofern "h" genügend groß ist - annähernd parallel zu der in 4.4.4 beschriebenen Fahrlinie des "imaginären" Fahrzeugs. Auch hier ist beim Rückflug nicht das erste beim Hinflug erfaßte Fahrzeug wiederzufinden; es wird dabei lediglich die Position des zufällig "h"-ten Fahrzeugs verwendet. Aktive und passive Überholungen bewirken, daß auf dem Rückflug andere Fahrzeuge an die Stelle des ersten Fahrzeugs treten. Dadurch ergibt sich die "mittlere Geschwindigkeit".

Weitere räumlich-zeitliche Größen, insbesondere eine Geschwindigkeitsverteilung, sind noch nicht bestimmbar.

5.6 Berechnung sonstiger Parameter

Selbstverständlich können aus Luftaufnahmen, in denen der Verkehrsablauf zunächst nur gespeichert wird, eine Vielzahl weiterer Verkehrsparameter errechnet werden. So kann die im jeweiligen Anwendungsfall vorliegende Aufgabenstellung Spezialauswertungen des aufgenommenen Bildmaterials auf zusätzliche Größen hin notwendig machen, die sich i.d.R. ebenfalls aus dem Datenmaterial ableiten lassen.

In der vorliegenden Untersuchung wird nicht auf die individuelle Bestimmung jeder einzelnen Größe eingegangen. Es kann allerdings ein System von drei unterschiedlichen Gruppen von Verkehrsgrößen angegeben werden, für die jeweils der Rechenweg zur Bestimmung der jeweiligen Größen skizziert wird.

5.6.1 Einteilung der Verkehrsgrößen in drei Gruppen

Die drei Gruppen werden in dieser Arbeit wie folgt definiert:

Gruppe 1: Direkt aus den Eingangsdaten oder einem Einzelbild ableitbare Größen; insbesondere "bewegte" Geschwindigkeitskennwerte (z.B. für Fahrzeugteilkollektive).

Gruppe 2: Größen, die momentan vorliegenden Verhältnissen entsprechen oder momentanen Charakter besitzen. Bei der Berechnung dieser Größen müssen die in bewegten Beobachtungen auftretenden systematischen Verzerrungen für das Erfassen bestimmter Geschwindigkeitsklassen eliminiert werden. In diese Gruppe fallen Größen, die mit der "Geschwindigkeit" korreliert sind, insbesondere alle Fahrzeuganteile (Lkw-Anteil, Aufteilung auf Fahrstreifen o.ä.) sowie daraus abgeleitete Größen.

Gruppe 3: Größen, die sich auf Besonderheiten der individuellen Bewegungslinien einzelner Fahrzeuge stützen. Zur Bestimmung solcher Größen reichen die Daten der bewegten Beobachtung allein nicht aus, da die Form der individuellen Fahrt – zumindest annähernd – bekannt sein muß.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind im folgenden die wichtigsten Parameter jeder Gruppe zusammengestellt:

Gruppe 1:

- fahrstreifenspezifische Geschwindigkeitskenngrößen,
- Geschwindigkeitskenngrößen für Pkw/Lkw oder andere Fahrzeugkollektive (je nach Definition)
- Stichproben tatsächlich realisierter Abstände zwischen Fahrzeugen

Gruppe 2:

- Lkw-Anteile, Kraftrad-Anteile o.ä.,
- Aufteilung der Fahrzeuge auf gewisse Fahrstreifen,
- durchschnittliche Fahrzeuglänge, Fahrzeuggröße sowie Bestimmung der Anzahl der mit Anhänger fahrenden Lkw,
- Abstandsverteilungen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Gruppe 3:

- Schätzung des “Beschleunigungsrauschens” (Standardabweichung der individuellen Fahrzeugbeschleunigungen, siehe WINZER (1980)),
- Zahl der auf die Untersuchungsstrecke auffahrenden bzw. der sie verlassenden Fahrzeuge,
- Zahl der (aktiven bzw. passiven) Überholungen,
- Abstandsverhalten aller Fahrzeuge über Zeit und Weg,
- räumliche und/oder zeitliche Einflüsse auf die Verkehrsdaten oder
- die generelle Bestimmung von Zeit-Weg-Fahrlinien von Fahrzeugkollektiven.

Für jede Gruppe wird im folgenden der hierfür gültige Rechenweg skizziert.

5.6.2 Bestimmung von Größen aus Gruppe 1

Parameter dieser Gruppe können direkt – ggf. durch Auswertungen von einzelnen Luftbildern oder Fahrzeugteilkollektiven – aus bewegten Beobachtungen gewonnen werden. In diese Gruppe fallen z.B. Mindestabstände zwischen Fahrzeugen, fahrestreifenspezifische Geschwindigkeitskenngrößen oder Parameter für einzelne Fahrzeuggruppen. Erhoben werden dazu “bewegte Größen”, die ggf. in momentane Parameter umzurechnen sind (s. Abschnitt 4.3).

5.6.3 Bestimmung von Größen aus Gruppe 2

Die Parameter dieser Gruppe werden bestimmt, indem zunächst die Häufigkeit des Auftretens des jeweiligen Merkmals aus den bewegten Beobachtungen (in der Regel durch Auszählen) bestimmt wird. Diese beobachteten Häufigkeiten entsprechen aber nicht der momentan (oder lokal) zu erwartenden Wahrscheinlichkeit für

das Auftreten der gesuchten Eigenschaft, da die Anzahl der erfaßten Fahrzeuge eine Funktion der Flug- und Fahrzeuggeschwindigkeiten ist. Dieser Einfluß der Beobachtungs- und der individuellen Fahrzeuggeschwindigkeit kann wie folgt eliminiert werden:

Bekannt seien alle Fahrzeuge der Beobachtung ($1 \dots n$) sowie die Fahrzeuge, die die besondere, auszuwertende Eigenschaft besitzen ($1 \dots u$) mit $u \leq n$. Für alle "n" beobachteten Fahrzeuge wird zunächst aus den beobachteten Fahrgeschwindigkeiten die Verteilung $g_{bew}(v)$ bestimmt, aus der nach (23), (26) und (25) die mittlere momentane Geschwindigkeit bestimmt wird. Unter Verwendung von (19) und (24) oder (29) und (35) kann die momentane (oder lokale) Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fahrzeugen bestimmter Geschwindigkeiten $g_m(v)$ (bzw. $g_l(v)$) errechnet werden.

Im nächsten Schritt werden ausschließlich die "u" Fahrzeuge mit der jeweiligen Eigenschaft betrachtet. Zunächst wird für jede Geschwindigkeitsklasse "v" ($0 \leq v \leq v_{max}$) der Anteil dieser "u" zu untersuchenden Fahrzeuge an der Anzahl aller beobachteten Fahrzeuge in der jeweiligen Geschwindigkeitsklasse bestimmt:

$$u(v) = \frac{\text{Anz. Fz mit Geschw. "v" aus } (1 \leq i \leq u)}{\text{Anz. Fz mit Geschw. "v" aus } (1 \leq i \leq n)} \leq 1$$

Im letzten Schritt werden die Wahrscheinlichkeiten $u(v)$ mit der momentanen Wahrscheinlichkeit $g_m(v)$ multipliziert und das Produkt über alle Geschwindigkeitsklassen aufaddiert. Es ergibt sich der Erwartungswert für das Auftreten von Fahrzeugen mit der Eigenschaft "U":

$$E_m(U) = \sum_{v=0}^{v_{max}} (u(v) \cdot g_m(v)) \quad (72)$$

Ein Beispiel erläutert das Vorgehen. Es ist zu berechnen, wie groß

- der Lkw-Anteil und
- der Anteil der Fahrzeuge, die kürzer als 4 m sind,

zu einem bestimmten Zeitpunkt auf der Strecke sind. Dazu werden Befliegungen dieses Streckenabschnitts durchgeführt; unterstellt wird Stationarität (der Geschwindigkeitsverteilungen und der gesuchten Anteilswerte). Die bewegte Beobachtung im Hinflug ergab:

Fahrzeug 1:	Pkw	$v = 30\text{m/s}$	Länge = 3m
Fahrzeug 2:	Lkw	$v = 20\text{m/s}$	Länge = 10m
Fahrzeug 3:	Pkw	$v = 20\text{m/s}$	Länge = 6m
Fahrzeug 4:	Pkw	$v = 25\text{m/s}$	Länge = 5m

Es gilt: $g_{bew}(20) = 0,50$; $g_{bew}(25) = 0,25$; $g_{bew}(30) = 0,25$; $\bar{v}_{bew} = 23,75\text{m/s}$

Nach (23), (26) und (25) ergibt sich bei $v_F^H = 50\text{m/s}$: $\bar{v}_m = 24,5\text{m/s}$

Die momentanen Wahrscheinlichkeiten betragen nach (19) und (24):

$$g_m(20) = 0,425; \quad g_m(25) = 0,255; \quad g_m(30) = 0,320$$

Weiter sind die Anteile von "Lastkraftwagen" bzw. von "Fahrzeugen kleiner als 4 m" in den einzelnen Geschwindigkeitsklassen bekannt:

$$\begin{aligned} u(\text{Lkw}, v=20) &= 0,5 & u(\text{Fz} < 4\text{m}, v=20) &= 0,0 \\ u(\text{Lkw}, v=25) &= 0,0 & u(\text{Fz} < 4\text{m}, v=25) &= 0,0 \\ u(\text{Lkw}, v=30) &= 0,0 & u(\text{Fz} < 4\text{m}, v=30) &= 1,0 \end{aligned}$$

Da es sich hierbei um bedingte Wahrscheinlichkeiten handelt (Anteil von Lkw in einer Geschwindigkeitsgruppe), kann es durchaus geschehen, daß die Summe aller Wahrscheinlichkeiten kleiner als Eins wird (s. erstes Kriterium).

Damit kann auf dem Hinflug der momentane Anteil an Lkw bestimmt werden:

$$\begin{aligned} E_m(\text{Lkw}) &= \sum (u(v) \cdot g_m(v)) \\ &= 0,5 \cdot 0,425 + 0 \cdot 0,255 + 0 \cdot 0,320 = 0,2125 \end{aligned}$$

Der Lkw-Anteil der bewegten Beobachtung betrug 25 %, während momentan nur 21,25 % aller tatsächlich auf der Strecke vorhandenen Fahrzeuge Lastkraftwagen waren. Im Beispiel beträgt die Abweichung ca. -15 %.

Ebenso wird bei den Fahrzeugen, die kürzer als 4 m sind, vorgegangen:

$$\begin{aligned} E_m(\text{Fz} < 4\text{m}) &= \sum (u(v) \cdot g_m(v)) \\ &= 0 \cdot 0,425 + 0 \cdot 0,255 + 1 \cdot 0,320 = 0,320 \end{aligned}$$

Der Anteil dieser Fahrzeuge an der bewegten Beobachtung betrug ebenfalls 25%, aber zu einem festen Zeitpunkt sind 32% aller Fahrzeuge auf der Strecke kürzer als 4 m. Der Unterschied beträgt im Beispiel ca. 28%.

Dies hat auch Konsequenzen bezüglich der mittleren Fahrzeuglänge. Aus der bewegten Beobachtung läßt sich eine mittlere Fahrzeuglänge von $(3+10+6+5)/4 = 6$ m vermuten. Tatsächlich beträgt diese zu einem festen Zeitpunkt ca. 5,6 m. Hier beträgt der Unterschied ca. -6% oder -40 cm.

Auf diese Weise können aussagekräftige Anteilswerte bzw. "momentane" Größen bestimmt werden. Bei den Größen dieser Gruppe hängen die Unterschiede zwischen beobachteten und momentanen Werten stark von der Verkehrssituation ab.

5.6.4 Bestimmung von Größen aus Gruppe 3

Alle weitergehenden Fragestellungen beruhen auf fahrzeugcharakteristischen Besonderheiten des einzelnen Fahrzeugs und damit auf der individuellen Zeit-Weg-Bewegungslinie. Deshalb sind die darauf basierenden Größen (Gruppe 3) nicht allein aus der stichprobenhaften Beobachtung in kurzen Momenten des Hin- oder Rückflugs ableitbar. Voraussetzung für ihre Berechnung ist die - zumindest näherungsweise - Bestimmung der Zeit-Weg-Bewegungslinien.

Zwar werden in aufeinanderfolgenden Flügen Fahrzeuge mehrfach beobachtet, es ist aber unklar, welches Fahrzeug aus dem Hinflug einem Fahrzeug des Rückflugs entspricht. Es wird deshalb eine Methode benötigt, die mehrfach beobachtete Fahrzeuge einander zuordnet.

In Kapitel 6 wird deshalb ein Verfahren beschrieben, das die (angenäherte) Berechnung von Fahrzeug-Bewegungslinien erlaubt. Dadurch entsteht ein Datensatz, der den Verkehrsablauf in seiner Gesamtheit beschreibt und auch die Bestimmung der in Gruppe 3 eingeordneten Verkehrsgrößen ermöglicht.

6 Verfahren zur Bestimmung von Bewegungslinien

Bei einer Reihe unterschiedlicher Verkehrsüberwachungs- oder -beobachtungsaufgaben stellt sich das Problem, mehrfach erfaßte Fahrzeuge einander richtig zuzuordnen. Obwohl die im jeweiligen Anwendungsfall vorliegenden Randbedingungen oft verschieden sind, ist die zugrundeliegende Aufgabe im Prinzip stets gleich: Ein in einer bestimmten Beobachtung erfaßtes Fahrzeug muß in der Menge der in einer zweiten Beobachtung erfaßten Fahrzeuge wiederentdeckt werden (und umgekehrt).

Für dieses Problem wird im folgenden ein Lösungsverfahren vorgestellt. Dazu wird zunächst das Grundproblem formuliert und auf die charakteristischen Eigenschaften der Anwendungen eingegangen. Nach der Beschreibung der verwendeten Eingangsdaten werden Struktur und Vorgehen des Zuordnungsprogramms erläutert. Wegen der Bedeutung für nachgeordnete Auswerteprogramme wird auf das Ergebnis des Verfahrens gesondert eingegangen. Eine Beschreibung möglicher Einsatzfelder schließt sich an.

6.1 Problemdefinition

Allgemein läßt sich das Problem wie folgt definieren:

- Im Rahmen von Verkehrsuntersuchungen erfolgten zwei (oder mehr) Verkehrsbeobachtungen. Innerhalb dieser Beobachtungen wurden zumindest teilweise identische Fahrzeugkollektive sowie gewisse charakteristische Daten dieser Fahrzeuge erfaßt.

“Beobachtungen” in diesem Sinn sind etwa:

- Die Erfassung von Fahrzeugen bei der Ein- oder Ausfahrt, ggf. auch innerhalb eines definierten Bereichs.
- Die Messung von Fahrzeugdaten (Geschwindigkeit, Länge o.ä.) an aufeinanderfolgenden Meßquerschnitten (z.B. zur Bestimmung von Fahrprofilen).
- Die Beobachtung von Fahrzeugen während des Hin- und Rückflugs eines Beobachtungsflugzeugs.

- Die Bestimmung von Fahrzeugen, die definierten wiederkehrenden Fahrtmustern auf einem bestimmten Streckenabschnitt folgen.

Bei allen Anwendungen stellt sich das Problem, mehrfach erfaßte Objekte (Fahrzeuge) in verschiedenen Beobachtungen wiederzuerkennen und einem bestimmten "Grundtyp" zuzuordnen. Je nach Einsatzbereich können verschiedene Kriterien für die Zuordnung verwendet werden:

- Bei den Beobachtungen werden Größen wie Farbe, Länge, Typ oder andere Kennzeichen der Objekte erfaßt, auf die sich die paarweise Zuordnung stützt.
- Bei aufeinanderfolgenden Beobachtungsquerschnitten wird aus Geschwindigkeit und Beobachtungszeit am ersten eine voraussichtliche Ankunftszeit am zweiten Querschnitt prognostiziert. Das Verfahren ist auch umkehrbar: Aus Zeit und Geschwindigkeit am zweiten Querschnitt wird die Zeit geschätzt, in der die Durchfahrt am ersten Querschnitt erfolgte. Eine Kombination beider Wege verspricht den besten Erfolg.
- Sind Induktionsschleifen an mehreren Stellen verlegt, so können Verfahren verwendet werden, die für jeden Fahrzeugtyp die charakteristische Veränderung des Induktionssignals erkennen und verarbeiten (PFANNERSTILL, 1983). Durch Zuordnung verschiedener Überfahrimpulse zu einem Fahrzeugtyp entsteht ebenfalls eine Fahrzeugbewegungslinie.

In anderen Einsatzbereichen sind weitere Randbedingungen denkbar, die bei der Zuordnung der Objekte hilfreich sein können und deshalb berücksichtigt werden sollten. So schlägt z.B. BÖHNKE (1980) als Kriterium zur Wiedererkennung von Fahrzeugen ihre Position innerhalb einer Fahrzeugkolonne vor. Er nimmt an, daß sich diese Position zumindest auf kurzen Wegintervallen nur selten ändert.

Dieser Ansatz eignet sich für Strecken ohne große Intensitätsschwankungen, auf denen viele Beobachtungsquerschnitte (Induktionsschleifen) bereits existieren und auf denen Überholungen relativ selten sind. Da bei der vorliegenden Problemstellung die Fahrlinien von Einzelfahrzeugen unabhängig von lokalen Querschnitten bestimmt werden sollen, wird der von BÖHNKE vorgeschlagene Ansatz nicht verwendet. Es soll stattdessen ein Verfahren entwickelt werden, das zur Fahrzeugzuordnung die bereits vorliegenden Daten der bewegten Beobachtung verwendet.

6.2 Vorgehen

Mathematisch handelt es sich bei der beschriebenen Fragestellung um ein Zuordnungs-("ASSIGNMENT-")Problem:

Ein gewisses Objekt (Typ) ist eindeutig einer bestimmten oder keiner Erscheinung in jeder Beobachtung zuzuordnen. Die Zuordnung hat dabei so zu erfolgen, daß kein Fehler auftritt bzw. der Gesamtfehler (die Gesamtabweichung) aller Zuordnungen minimiert wird.

Für die Fahrzeugzuordnung ergibt sich damit bei zwei Beobachtungen ein zweidimensionales Problem. Denkbar ist, daß jedes der "n" in der ersten Messung erfaßten Objekte einem der "noch freien" Objekte der zweiten Messung zugeordnet wird. Damit ergeben sich

$$n \cdot (n - 1) \cdot (n - 2) \dots 3 \cdot 2 \cdot 1 = n!$$

zulässige Lösungen, von denen die "beste" auszuwählen ist.

Zur Bestimmung der optimalen Lösung sind verschiedene Wege gangbar:

- (a) Untersuchung aller denkbaren Fälle:
Hier werden alle möglichen Zuordnungen gebildet, ausgewertet und die insgesamt beste ausgewählt. Allerdings ist das "Durchprobieren" aller möglichen Lösungen bereits ab etwa 15 Objekten wegen der zu langen Rechenzeit (selbst schnellster Rechner) unmöglich, da sich bereits 10^{12} Möglichkeiten mit jeweils n^2 Operationen bieten würden. Dieser Weg scheidet also aus Rechenzeitgründen aus.
- (b) Simplex-Algorithmus:
Deshalb wird für das "ASSIGNMENT"-Problem in aller Regel eine Version des Simplex-Algorithmus benutzt. Diese Verfahren schreitet – bildlich gesprochen – die Ecken des "n"-dimensionalen Körpers so ab, daß in jedem Schritt eine Verbesserung des Zielfunktionswerts und damit eine Verringerung der Gesamtabweichung erreicht wird. Bei den im Verkehrsbereich vorliegenden Fällen von oft mehreren hundert Objekten ist allerdings auch dieser Weg nicht mehr gangbar (SPIVEY u. THRALL, 1970; HILLIER u. LIEBERMANN, 1980), da auch hier die Menge der zulässigen Lösungen zu groß wird.
- (c) "Branch-and-Bound"-Ansatz:
Als Ausweg werden deshalb häufig Lösungsverfahren nach der "Branch-and-Bound"-Methode ("teile und begrenze", NEUMANN, 1975) entwickelt. Das Gesamtproblem wird dabei in kleinere Teilprobleme zerlegt, die entweder weiterverfolgt oder aus verschiedenen Gründen von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen werden können.

Dieser letzte Ansatz bietet verschiedene Vorteile:

- Bei Fahrzeugzuordnungen kann sehr schnell eine große Zahl von Zuordnungen als falsch erkannt werden. Dadurch verringert sich die Problemgröße wesentlich; rasch können eingeschlagene Lösungswege verworfen (oder als aussichtsreich erkannt) werden.
- Möglicherweise reicht die Angabe einer guten, aber nicht optimalen Lösung aus. Branch-and-Bound-Verfahren erlauben durch die Wahl des Abbruchkriteriums die schnelle Berechnung “fast-optimaler” Lösungen.
- Daneben bieten die Verfahren auch die Möglichkeit, bei der Lösung von Teilproblemen errechnete Ergebnisse zu speichern und wiederzuverwenden.

In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb ein “Branch-and-Bound-Verfahren” verwendet. Dabei wird berücksichtigt, daß von Anfang an nur wenige Fahrzeugzuordnungen sinnvoll sind. Möglicherweise erlaubt bereits eine erste Überprüfung eine eindeutige Zuordnung (nur ein Fahrzeug kommt in Frage) oder die Feststellung, daß kein Partner für dieses Fahrzeug gefunden werden kann. Im ersten Programmschritt werden deshalb alle Fahrzeuge zugeordnet bzw. aussortiert, die die obigen Bedingungen erfüllen. Im Normalfall verringert sich dadurch die Problemgröße deutlich, und der Bearbeitungsaufwand sinkt auf einen Bruchteil der ursprünglichen Größe.

6.3 Eingangsdaten

In der vorliegenden Form bearbeitet das Verfahren zwei Beobachtungen, die entweder an zwei festen Querschnitten “lokal” erfolgen oder Ergebnisse von Befliegungen sind. Selbstverständlich sind auch andere Beobachtungsarten als Eingangsdaten verwendbar, etwa zwei momentane oder Kombinationen anderer Verkehrsbeobachtungen.

Es wird angenommen, daß in den Beobachtungen die folgenden Einzelfahrzeugparameter erhoben werden:

[Fz-Daten] = Zeit, Ort, Geschwindigkeit, Farbe, Größe.

- “Zeit” gibt dabei – relativ oder absolut – den Zeitpunkt der Beobachtung an,
- “Ort” ist bei lokalen Messungen der Beobachtungsquerschnitt, bei “bewegten” Messungen der aktuelle Fahrzeugstandort (absolut oder relativ),

- “Geschwindigkeit” ist die gemessene Fahrzeuggeschwindigkeit,
- “Farbe” und “Größe” beschreiben das Fahrzeug (eventuell stellt “Farbe” den Grauwert, “Größe” die Länge und/oder Breite des Fahrzeugs dar).

Die beschriebenen Daten liegen für jede der beiden Beobachtungen als geordnetes Datenfeld der Länge “n” vor.

6.4 Ablauf des Programms

6.4.1 Berechnung der “paarweisen” Abweichung

Im ersten Verfahrensschritt wird zunächst für alle möglichen Fahrzeugzuordnungen ein “Abweichungswert” errechnet. Dieser Wert gibt an, wie groß das Maß der Ähnlichkeit für jeweils zwei betrachtete Fahrzeuge ist und wird zur Messung der Güte aller Zuordnungen verwendet. Dabei werden ausschließlich Parameter wie Farbe oder Größe verwendet, da nur diese Parameter “unveränderlich” sind. Denkbar wäre auch eine Berücksichtigung der beobachteten Geschwindigkeit oder der zurückgelegten Wegstrecken; da sich diese Werte aber schnell und deutlich ändern können, werden sie nicht verwendet.

Neben diesen beiden Parametern können selbstverständlich auch alle anderen unveränderlichen, beobachteten Merkmale verwendet werden. So kann bei Kennzeichenerfassungen etwa die Übereinstimmung der Kennzeichen (ziffern- oder buchstabenweise) herangezogen werden.

Alle verwendeten Merkmale werden – sofern möglich – auf einen Mittelwert bezogen und normiert. Diese Relativierung hilft, meßtechnische Fehler (unterschiedliche Verfahren, Systemfehler, Eichfehler, Helligkeitsänderungen o.ä.) auszugleichen, während die Normierung den Einfluß der Streubreite der betrachteten Werte eliminiert.

Dieser Wert wird vom entsprechenden Wert des aktuell betrachteten Partnerfahrzeugs subtrahiert und anschließend quadriert; es ergibt sich damit ein Maß für die paarweise Abweichung eines Merkmals. Je nach Anzahl der Merkmale (Farbe, Größe, usw.), die für die Ähnlichkeit zweier Fahrzeuge zur Verfügung stehen, sind die entsprechenden Werte auch für alle anderen Merkmale zu berechnen und aufzuaddieren. Die Summe gibt an, wie groß die Ähnlichkeit der beiden aktuell betrachteten “Partnerfahrzeuge” ist. Durch Summation der Einzelabweichungen aller “n” Fahrzeugzuordnungen wird dann die Gesamtabweichung einer Lösung errechnet. Im Gegensatz zu einer multiplikativen Verknüpfung hat die Summenbildung

den Vorteil, daß möglichst vergleichbar große Einzelabweichungen bevorzugt werden und nicht eine sehr große Abweichung in einem Merkmal durch eine große Ähnlichkeit in einem zweiten kompensiert werden kann.

Für ein Merkmal ergibt sich dadurch folgende Formel:

$$\text{Abw.}(x^{(1)}, y^{(2)}) = \left[\frac{A(x)^{(1)} - \bar{A}^{(1)}}{\sigma_A^{(1)}} - \frac{A(y)^{(2)} - \bar{A}^{(2)}}{\sigma_A^{(2)}} \right]^2$$

$A(x)^{(1)}$ gibt dabei den tatsächlichen Meßwert für Fahrzeug x in der ersten Messung an; analog $A(y)^{(2)}$ für Fahrzeug y in der zweiten Messung; $\bar{A}^{(1)}$ ist der Mittelwert, $\sigma_A^{(1)}$ die Standardabweichung der ersten Meßserie für dieses Merkmal.

Diese paarweise Abweichung wird für jede Kombination eines Fahrzeugs aus der ersten mit Fahrzeugen aus der zweiten Beobachtung bestimmt. Je kleiner der Wert ist, desto ähnlicher sind zwei Fahrzeuge. Für sehr unterschiedliche Fahrzeuge wird der Wert sehr groß.

Als Beispiel soll ein PKW₁ der ersten Beobachtung mit zwei Fahrzeugen der zweiten Beobachtung (PKW₂, LKW₂) verglichen werden:

PKW₁, 3m lang PKW₂, 4,75m lang LKW₂, 17m lang

Es sei bekannt:

Mittlere Länge der Fahrzeuge:

$\bar{A}^{(1)} = 6,0$ m in erster Beobachtung (Hinflug)

$\bar{A}^{(2)} = 6,5$ m in zweiter Beobachtung (Rückflug)

Standardabweichungen der Länge:

$\sigma_A^{(1)} = 3,0$ m in erster Beobachtung

$\sigma_A^{(2)} = 3,5$ m in zweiter Beobachtung

Damit ergeben sich die folgenden Abweichungswerte für das Merkmal Länge:

$$\text{Abw.}(\text{PKW}_1, \text{LKW}_2) = \left[\frac{3 - 6}{3} - \frac{17 - 6,5}{3,5} \right]^2 = 16$$

$$\text{Abw.}(\text{PKW}_1, \text{PKW}_2) = \left[\frac{3 - 6}{3} - \frac{4,75 - 6,5}{3,5} \right]^2 = 0,25$$

Die Gesamtabweichung eines Fahrzeugpaares wird als Summe der Einzelabweichungen aller Merkmale berechnet. Ergebnis dieses Rechenschritts ist eine zweidimensionale Matrix, die die Ähnlichkeit zwischen jedem Fahrzeug der ersten und der zweiten Beobachtung abgibt.

Schließlich ist zu überprüfen, ob ggf. Zuordnungen aus physikalischen Gründen ausscheiden. So kann das etwa bei Streckenkilometer 3,2 beobachtete Fahrzeug sicher nicht den Fahrzeugen bei km 1,2 zugeordnet werden, da sich – s. Def. 1 – kein Fahrzeug entgegen der Fahrtrichtung bewegen darf (bei praktischen Anwendungen wird hier eine geringe “Rückwärtsfahrstrecke” erlaubt werden). Auf diese Weise lassen sich in jedem Anwendungsfall Zeit-, Weg- oder Geschwindigkeitsrestriktionen finden, die die Zahl der möglichen Zuordnungen einschränken. Für Fahrzeugzuordnungen, die aus diesem Grund sicher nicht gewählt werden dürfen, wird der Abweichungswert auf “Unendlich” (oder einen sehr großen Wert) gesetzt.

6.4.2 Bestimmung eindeutiger Zuordnungen

Im nächsten Verfahrensschritt werden durch eine einfache Überprüfung alle Fahrzeuge entdeckt, die eindeutig einem bestimmten oder keinem Partnerfahrzeug zugeordnet werden können. Dabei werden nur Abweichungen berücksichtigt, die kleiner als ein zuvor gesetzter Grenzwert (z.B. 1,0) sind. Dies bedeutet:

- (a) Findet ein Fahrzeug keinen möglichen Partner (alle paarweisen Abweichungen sind zu groß), so wird es von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen. Dies entspricht dem Fall, daß das Fahrzeug zwischen den beiden Beobachtungen die Strecke verlassen hat oder auf sie aufgefahren ist. Mathematisch bedeutet das, daß in Spalte und Zeile des jeweiligen Fahrzeugs kein akzeptabler Wert für die Zuordnung existiert.
- (b) Ein eindeutiger Partner für ein Fahrzeug (und damit eine eindeutige Zuordnung) ist dann gefunden, wenn für beide Fahrzeuge das jeweils andere Fahrzeug das bestgeeignetste ist und kein anderes Fahrzeug vergleichbar kleine Abweichungswerte besitzt. Ein solches Fahrzeugpaar kann einander fest zugeordnet werden und wird ebenfalls nicht weiter untersucht. Mathematisch bedeutet das, daß in der jeweiligen Spalte und Zeile für die beiden Fahrzeuge “i” und “j” kein besserer “Ähnlichkeitswert” auftritt als der beiden Fahrzeugen gemeinsame Wert $A_{(i,j)}$.

Insgesamt kann in diesem Schritt die Problemgröße deutlich reduziert werden, was die Optimierung der restlichen Zuordnungen wesentlich erleichtert.

6.4.3 Zuordnung der restlichen Fahrzeuge

Für nach dem zweiten Schritt noch zu bearbeitende Fahrzeuge wird der Programmteil zur Optimierung der noch möglichen Zuordnungen aufgerufen. Ein Branch-and-Bound-Verfahren ordnet die restlichen Fahrzeuge einander so zu, daß die Summe der Gesamtabweichungen minimal wird. Ausgangsbedingung für diesen Programmteil ist, daß jedes Fahrzeug noch mindestens zwei verschiedenen Partnerfahrzeugen zugeordnet werden kann.

Das Verfahren geht so vor, daß für ein bestimmtes Fahrzeug eine mögliche Zuordnung angenommen wird und unter dieser Bedingung die Zuordnung der weiteren Fahrzeuge erfolgt. Ist abzusehen, daß diese Annahme zu einer unbefriedigenden Lösung führt, so wird die erstere Festlegung verworfen und eine andere Zuordnung gewählt. Für jedes Fahrzeug wird dazu die Prozedur "select" aufgerufen. Sie ruft sich für das nächste zu untersuchende Fahrzeug selbst wieder auf (rekursiv).

Sind auf diese Art alle Fahrzeuge vorläufig zugeordnet, so wird die Lösung ausgewertet. "Optimal" ist die Kombination von Zuordnungen mit der kleinsten "Gesamtabweichungssumme". Nach Ablauf dieses Programmteils ist sichergestellt, daß die Abweichungen ("Fehler") der gewählten Zuordnung (Lösung) minimal sind.

Auf zwei Punkte soll noch eingegangen werden:

- Zum einen ist es möglich, daß bei verschieden mächtigen Beobachtungen oder nach Elimination der eindeutig bestimmbar Fahrzeuge eine nicht-quadratische Matrix entsteht:
Dies gilt insbesondere für Befliegungen, da hier die Zahl der Fahrzeuge, die im Rückflug beobachtet wurden, größer ist als die Zahl der während des Hinflugs erfaßten Fahrzeuge. Die Situation tritt auch dann auf, wenn aus zwei gleichgroßen Beobachtungen verschieden viele "Spalten" oder "Zeilen" gestrichen werden konnten.
Das der Optimierung zugrundeliegende Verfahren erlaubt aber lediglich quadratische Ausgangsmatrizen oder Matrizen, in denen die Zahl der Zeilen kleiner ist als die Zahl der Spalten. Deshalb wird im umgekehrten Fall (mehr Zeilen als Spalten) die Matrix zunächst parallel zur Geraden $y = -x$ gespiegelt. Dies entspricht im Prinzip dem Wechsel von der primären Zuordnung der Fahrzeuge auf dem Hin- zur primären Zuordnung der Fahrzeuge auf dem Rückflug. Das ist für die optimale Lösung ohne Bedeutung; die Lösung muß lediglich wieder zurücktransformiert werden, was aufgrund der Eindeutigkeit keine Schwierigkeiten bereitet.
- Des weiteren kann die Situation eintreten, daß das Ergebnis der eindeutigen Zuordnung eine Matrix ist, die in verschiedene Zusammenhangskomponenten

(Cliques) zerfällt. Das bedeutet, daß kein Fahrzeug (z.B. aus dem Hinflug) Parametern aus zwei (z.B. Rückflugs-) Cliques zugeordnet werden kann. Ein Beispiel verdeutlicht diese Situation:

Hin/Rück	R1	R2	R3	R4	R5
H 1	0,2	0,3	100	100	4,2
H 2	0,4	0,3	100	100	100
H 3	100	4,1	0,1	100	0,4
H 4	7,0	3,2	0,1	0,2	100

Voraussetzung für erfolgreiche Zuordnungen sei ein Abweichungswert kleiner als Eins. Damit sind Zuordnungen zwischen den Fahrzeugen H1, H2 und R1, R2 wechselseitig möglich (Clique A). Ebenfalls möglich ist die Zuordnung der Fahrzeuge H3, H4 zu R3, R4 oder R5 (Clique B). Es läßt sich aber kein Fahrzeug der Clique A einem Fahrzeug der Clique B zuordnen, da diese Abweichungen alle größer als der gewählte Grenzwert (hier 1,0) sind.

Die Existenz verschiedener Cliques ist bei der Suche nach der optimalen Zuordnung von großem Vorteil, denn die Problemgröße verringert sich dadurch deutlich. Jede Clique kann getrennt optimiert werden; die Einzeloptima sind gleichzeitig optimal für das Gesamtproblem. Im Verfahren wird deshalb der eigentliche Optimierungsschritt (Branch-and-Bound) für jede Clique getrennt durchgeführt, wodurch sich der Rechenaufwand deutlich reduziert. Vor allem die Zerlegung in Cliques macht die Bearbeitung realistischer Probleme erst möglich. Deshalb ist eine Aufteilung des Problems in möglichst viele Cliques anzustreben.

6.5 Ergebnis des Verfahrens

Das vorgestellte Verfahren liefert die Lösung mit minimaler Gesamtabweichung, d.h. die Kombination von Zuordnungen, die insgesamt am besten ist. Bei den Datensätzen einer Testserie konnten die Fahrzeuge, die in beiden Beobachtungen erfaßt wurden, einander zuverlässig zugeordnet werden. Die Verwendung des Verfahrens im Rahmen der Beobachtungen vom Flugzeug aus und die dabei erzielten Ergebnisse (Falschzuordnungsrate ca. 4 Prozent) werden in Abschnitt 6.6 beschrieben.

Voraussetzung dafür ist, daß die Beobachtungen vergleichbar sind und zumindest einige Fahrzeuge in beiden Beobachtungsreihen vertreten sind. Systematische Meßfehler (z.B. zu kleine Blendenöffnung bei der Aufnahme) werden vom System durch die Definition der beschriebenen "Abweichungsfunktion" erkannt und beseitigt. Fahrzeuge können einander nur zugeordnet werden, wenn der jeweilige Abweichungswert kleiner als ein zuvor gesetzter Grenzwert ist. Dieser Grenzwert ist

für jede Kombination von Beobachtungen neu zu berechnen, da sowohl die Zuverlässigkeit des Beobachtungssystems (Kameragenauigkeit, Netzspannungskonstanz, Übertragungsfehler, usw.) als auch die maximal noch akzeptable "Ähnlichkeit" in diesen Wert eingeht.

Treten Fahrzeuge nur in einer Meßreihe auf, so kann das Programm diesen Fahrzeugen kein Partnerfahrzeug zuordnen. Diese Fahrzeuge werden vom Programm als "neu eingefahren" oder "inzwischen ausgefahren" erkannt und getrennt ausgegeben. Anhand der Ausgabeprotokolle, die auch die zugeordneten Fahrzeuge und deren Ähnlichkeit zusammenfassen, ist eine manuelle Kontrolle jederzeit möglich.

Aus der Gesamtabweichung der Zuordnungen kann weiterhin auf die Güte der Beobachtungen geschlossen werden. Unter Umständen kann das Verfahren auch Hilfestellung bei der Suche nach Meßfehlern geben.

6.6 Programmtests und Fehlerabschätzungen

Dennoch kann nicht angenommen werden, daß die Zuordnung von Fahrzeugen aus Hin- und Rückflug immer fehlerfrei erfolgt. Deshalb sind diejenigen Verkehrsparameter, die nach erfolgter Fahrzeugzuordnung errechnet werden, i.d.R. fehlerbehaftet.

Um die Zahl fehlerbehafteter Fahrzeugzuordnungen sowie die Güte des Optimierungsverfahrens abschätzen zu können, wurde das Verfahren an einigen Beispieldatensätzen getestet. Da bei realen Befliegungen die Frage, welche Fahrzeuge einander entsprechen, auch durch zusätzliche Messungen nicht beantwortet werden kann, wurden zu den Tests Simulationsdaten verwendet:

- Simulationen wurden unter Verwendung des Programms MISSION (HUBSCHNEIDER, 1982) für verschiedene Verkehrssituationen durchgeführt.
- Die dabei entstandenen Fahrlinien aller Fahrzeuge wurden der Bewegungslinie eines Flugzeugs überlagert. Daraus konnte ermittelt werden, wann welche Fahrzeuge im Bildbereich des Flugzeugs auftraten.
- Um die Schwierigkeiten bei der Bildaufnahme vom Flugzeug aus nachstellen zu können, wurden die tatsächlichen Ausprägungen Farbe, Grauwert, usw. für die Fahrzeuge aus Hin- und Rückflugsbeobachtungen in einem Maße verfälscht, das den realen Fehlerfaktoren (gemessen in realen Befliegungen) entspricht. Dazu wurde eine im Rechner erzeugte normalverteilte Zufallszahl mit der jeweils angenommenen Standardabweichung multipliziert und zu dem "tatsächlichen Wert" addiert.

- Mit den verfälschten Eingabedaten wurde das Programm für die optimale Bestimmung der Fahrzeugzuordnungen aufgerufen. Aufgrund der Verfälschungen der Eingangsdaten wurden dabei in einigen Fällen Zuordnungen eigentlich verschiedener Fahrzeuge vorgenommen.
- Den vom Programm bestimmten Zuordnungen wurde die (aus der Simulation bekannte) tatsächliche Fahrzeugzuordnung gegenübergestellt. Die dabei entstandenen Unterschiede beschreiben den Verfahrensfehler.

Die auf diese Weise durchgeführte Testserie ergab folgende Ergebnisse:

- Bei frei fließendem Verkehr und den damit verbundenen Verkehrsstärken (abhängig vom jeweils untersuchten Straßentyp) waren die Zuordnungen z.T. vollkommen korrekt, z.T. fanden sich Falschzuordnungen von maximal vier Fahrzeugen für einen Hin- und Rückflug.
- Fehler traten vor allem bei großen Instationaritäten auf; die größten Abweichungen fanden sich in einem Datensatz, in dem beide Fahrstreifen einer BAB für die Dauer von 10 Minuten vollständig blockiert waren. Hier bildete sich rasch eine Fahrzeugschlange; die Zuordnung vieler Fahrzeuge auf engem Raum gestaltete sich schwierig. Zudem konnte die Geschwindigkeit von Fahrzeugen nicht mehr zur Beschränkung des "zulässigen Partnerbereichs" verwendet werden. Dies zeigte sich insbesondere bei der Zahl der fehlerhaften Zuordnungen während der Vollsperrung.

Im folgenden wird deshalb näher auf die Ergebnisse dieses Testdatensatzes eingegangen, da damit auch der schlechtestmögliche Zustand beschrieben wird (worst-case-analysis).

Untersucht wurde eine 4000 m lange, zweistreifige BAB mit einer durchschnittlichen Verkehrsstärke von ca. 1000 Fz/h. Während der Beobachtungszeit (1000s - 4000s) fanden 50 Hin- und Rückflüge statt. Je Hin-/Rückflug wurde zwei Serien von Zuordnungen durchgeführt.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse dieser Zuordnungen zusammengefaßt.

Dabei ist allerdings zu beachten, daß wegen der großen Fahrzeugdichte im Stau in den Flügen 14, 15 und 16 nur ein vereinfachtes Zuordnungsverfahren eingesetzt werden kann, da aus den Fahrzeuggeschwindigkeiten keine zusätzlichen Bedingungen zur Einschränkung des "zulässigen Partnerbereichs" abgeleitet werden können. In diesen drei Flügen tritt die Mehrzahl der falschen Fahrzeugzuordnungen auf. Eliminiert man diese Flüge aus der Stichprobe, so halbiert sich die Anzahl falscher Zuordnungen im gesamten Zeitraum (von 9% auf 4%). Durch eine Verbesserung

Flugnr. Hin- und Rückfl.	Gesamtzahl beobachteter Fahrzeuge	richtig zugeordnet	falsch zugeordnet	Anteil falscher Zuordnungen
1	15	15	0	0%
2	54	52	2	4%
3	38	38	0	0%
4	50	48	2	4%
5	70	66	4	6%
6	62	62	0	0%
7	50	45	5	10%
8	52	50	2	4%
9	100	93	7	7%
10	58	54	4	7%
11	134	125	9	7%
12	174	169	5	3%
13	252	239	13	5%
14	292	246	46	16%
15	303	231	72	24%
16	208	181	27	13%
17	120	118	2	2%
18	64	64	0	0%
19	52	50	2	4%
20	66	65	1	2%
21	58	56	2	3%
22	82	74	8	10%
23	70	65	5	7%
24	80	78	2	3%
25	52	52	0	0%
Gesamt	2556	2336	220	9%
Gesamt*	1753	1678	75	4%

* ohne die Flüge 14, 15 und 16

Tabelle 7:

Übersicht über die Zahlen richtig/falsch zugeordneter Fahrzeuge aus 50 Beobachtungsflügen. Datenbasis: Simulation einer 10-minütigen Vollsperrung beider Richtungsfahrtstreifen einer BAB

des Verfahrens zur Zuordnung von Fahrzeugen, die sich "nicht mehr bewegen können", ist eine wesentliche Erhöhung der Anzahl richtiger Zuordnungen möglich. Dieser Ansatz ist noch nicht implementiert; im Rahmen künftiger Verbesserungen ist damit eine Steigerung des richtig zugeordneten Fahrzeuganteils auf über 98% möglich. Im vorliegenden Fall extremer Instationaritäten kann der Anteil falsch zugeordneter Fahrzeuge von 9 % noch als akzeptables Ergebnis betrachtet werden.

Dies gilt insbesondere deshalb, weil sich Falschzuordnungen auf die Berechnung der Parameter "Verkehrsdichte" oder "Geschwindigkeit" sehr viel weniger auswirken als zunächst zu vermuten ist. Da sich ein Großteil der falsch zugeordneten Fahrzeuge im Stau befindet, läßt sich die Verkehrsdichte aus der beobachteten Zahl der Fahrzeuge fast fehlerfrei ermitteln. Die Geschwindigkeit (die im Staubereich gegen Null geht) ist ebenfalls vergleichsweise genau bestimmbar. Auch außerhalb des Staubereichs sind die Auswirkungen von Falschzuordnungen deutlich kleiner als ihre Anzahl suggeriert. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich z.B. bei der mittleren Geschwindigkeit fehlerbehaftete Zuordnungen gegenseitig neutralisieren. Zudem sind Falschzuordnungen bei frei fließendem Verkehr generell seltener.

Verkehrsgrößen können deshalb dann noch relativ genau bestimmt werden, wenn einige Fahrzeuge "falsch" zugeordnet wurden. Der folgende Vergleich von realer und berechneter Verkehrsdichte und Geschwindigkeit für den beschriebenen Datensatz bestätigt dies.

6.6.1 Analyse der Verkehrsdichte

Im Beobachtungszeitraum wurden für jeweils 1 km lange Teilstrecken und Zeitperioden von 1 Minute die Verkehrsdichten bestimmt; dadurch ergaben sich $200 T - X$ -Teilbereiche der Größe $1000m \cdot 60s = 60.000 m \cdot s$. Für jeden Teilbereich wurden aus den Daten der Simulation die realen Werte und aus den Ergebnisdateien des Zuordnungsprogramms die vom entwickelten Verfahren berechneten Werte bestimmt. Anschließend wurde für jeden $T - X$ -Teilbereich die Differenz zwischen realer und berechneter räumlich-zeitlicher Verkehrsdichte ermittelt. Das Ergebnis ist in Tabelle 8 zusammengefaßt.

Dazu kann festgestellt werden:

1. Die vom Verfahren bestimmte Verkehrsdichte ist immer kleiner als die tatsächliche. Dies ist darauf zurückzuführen, daß einzelne Fahrzeuge vom Zuordnungsverfahren nicht weiterverfolgt werden konnten und deshalb als "ausgefahren" betrachtet wurden.
2. Die Unterschätzung der Verkehrsdichte ist vor allem im Staubereich zu finden.

	km1	km2	km3	km4		km1	km2	km3	km4
1. Min	0.00	0.00	0.00	0.00	26. Min	2.20	14.35	12.86	0.00
2. Min	0.08	0.06	0.21	0.05	27. Min	0.75	9.08	5.01	3.13
3. Min	0.50	0.00	0.06	0.20	28. Min	9.25	5.95	5.98	0.98
4. Min	0.30	0.06	0.18	0.60	29. Min	1.68	2.45	1.40	3.08
5. Min	0.26	0.05	0.05	0.03	30. Min	0.96	3.86	1.26	1.28
6. Min	1.38	0.20	0.05	0.10	31. Min	0.15	0.65	1.43	3.16
7. Min	0.06	0.08	0.28	0.05	32. Min	0.20	0.13	0.15	0.01
8. Min	1.60	0.13	0.25	0.31	33. Min	0.16	0.11	0.23	0.21
9. Min	0.08	0.25	0.10	0.88	34. Min	0.36	0.16	0.08	0.00
10. Min	1.41	0.06	0.20	0.16	35. Min	0.51	0.06	0.10	0.06
11. Min	0.01	0.31	0.13	0.45	36. Min	0.06	0.30	0.45	0.68
12. Min	0.20	0.13	0.21	0.01	37. Min	0.06	0.03	0.01	0.08
13. Min	0.08	0.20	0.13	0.60	38. Min	0.15	0.26	0.15	0.08
14. Min	0.31	0.31	0.05	0.60	39. Min	0.18	0.08	0.15	0.08
15. Min	0.05	1.40	0.06	0.01	40. Min	0.45	0.16	0.11	0.21
16. Min	3.36	4.70	1.06	0.23	41. Min	0.01	0.10	0.33	0.23
17. Min	0.21	0.48	0.30	1.53	42. Min	1.20	0.60	0.46	0.51
18. Min	0.71	2.38	0.00	3.16	43. Min	0.05	0.01	1.58	0.43
19. Min	0.21	0.43	0.00	0.00	44. Min	0.75	0.15	0.16	0.96
20. Min	1.20	1.03	0.00	0.00	45. Min	0.08	0.16	0.06	0.30
21. Min	0.51	0.31	0.00	0.00	46. Min	1.01	1.21	0.18	0.23
22. Min	4.25	5.16	0.00	0.00	47. Min	0.11	0.06	0.56	0.58
23. Min	0.28	0.46	0.00	0.00	48. Min	0.03	0.05	0.05	0.11
24. Min	0.71	0.35	0.00	0.00	49. Min	0.05	0.05	0.13	0.05
25. Min	0.21	0.15	0.00	0.00	50. Min	0.00	0.00	0.00	0.46

Tabelle 8:

Unterschiede in Prozent zwischen realer und berechneter Verkehrsdichte für
200 $T - X$ -Beobachtungsbereiche (jeweils der Länge 1 km und der Zeit 1 min)

DIFFERENZ ZWISCHEN

- realen Verkehrsdichten (input FLUG) und
- berechneten Verkehrsdichten (output FLUG)

AUS ALLEN 200 T-X-BEREICHEN VON JEWEILS 60.000 M-S GRÖSSE

Summe aller Verkehrsdichten in der Realität	:	3079.2
Summe aller Verkehrsdichten nach Prog. FLUG	:	2997.5
Differenz der Verkehrsdichten	:	81.7
Die Abweichung beträgt in Prozenten	:	-2.7
Die Abweichung beträgt durchschnittlich	:	-0.41

Alle Angaben in Fahrzeugen pro Kilometer

Tabelle 9: Auswertung der Unterschiede der Verkehrsdichte aus Tab. 8

3. Im gesamten Beobachtungszeitraum wird die Verkehrsdichte um etwa 2,7% zu niedrig geschätzt.
4. Die maximale Abweichung in einem der 200 Teilbereiche beträgt 14 Fz/km
5. Durchschnittlich ergibt sich für jeden $T - X$ -Teilbereich ein Fehler von 0,4 Fz/km. Das bedeutet, daß in der überwiegenden Zahl aller Fälle (Ausnahme: Staubereich) die Verkehrsdichte ausreichend exakt bestimmt wird.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, daß die vom Verfahren berechneten Verkehrsdichten nur geringe Unterschiede zu den realen Werten (durchschnittliche Abweichung: 2,7%) aufweisen. Es ist weiter möglich, die Genauigkeit der berechneten Parameter zu steigern, indem Programmänderungen bei der Fahrzeugzuordnung im Stau implementiert werden.

6.6.2 Analyse der mittleren Geschwindigkeit

Auch hier wurden die tatsächlichen Werte den vom Programm bestimmten Werten gegenübergestellt. Dabei ergaben sich ebenfalls im Bereich der Vollsperrung und insbesondere dort, wo Fahrzeuge bis zum Stillstand abbremsten, die größten Veränderungen. Die Abweichungen in den 200 einzelnen $T - X$ -Bereichen spiegeln das

Bild aus Tab. 8 wider; auf eine Angabe der Einzelwerte wird deshalb verzichtet. Die Globalbetrachtung ergibt folgende Kennziffern für den Vergleich (s. Tab. 10).

DIFFERENZ ZWISCHEN	
– realer mittlerer räumlich-zeitlicher Geschwindigk. (input FLUG) und	
– berechneter mittlerer räumlich-zeitlicher Geschwindigk. (output FLUG)	
AUS ALLEN 200 T-X-BEREICHEN VON JEWEILS 60.000 M-S GRÖSSE	
Summe aller m. Geschwindigk. in der Realität	: 14720.8
Summe aller m. Geschwindigk. nach Prog. FLUG	: 14168.7
Differenz der Summe der Geschwindigkeiten	: 552.1
Die Abweichung beträgt in Prozenten	: –3.8
Die Abweichung beträgt durchschnittlich	: – 2.76
Alle Angaben in Kilometer pro Stunde	

Tabelle 10:

Unterschiede zwischen realer und berechneter mittl. Geschwindigkeit für 200 T–X-Beobachtungsbereiche (jeweils der Länge 1 km und der Zeit 1 min)

Die durchschnittliche Abweichung im gesamten Beobachtungsbereich betrug weniger als 3 km/h (4 %). Im Staubereich erreichen die Abweichungen größere Werte, sinken dafür aber in Bereichen freien Verkehrs auf etwa 1 % (bzw. 1 km/h).

Wenn die konzipierten Programmänderungen für die Zuordnung der sich im Stau befindenden Fahrzeuge implementiert sind, ist damit zu rechnen, daß die Abweichungen auch im Staubereich auf 1–2 % reduziert werden können. Dieser Wert wurde aus einer für den beschriebenen Datensatz durchgeführten Modellrechnung geschätzt. Dabei wurde die Wirkungsweise des Moduls, das die verbesserte Zuordnung von Fahrzeugen im Staubereich übernimmt, untersucht. Unterstellt wurde, daß für diese Zuordnung in allen Zweifelsfällen ausschließlich die Fahrzeugposition verwendet wird. Während bisher noch $46 + 72 + 27 = 145$ Fahrzeuge falsch zugeordnet wurden, sinkt die Zahl der Falschzuordnungen innerhalb des verbesserten Moduls dann auf $4 + 14 + 2 = 20$ (s. Tab. 7). Für die gesamte Befliegung ergäbe sich insgesamt eine Falschzuordnungsrate von $95/2556 = 4\%$ (ebenfalls aus Tab. 7 ersichtlich). Dies entspricht der Rate für Falschzuordnungen im fließenden Verkehr. Die Auswirkungen auf Verkehrsdichte- und Geschwindigkeitskenngrößen sinken dadurch ebenfalls um etwa die Hälfte.

Für Anwendungen in der Praxis ist das Verfahren – insbesondere nach Implementierung der Verbesserungen – also ausreichend genau. Der durch die Falschzuordnungsrate von etwa 4% (im Durchschnitt aller Verkehrszustandsbereiche) entstehende Fehler verringert sich bei der Berechnung einiger Verkehrsgrößen nochmals deutlich (auf ca. 1–2%) und ist größenordnungsmäßig geringer als der Fehler, der – systembedingt – bei allen praktischen Messungen den Eingabedaten Ort, Zeit, Farbe, Größe, usw. anhaften wird.

6.7 Verwendungsbereiche für das Verfahren

Das beschriebene Verfahren kann für alle Arten von Fahrzeugzuordnungen verwendet werden. Allerdings wurde es primär für den Einsatz bei der Auswertung von Luftbildern entwickelt. Dabei liegen zwei Beobachtungen (jeweils auf dem Hin- und Rückflug) vor. Aus Farbe und Größe der Fahrzeuge wird auf die Ähnlichkeit geschlossen; Ort und Geschwindigkeit erlauben zusätzliche Einschränkungen der in Frage kommenden Partnerfahrzeuge.

Das Programm kann daneben auch in allen Fällen verwendet werden, in denen ein (zumindest teilweise) identisches Fahrzeugkollektiv in mindestens zwei Beobachtungen erfaßt wird. Dies können sowohl Induktionsschleifenmessungen an verschiedenen Querschnitten als auch Untersuchungen zur Ein- und Ausfahrt in einen fest definierten Verkehrsbereich sein. Vor allem aber bieten sich automatisch ausgewertete stationäre Videoaufnahmen als Datengrundlage für die Zuordnungsprogramme an.

Als Kriterium für die Zuordnung stehen im ersten Fall (Induktionsschleifen) u.a. zur Verfügung:

- die sog. “elektrische Fahrzeuglänge”: Das ist die das Induktionsfeld beeinflussende Länge des Fahrzeugs,
- Maximalwert des Induktionssignals,
- Position des Maximums innerhalb des Signals o.ä.,
- Geschwindigkeit und Durchfahrzeit.

Im zweiten Fall (Einfahrts-/Ausfahrtsbeobachtungen) bieten sich als Kriterium für die Zuordnung an:

- Farbe (auf einer etwa 8 bis 12-teiligen Skala),

- Typ (Pkw, Lkw, Kombi),
- polizeiliches Kennzeichen (in diesem Fall kann sowohl das ganze Kennzeichen als auch nur der Buchstaben- oder Ziffernblock verwendet werden). (Auf die datenschutzrechtliche Problematik von Kennzeichenerfassungen wird hier nicht näher eingegangen.) Zur automatischen Erkennung von Kennzeichen aus Videoaufnahmen sei auf WILLIAMS, u.a. (1989) verwiesen.

Im dritten Fall (Videobeobachtungen) können die oben beschriebenen Kriterien Farbe, Typ und Kennzeichen verwendet werden. Videobeobachtungen erlauben – vor allem bei stationärer Beobachtung (s. LEUTZBACH, BÄHR, BECKER u. VÖGTLE, 1987) – auch die Verwendung von Fahrzeuglänge, Fahrzeugbreite oder anderer fahrzeugcharakteristischer Größen für die Zuordnung.

Daneben ist das Verfahren auch für andere Anwendungen einsetzbar. Lediglich drei Vorbedingungen müssen bei jeder Verwendung sichergestellt sein:

1. Je nach Art der verfügbaren Daten ist die Größe der “Abweichungen” neu festzulegen. Dabei kann die vorliegende Funktion durch einfache Addition eines entsprechenden Merkmals ergänzt werden; es ist also lediglich eine Prozedur zu ändern.
2. Die vorliegenden Beobachtungen müssen so zusammengefaßt oder aufgeschlüsselt werden, daß der eigentliche Optimierungsschritt mit so wenig Fahrzeugen wie möglich durchgeführt wird. Dies kann etwa durch die zeitversetzte Gegenüberstellung von Einfahrten und Ausfahrten erfolgen; alle anderen (aus Zeitgründen a priori für eine Zuordnung ausscheidenden) Fahrzeuge sollten schon vorher ausgeschlossen werden.
3. Um die notwendige Rechenzeit in vertretbaren Grenzen zu halten, sind zusätzliche Einschränkungen der zu jedem Fahrzeug in Frage kommenden Partnerfahrzeuge hilfreich. Solche Informationen sind oft zusätzlich verfügbar und sollten dem Programm so genau wie möglich eingegeben werden. Der Arbeitsaufwand verringert sich dadurch häufig auf wenige Prozent des ursprünglichen Bedarfs.

Abschließend sei noch ein weiterer Vorteil erwähnt:

Trotz der Konzeption des Programms für zwei Beobachtungen können auch drei oder mehr Verkehrsmessungen ausgewertet werden. Jede zusätzliche Beobachtung erhöht den Arbeitsaufwand, der allerdings nicht exponentiell, sondern nur linear ansteigt (da jeweils zwei aufeinanderfolgende Beobachtungen getrennt ausgewertet

werden können). Dadurch wird es möglich, Fahrzeuge über längere Strecken hinweg zu verfolgen. Beispielsweise können auch die Fahrlinien einzelner Fahrzeuge in einem (städtischen) Streckennetz untersucht werden:

Aus den Beobachtungen an verschiedenen Querschnitten und der anschließenden Zuordnung zu einem bestimmten Fahrzeug können direkt Geschwindigkeitsprofile und -ganglinien geschätzt werden. Sofern ausreichend viele Beobachtungen vorliegen, ist es damit möglich, für ein definiertes Straßennetz Quell-Ziel- (F_{ij}) Verkehrsverflechtungsmatrizen automatisch zu bestimmen. Sie sind Grundlage einer Reihe weiterführender verkehrstechnischer Untersuchungen (z.B. bei Verkehrsberuhigungsmaßnahmen, zur Knoten- oder Streckenbelastung o.ä.). Da die automatische Bestimmung solcher Matrizen zur Zeit noch nicht möglich ist, wäre dies ein deutlicher Fortschritt.

7 Berechnung, Darstellung und Interpretation von Verkehrsgrößen aus Zeit-Weg-Fahrlinien

Um die entwickelten Verfahren im Gesamtzusammenhang untersuchen und testen zu können, wurden alle Ansätze auf einem Prozeßrechner HP 1000F implementiert. Sowohl die Bestimmung der verkehrstechnischen Grundgrößen, der Fahrzeugzuordnungen, der Zeit-Weg-Fahrlinien als auch die anschließende Datenanalyse sind somit programmtechnisch realisiert und verfügbar.

Als Eingabedaten wurden wegen der hohen Kosten realer Flüge vor allem Simulationsdaten verwendet. Dies hat zudem den Vorteil, daß aus den vollständig rekonstruierbaren Eingabedaten auch Vergleichsgrößen zur Kontrolle der entwickelten Verfahren errechnet werden können, die sonst nicht verfügbar wären.

Das für die Simulation verwendete Programmpaket "MISSION" wurde am Institut für Verkehrswesen seit den 70er Jahren entwickelt und in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen erfolgreich eingesetzt (HUBSCHNEIDER, 1983). Innerhalb von MISSION wird die Bewegung von Fahrzeugen auf einer Strecke nachgebildet, wobei als Einflußfaktoren die "Wunschgeschwindigkeit" des Fahrers (WIEDEMANN u. HUBSCHNEIDER, 1982) und die "Leistungsklasse" des Fahrzeugs ebenso berücksichtigt werden wie z.B. Interaktionen mit anderen Fahrzeugen. Die Simulation liefert für jede Parameterkombination einen Ergebnisdatensatz, der die Bewegungen aller Einzelfahrzeuge in Sekundenschritten beschreibt. Dadurch sind vollständige Informationen über die Bewegungen aller Fahrzeuge vorhanden, so daß die von allen nachgeordneten Verfahren bestimmten Ergebnisse den "echten" (d.h. den simulierten) Werten gegenübergestellt werden können.

Im ersten Schritt werden die Fluglinie des Flugzeuges und für einen wählbaren Bildbereich (hier etwa 70 m) die jeweils beobachtbaren Fahrzeuge bestimmt. Als Eingabe für weitere Auswertungen werden Zeit und Ort der Überflüge über die Fahrzeuge verwendet. Weiter wird jedem neu erfaßten Fahrzeug zufallsverteilt ein Grauwert [0 ... 256 P] sowie eine bestimmte Größe [6 ... 45 m²] zugewiesen.

Die Fahrzeuggrößen "Grauwert" und "Größe" werden unter Berücksichtigung der bei VÖGTLE (1989) für reale Aufnahmesituationen beschriebenen Fehlertoleranzen immer dann verändert, wenn ein bestimmtes Fahrzeug ein weiteres Mal erfaßt wird. Dies geschah, um die realen Schwierigkeiten der Bildaufnahme (wechselnde Helligkeit und daraus resultierende Grauwertschwankungen, Flughöhenschwankungen und daraus resultierende Größenschwankungen, usw.) realistisch berücksichtigen zu können (das Vorgehen wurde bereits in Kap. 6.6 beschrieben). Die Programmeingabedaten schwanken also normalverteilt und mit vorgegebener - aus realen Testflügen geschätzter - Streuung um die exakten Werte.

Aus dem so erzeugten Eingabefile, das die bewegte Beobachtung repräsentiert, wurden vom Programm zunächst die in Abschnitt 5 beschriebenen bewegten und momentanen (räumlich-zeitlichen) Verkehrsgrößen bestimmt. Im Anschluß daran erfolgte die Zuordnung mehrfach erfaßter Fahrzeuge nach dem in Abschnitt 6 beschriebenen Verfahren. Aus der Zuordnung der Fahrzeuge zueinander ergab sich ein Datensatz, der den Verkehr insgesamt – auch in eigentlich nicht beobachteten Bereichen – beschreibt. Die Existenz dieses “Global-Datensatzes” erlaubt weiterführende Analysen und Untersuchungen. In Abschnitt 7 wird auf die Erstellung von Zeit-Weg-Fahrlinien und die Untersuchung, Darstellung und Analyse des Datensatzes eingegangen.

7.1 Erstellung der Zeit-Weg-Fahrlinien

Die Bewegungslinien der Fahrzeuge werden im Anschluß an die Fahrzeugzuordnungen (s. Abschnitt 6) in einem weiteren Modul des Auswerteprogramms näherungsweise bestimmt. Dazu wird wie folgt vorgegangen (s. auch Abb. 15):

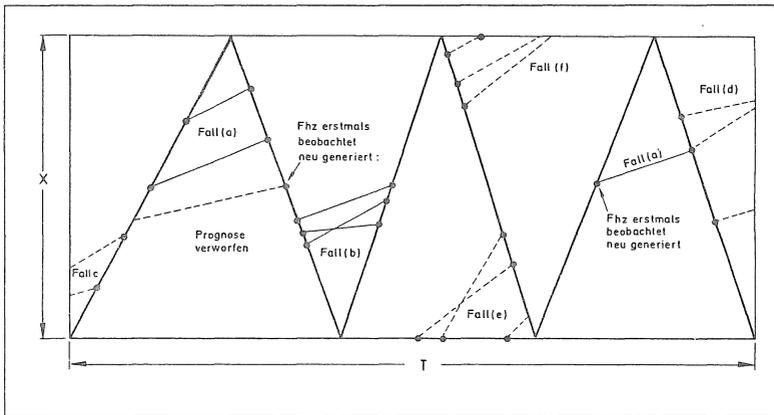


Abbildung 15:
Erklärung des Vorgehens zur Erzeugung von Zeit-Weg-Bewegungslinien

- (a) Ist sowohl beim Hinflug als auch in dem darauf folgenden Rückflug ein Fahrzeug erkannt und zugeordnet worden, so ist die Fahrlinie annähernd als Gerade durch die beiden Beobachtungspunkte definiert.
- (b) Gleiches gilt, falls umgekehrt ein Fahrzeug in einem Rückflug und im nachfolgenden Hinflug beobachtet wurde.
- (c) Falls ein Fahrzeug zum ersten Mal in einem Hinflug beobachtet wird, so muß dies der erste Hinflug sein. In diesem Fall befand sich das Fahrzeug zu Beginn des ersten Fluges bereits auf der Strecke. Aus Zeitpunkt t_1 , Position x_1 sowie Geschwindigkeit v_1 zum Zeitpunkt des ersten Überflugs wird die Einfahrt in den Untersuchungsbereich A prognostiziert:

$$t_{ein} = t_{Start}^{1.Hin}, \quad x_{ein} = x_1 - (v_1 \cdot t_1)$$

- (d) Gleiches gilt, falls ein Fahrzeug (t_n, x_n, v_n) zum letzten Mal im Rückflug beobachtet wurde. Für die Prognoseausfahrt aus A gilt dann:

$$t_{aus} = t_{ende}; \quad x_{aus} = x_n + \left(\frac{x_n}{v_n^R} \cdot v_n\right)$$

Falls $(x_{aus} > x_{ende})$ gilt (d.h. falls das Fahrzeug bei Ende des letzten Rückflugs die Untersuchungsstrecke X schon verlassen hat), wird prognostiziert:

$$t_{aus} = t_n + \left(\frac{X - x_n}{v_n}\right); \quad x_{aus} = x_{ende}$$

- (e) Falls ein Fahrzeug zum ersten Mal in einem beliebigen Rückflug beobachtet wird (t_i, x_i, v_i) , so muß dieses Fahrzeug neu eingefahren sein:

$$t_{ein} = t_i - \frac{x_i}{v_i}, \quad x_{ein} = x_{anfang}$$

- (f) Gleiches gilt, falls ein Fahrzeug zum letzten Mal in einem Rückflug beobachtet wurde. Dieses Fahrzeug muß die Untersuchungsstrecke verlassen haben.

$$t_{aus} = t_i + \left(\frac{X - x_i}{v_i}\right), \quad x_{aus} = x_{ende}$$

Abb. 15 zeigt die Zusammenhänge im Zeit-Weg-Diagramm. Selbstverständlich wird in allen Fällen überprüft, ob die Geschwindigkeiten im zulässigen Rahmen liegen ($0 \leq v_i < v_{max}$) und ob die prognostizierten Zeiten und Fahrzeugpositionen eine weitere Beobachtung erfordert hätten. Stimmen die Datenpaare in irgendeiner Kontrollbeziehung nicht überein, so wird der prognostizierte Zeit-/Wegepunkt von Ein- oder Ausfahrt in den Untersuchungsbereich "A" verworfen.

Eine neue Zeit-Weg-Bewegungslinie wird immer dann generiert, wenn Inkonsistenzen auftreten. Selbstverständlich kann eine Zeit-Weg-Bewegungslinie in diesen Fällen auch innerhalb des $T - X$ -Bereichs enden. Die Neugenerierung von Zeit-Weg-Fahrlinien ist z.B. immer nötig, wenn durch Fahrzeugzuordnungen ein einzelnes Fahrzeug übrig bleibt. Die Zahl solcher Fälle ist aber insgesamt begrenzt (s.u.).

Insgesamt lassen sich nach diesem Ansatz individuelle Fahrzeug-Bewegungslinien zuverlässig bestimmen. Das komplexe System Verkehr wird durch die Gesamtheit aller Bewegungslinien am vollständigsten beschrieben.

Abb. 16 stellt den Verlauf aller Bewegungslinien in der Zeit-Weg-Ebene dar. Ausgewählt wurde wiederum der Datensatz mit 10-minütiger Blockade einer BAB, da dort die größten Unterschiede in den Verkehrszustandsänderungen auftreten. Im oberen Bildteil ("real") ist der Verlauf der ursprünglichen Bewegungslinien (Eingabe) aus MISSION, im unteren Bildteil ("Flug") der Verlauf der von den entwickelten Verfahren berechneten Fahrlinien (Ausgabe) wiedergegeben.

Im Vergleich zum oben abgebildeten, "realen" Verkehrsverlauf zeigen die aus Bilddaten von Befliegungen bestimmten Bewegungslinien (unten) eine Reihe von Unterschieden. Fahrzeuge werden z.T. neu generiert (Linien beginnen plötzlich innerhalb der $T - X$ -Ebene), Fahrzeugzuordnungen treten auf (sehr langsame Fahrzeuge im Bereich freien Verkehrs), alle Bewegungen werden durch Geradenstücke approximiert. Dennoch ist die Ähnlichkeit beider Datensätze trotz der extremen Instationaritäten dieser Verkehrssituation so groß, daß für alle praxisrelevanten verkehrstechnischen Fragestellungen der aus der bewegten Beobachtung errechnete Datensatz mehr als ausreichend genaue Aussagen erlaubt.

Bei allen Testsituationen, die nicht solche Schwankungen im Verkehrsablauf aufwiesen, sind die Unterschiede zwischen den realen und den berechneten Zeit-Weg-Linien nochmals geringer (s. etwa den Zeitraum zwischen $t = 1800s$ und $t = 2000s$ aus Abb. 16).

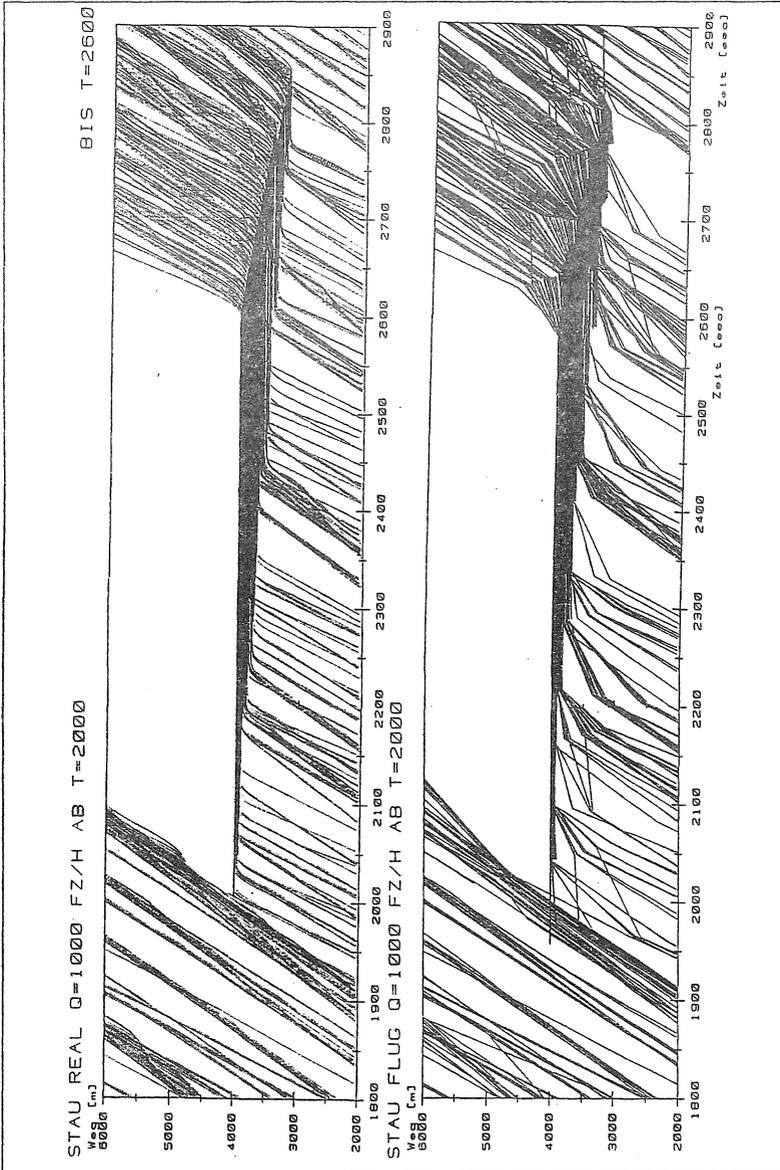


Abbildung 16:
Vergleich "realer" und berechneter Bewegungslinien bei extremen Instationaritäten

7.2 Bestimmung des Verkehrszustandes

Aus den so bestimmten angenäherten Zeit-Weg-Fahrlinien lassen sich Verkehrsgrößen für $T - X$ -Teilbereiche bestimmen, die in der eigentlichen "bewegten Beobachtung" zunächst nicht erfaßt wurden. Damit kann beispielsweise auch dort die aktuelle Verkehrssituation beschrieben werden. Dazu sind repräsentative Verkehrsgrößen auszuwählen.

7.2.1 Auswahl repräsentativer Verkehrsgrößen

Soll aus Überfliegungen die Verkehrssituation bestimmt werden, so müssen dazu aussagekräftige und repräsentative Verkehrsgrößen verwendet werden. In der Regel werden zur Bestimmung der Verkehrssituation die globalen Verkehrsgrößen "Dichte k ", "Stärke q " und "momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m " herangezogen.

Bei bewegten Beobachtungen wird fast immer die Verkehrsdichte und die momentane Geschwindigkeit der Fahrzeuge bestimmt (z.B. TREITERER, 1966 oder PER-SAUD u. HURDLE, 1988), denn:

- (a) die Verkehrsdichte ist direkt bestimmbar (Zählung und Division durch X sowie Multiplikation mit einem Faktor), s. Abschnitt 5.3;
- (b) die Verkehrsstärke ist nur schwer und näherungsweise bestimmbar, siehe Abschnitt 5.4; bei fließendem Verkehr ist sie für alle Querschnitte einer Strecke in etwa gleich, die Verkehrsdichte dagegen oft nicht;
- (c) die mittlere Geschwindigkeit ist der Parameter, der den Charakter von Verkehr ("Ortsveränderung") und dessen Qualität für das individuelle Fahrzeug am aussagekräftigsten beschreibt.

Damit stellt sich die Frage, wie Verkehrszustandsklassen aus Parameterkombinationen dieser Größen zu definieren sind und wo die Grenzen zwischen diesen verschiedenen Klassen liegen. Da dies mit Sicherheit auch von der Untersuchungsstrecke selbst, der Witterung, den Fahrzeugen, usw. abhängt, läßt sich diese Festlegung sicher nicht endgültig und universell treffen. Das im folgenden untersuchte Beispiel soll deshalb lediglich das Vorgehen verdeutlichen.

7.2.2 Festlegung von Verkehrszustandsklassen

Bei der Bestimmung von Verkehrszustandsklassen unterscheiden eine Vielzahl von Autoren (z.B. JACOBS, 1970 oder LEUTZBACH, 1972) drei Bereiche:

- freier Verkehr (uneingeschränkte Überholmöglichkeiten)
- teilgebundener Verkehr (eingeschränkte Überholmöglichkeiten)
- gebundener Verkehr (keine Überholmöglichkeiten, Stau).

Diese Einteilung erwies sich im praktischen Einsatz als zu grob; nach den Richtlinien für den Verkehrswarndienst der Polizei (aus dem "Verkehrsblatt", 1976; zitiert nach KELLER u.a., 1983) werden deshalb die folgenden fünf "Verkehrsstufen" unterschieden:

Verkehrsstufe	Merkmale	Rundfunkdurchsage
1	störungsfreier Verkehr mit Durchfahrtsmengen von 0 bis 600 Fz/h pro Fahrstreifen	"schwacher Verkehr"
2	störungsfreier Verkehr mit Durchfahrtsmengen von 600 bis 1200 Fz/h pro Fahrstreifen	"lebhafter Verkehr"
3	störungsfreier Verkehr mit Durchfahrtsmengen von mehr als 1200 Fz/h pro Fahrstreifen	"dichter Verkehr"
4	Verkehrsdichte läßt keine freie Wahl der Fahrgeschwindigkeit zu	"zähflüssiger Verkehr"
5	Verkehr steht	"Stau"

Tabelle 11:
Verkehrsstufen als Grundlage für Verkehrsmeldungen nach KELLER u.a. (1983)

In einer Reihe von Arbeiten werden feinere Einteilungen der Verkehrszustände vorgeschlagen. Als Beispiel sei auf STREMMER (1984) verwiesen, der die folgenden sieben Zustandsklassen vorschlägt (s. Tabelle 12).

Aus diesen Definitionen sind für jeden einzelnen Anwendungsfall die Bereichsgrenzen zwischen den einzelnen Verkehrszustandsklassen festzulegen. Diese Festlegung muß selbstverständlich unterschiedliche Strecken und Nebenbedingungen berücksichtigen und ist daher in jedem Anwendungsfall zu überprüfen. Wird etwa eine zweistreifige Richtungsfahrbahn einer Schnellverkehrsstraße untersucht, so sind für die Festlegung der Bereichsgrenzen folgende Definitionen möglich, die eine automatische, direkte und eindeutige Bestimmung der Verkehrszustandsklasse ermöglichen (s. Tab. 13).

1. Verkehrsruhe:	kaum Fahrzeuge, Verkehr fließt
2. schwacher Verkehr:	wenig Fahrzeuge, Verkehr fließt
3. starker Verkehr:	viele Fahrzeuge, Verkehr fließt
4. Staugefahr:	sehr viele Fahrz., Verkehr instabil
5. kurzer Stau:	Stau, zeitl. u. räuml. begrenzt
6. Mengenstag:	umfangreicher Stau
7. Streckenblockade:	Strecke ist blockiert

Tabelle 12: Verkehrszustände nach STREMMER (1984)

1. Verkehrsruhe:	$5 > k$		
2. schwacher Verkehr:	$5 \leq k$	und $k \cdot v < 1000$	und $50 \leq v$
3. starker Verkehr:	$5 \leq k$	und $1000 \leq k \cdot v$	und $50 \leq v$
4. Staugefahr:	$5 \leq k$		und $20 \leq v < 50$
5. kurzer Stau:	$5 \leq k < 75$		und $5 \leq v < 20$
6. Mengenstag:	$75 \leq k$		und $5 \leq v < 20$
7. Streckenblockade:	$5 \leq k$		und $v < 5$
sonst:		mit: $250 \leq v$	
<i>unzulässiger Verkehrszustand</i>		oder $150 \leq k$	
		oder $3000 \leq k \cdot v$	

Tabelle 13:

Beispiel für die Definition von Verkehrsbereichen für eine zweistreifige Schnellstraße

Nach LEUTZBACH u. WIEDEMANN (1977) finden Übergänge zwischen Verkehrszuständen (z.B. wegen zu hohen Verkehrsaufkommens) in der Form von Hysteresis-Schleifen im "dynamischen Fundamentaldiagramm" statt. In Abb. 17 sind zur Veranschaulichung dieser Tatsache die Verkehrszustände in 50 aufeinanderfolgenden Intervallen auf einer Strecke mit Engpaß (zu geringe Kapazität für das angenommene Verkehrsaufkommen) aufgetragen. Der "Lebenszyklus" einer Störung besitzt demnach im Idealfall die folgenden typischen Übergänge zwischen den Verkehrszustandsklassen:

schwacher Verkehr	⇒	starker Verkehr
starker Verkehr	⇒	Staugefahr
Staugefahr	⇒	Stau
Stau	⇒	kurzer Stau/Staugefahr
Staugefahr	⇒	schwacher Verkehr

Somit ergibt sich die Möglichkeit, "Vorinformationen" bei der Bestimmung der Übergänge von Verkehrszustandsklassen mitzuverwenden und die Untersuchung auf evtl. nur einen aktuellen Parameter beschränken zu können.

Durch Berücksichtigung dieser logischen Einschränkungen ist es ggf. auch möglich, fehlerhafte Messungen auszusortieren. Ergebnis der Auswertung ist die relativ sichere Charakterisierung des augenblicklichen Verkehrszustandes.

7.3 Grafische Darstellung des Verkehrszustandes

Die Kenntnis der Zeit-Weg-Fahrlinien erlaubt es, aus bewegten Beobachtungen Verkehrsparameter für jeden Zeit-Weg-Bereich zu berechnen, selbst wenn dieser Bereich nicht vom Flugzeug aus beobachtet wurde. Damit sind z.B. Untersuchungen zur Verkehrsqualität oder die Bestimmung der Verkehrssituation in jedem beliebigen Zeit-Weg-Intervall möglich. Gesucht ist in diesem Fall eine Darstellungsform, die die Menge des Datenmaterials so aufbereitet, daß sich dem Betrachter die Problembereiche erschließen. Eine Möglichkeit dafür bieten grafische Darstellungen. Solche Darstellungen müssen die verkehrlichen Grundgrößen Zeit und Weg berücksichtigen; als abhängige Variable kann ein beliebiger Parameter gewählt werden. Damit ergibt sich eine dreidimensionale Darstellung: über Zeit und Weg werden die jeweiligen Kennwerte (k , \bar{v} , usw.) aufgetragen.

7.3.1 "Karten" für Verkehrsgrößen

Zur Darstellung "dreidimensionaler" Zusammenhänge werden häufig "Karten" verwendet: Für jeden Punkt aus der Urmenge (X, T) wird eine "Höhe" (Z) definiert;

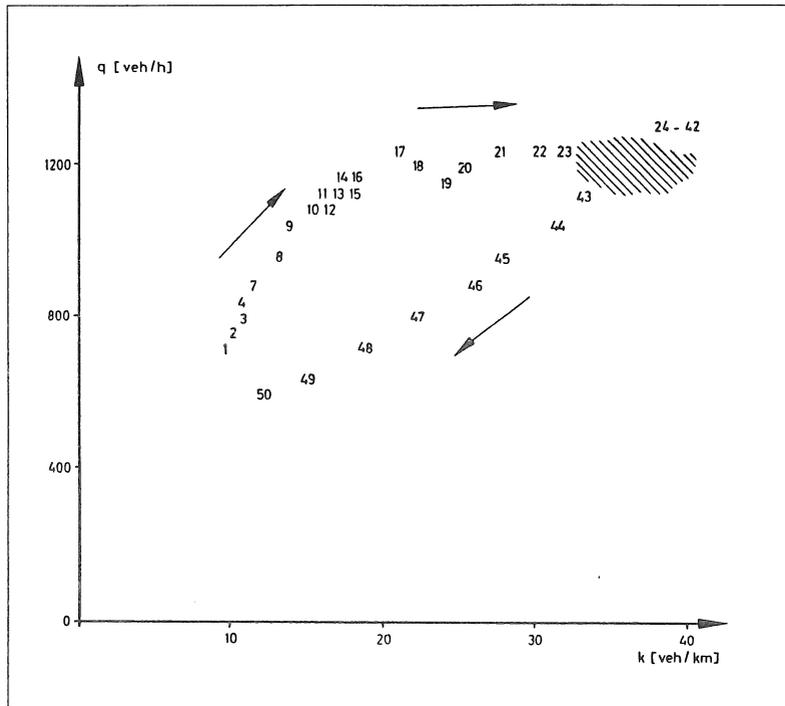


Abbildung 17:
Verkehrszustände im "dynamischen Fundamentaldiagramm" nach LEUTZBACH
u. WIEDEMANN (1977)

Punkte gleicher Höhe werden durch Höhenlinien verbunden. Auf diese Weise entstehen Verkehrsdichtekarten (s. Abb. 18) oder Karten der mittleren Geschwindigkeit.

Den folgenden Darstellungen liegt die bereits beschriebene Simulation einer 10-minütigen Vollsperrung auf einer zweistreifigen BAB zugrunde (s. auch Abb. 16). In dem Beispiel wurden die ermittelten Dichten für jeweils 1 km lange Teilstücke und in Minutenabständen ermittelt. Als Verkehrszustandsklassen seien definiert:

Verkehrsdichte		Verkehrszustand	
$0 \leq k < 16$	[Fz/m]	"ungestört"	
$16 \leq k < 30$	[Fz/km]	"belebt"	
$30 \leq k < 60$	[Fz/km]	"dicht"	
$60 \leq k$	[Fz/km]	"gestört"	

Werden diese Dichtestufen durch "Höhenlinien" eingefasst, so ergibt sich Abb. 18 (siehe unten).

- Deutlich sind die Zonen verstärkter Dichte, die Werte bis zu 145 Fz/km erreichen, vor der Vollsperrung zu erkennen. Danach fließt die Dichtewelle weiter und verläßt den Beobachtungsbereich 3 - 6 Minuten später.

Diese Darstellung hat den Nachteil, daß sie stark von der Festlegung der Grenzwerte zwischen verschiedenen Verkehrsdichtebereichen (im Beispiel: 0/16/30/60) abhängt. Eine geringfügig andere Festlegung der Bereichsgrenzen kann große Auswirkungen auf die Gestalt der verschiedenen "Höhenlinien" haben. Die Angabe der Dichtewerte in numerischer Form für jedes Zeit-Weg-Intervall ist zwar exakt, aber für das menschliche Auge relativ ungeeignet, da nicht sofort die Bedeutung eines bestimmten Wertes erkannt werden kann.

7.3.2 "Ganglinien" und "Profile" für Verkehrsgrößen

Neben "Karten" werden in der Praxis zur Veranschaulichung von Verkehrsabläufen sogenannte "Ganglinien" oder "Profile" verwendet. Die "Ganglinie" stellt die zeitliche, das "Profil" die räumliche Veränderung einer Verkehrsgröße dar. Aus der Kenntnis von Ganglinien oder Profilen können ebenfalls Aussagen über die Verkehrssituation abgeleitet werden.

Als Beispiel für die Aussagekraft von Ganglinien (bzw. Profilen) sei der Verlauf der mittleren momentanen Geschwindigkeit angeführt. Es wird angenommen, daß in

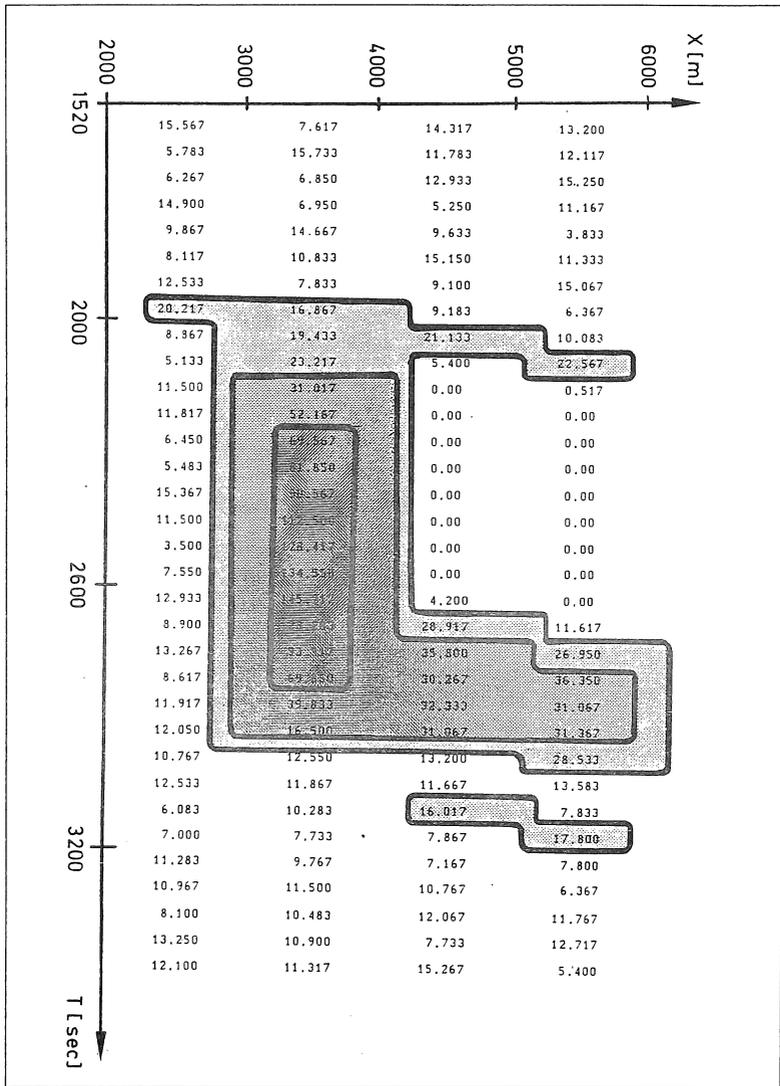


Abbildung 18:
Verkehrsdichtekarte einer 4 km langen Strecke, Beobachtungszeit 33 min.
(Ausgewertet wurden $T - X$ -Teilbereiche der Größe 60s-1000m)

50 aufeinanderfolgenden Hin- und Rückflügen die Verkehrssituation erfaßt wurde. Abb. 19 zeigt die Veränderung der mittleren momentanen Geschwindigkeiten, die durch Umrechnung der vom Flugzeug aus beobachteten Fahrzeuggeschwindigkeiten bestimmt wurden.

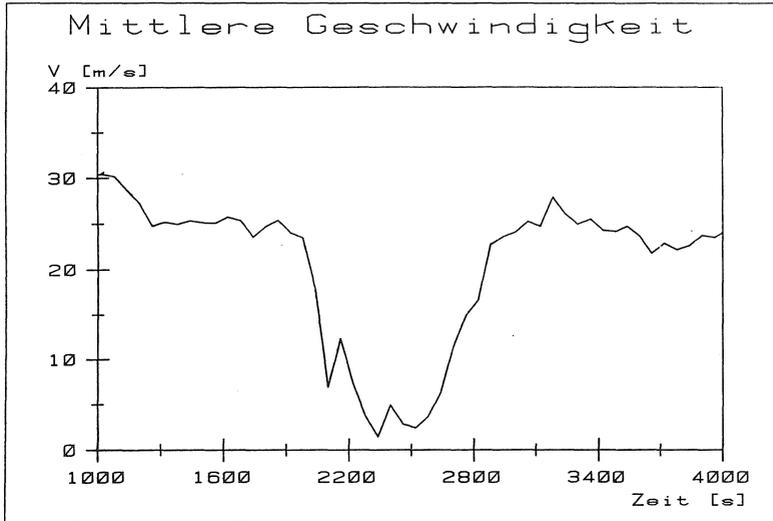


Abbildung 19:

Zeitlicher Verlauf der mittleren momentanen Geschwindigkeit aus 50 Hin- und Rückflügen (Geschwindigkeitsganglinie);

Datenbasis: Simulation des Verkehrs einer BAB mit 10-minütiger Vollsperrung

Das plötzliche, steile Absinken der mittleren momentanen Geschwindigkeit auf Werte unter 15 m/s (= 54 km/h) kennzeichnet die Verkehrsstörung. Nach Aufhebung der Sperrung steigt die Geschwindigkeit wieder an. Der etwas flachere Anstieg zeigt, daß die im Stau stehenden Fahrzeuge erst mit einer gewissen Verzögerung durch die vor ihnen anfahrens Fahrzeuge weiterfahren können.

Selbstverständlich kann in einer "Ganglinie" auch die nach 5.3 berechnete Verkehrsdichte dargestellt werden. Hier werden die Dichtewerte aufeinanderfolgender Beobachtungsflüge aufgetragen; treten ungewöhnlich hohe Werte auf, so läßt dies – wie im vorliegenden Fall – auf ein erhöhtes Verkehrsaufkommen bzw. eine Stausituation schließen. Auf ein Beispiel wird verzichtet.

Im Unterschied zur Ganglinie stellt das Profil einer Verkehrsgröße nicht die Veränderung über die Zeit, sondern entlang der Untersuchungsstrecke dar. Grundlage des Profils sind deshalb räumliche Verkehrsgrößen. Als Beispiel wird auf das Verkehrsdichteprofil in Abb. 20 verwiesen. Dabei handelt es sich nicht um Auswertungen simulierter Verkehrsabläufe; Grundlage der Darstellung sind vielmehr reale Befliegungen der BRENNER-Autobahn im Sommer 1987:

- Im Rahmen einer Untersuchung zur Leistungsfähigkeit der BRENNER-Autobahn zwischen Innsbruck und dem Brenner-Paß wurden im August 1987 (zur Zeit des Ferienreiseverkehrs) Befliegungen durchgeführt. Mit dem in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Instrumentarium wurden Luftbildaufnahmen der ca. 35 km langen Strecke ausgewertet. Sowohl die Verkehrssituation in Fahrtrichtung Norden (nach Innsbruck) als auch in Richtung Süden (nach Italien) wurde dabei untersucht. Im einzelnen wurden – neben Geschwindigkeitsauswertungen – die momentanen Verkehrsdichten für 2000 m lange Teilstrecken nach dem in Abschnitt 5.3 angegebenen Verfahren bestimmt. Für den zweiten Flug in Richtung Süden sind diese Werte für aufeinanderfolgende Teilstrecken in Abb. 20 als “momentanes Dichteprofil” dargestellt.

Man erkennt, daß zur Zeit der Überfliegung relativ ruhiger Verkehr vorherrschte. Verkehrsdichten um 20 Fz/km ergeben sich lediglich in den Bereichen um Streckenkilometer 5 und um Streckenkilometer 25, in denen die Strecke die größten (positiven) Steigungen aufweist. Daß die Verkehrsdichte auf etwas steiler ansteigenden Streckenabschnitten geringfügig zunimmt, kann nicht überraschen; dies könnte ggf. aber auch auf Zufallseinflüsse zurückzuführen sein (eine Entscheidung hierüber erlauben die Verfahren in Abschnitt 7.4).

Ganglinien bzw. Profile lassen sich auch aus “Karten” gewinnen. Dazu ist lediglich ein “Schnitt” parallel zur Zeit- oder Wegachse durch die räumlich-zeitlich gegliederten Verkehrsgrößen (wie z.B. in Abb. 18) zu erstellen. Gegebenenfalls müssen die Verkehrsgrößen dazu gemittelt werden.

Damit erlauben Ganglinien oder Profile die anschauliche Darstellung der Verkehrssituation, geben aber nur einen Bruchteil (“Schnitt”) der vorhandenen Information wieder. Wünschenswert wäre eine Darstellungsform, die die anschauliche Wiedergabe der errechneten Parameter für alle Bereiche erlaubt. Diese Forderung erfüllen dreidimensional perspektivische Darstellungen, sogenannte Blockdiagramme (s. z.B. COHEN, 1985).

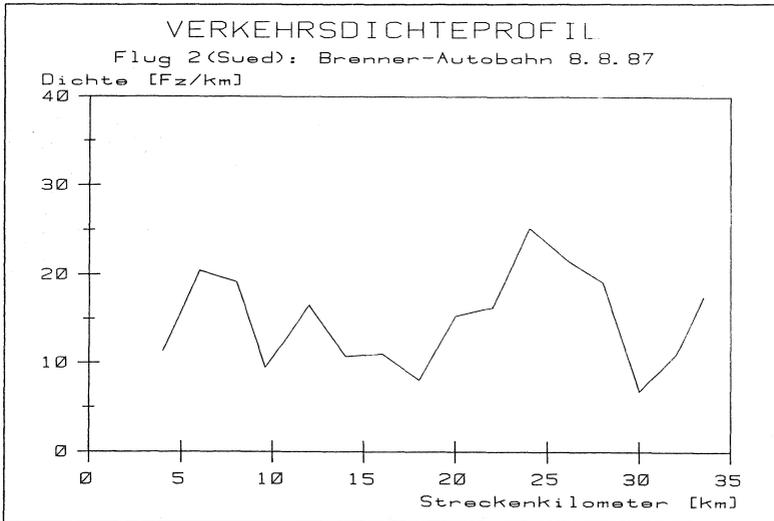


Abbildung 20:
 Räumlicher Verlauf der Verkehrsdichte auf der BRENNER-Autobahn, Fahrtrichtung Süden.
 (Flug 2 (SÜD) von Innsbruck zum Brenner-Paß, 8.8.87, 11.30 Uhr)

7.3.3 "Blockdiagramme" für Verkehrsgrößen

In Blockdiagrammen werden die Informationen der "Karten" (s. Abb. 18) als tatsächliche "Höhenwerte" abgebildet. Dabei sind Veränderungen der Verkehrsgrößen leicht erkennbar; Extremwerte sind als "Spitzen" und damit als Problempunkte sehr auffällig. Die perspektivische Darstellung ist dem Auge vertraut und erlaubt eine rasche Erfassung (s. Abb. 21).

Nachteilig bei Verwendung nur eines Blockdiagramms ist die Tatsache, daß etwaige "Spitzen" die Situation dahinter vollständig verdecken können. So ist aus dem oberen Teilbild nicht ersichtlich, wieviele Fahrzeuge am Streckenende von $t=2000s$ bis $t=2600s$ erfaßt wurden.

Abhilfe schafft die Drehung des Blickwinkels um 90 Grad. In Abb. 21 ist oben die Zeit- und unten die Wegachse horizontal aufgetragen; die untere Darstellung

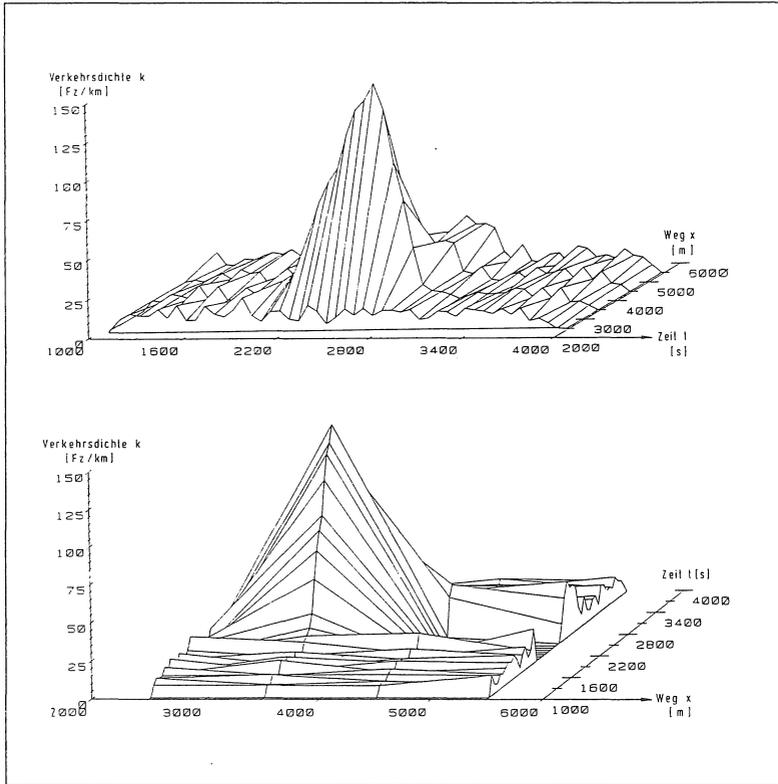


Abbildung 21:
Blockdiagramme der Verkehrsdichte im betrachteten Zeit-Weg-Intervall

ist also um 90 Grad gegenüber der oberen gedreht. Um die "Bewegungsrichtung" der Fahrzeuge nicht zu verändern, wurde der untere Bildteil zusätzlich entlang der Wegachse gespiegelt: In beiden Darstellungen bewegen sich Fahrzeuge "nach rechts hinten", d.h. vom Bildanfang ($x=1000\text{m}$, $t=1000\text{s}$) auf den Punkt ($x=7000\text{m}$, $t=4000\text{s}$) zu. Aus der unteren Darstellung ist erkennbar, daß zwischen $t=2200\text{s}$ und $t=2700\text{s}$ keine Fahrzeuge aus dem Beobachtungsbereich ausfahren.

Daneben können Blockdiagramme auch für alle anderen, räumlich-zeitlich differenziert vorliegenden Verkehrsgrößen erstellt werden. So zeigt z.B. Abb. 22 Blockdiagramme der mittleren räumlich-zeitlichen Geschwindigkeit. Auch hier wurde das untere Bild zur besseren Sichtbarkeit um 90 Grad gedreht und gespiegelt.

Wird ein Blockdiagramm der mittleren Geschwindigkeit zur Analyse der Verkehrssituation benutzt, so ist es möglich, daß ein Bereich mit kleiner mittlerer Geschwindigkeit unentdeckt bleibt, weil er in einer Umgebung normal "hoher" Geschwindigkeiten eingeschlossen ist. Zudem gilt das Interesse in diesem Fall nicht "hohen" oder "normalen" Geschwindigkeiten, sondern vor allem staugefährdeten Bereichen mit geringen Geschwindigkeiten.

Zur Untersuchung der Verkehrssituation eignet sich deshalb ein "inverses Blockdiagramm der mittleren Geschwindigkeiten" besser. Im "inversen" Blockdiagramm wird als Höhe nicht der Absolutbetrag der Geschwindigkeit, sondern die Differenz zwischen einer sehr hohen Geschwindigkeit (z.B. 200 km/h) und der jeweiligen Geschwindigkeit des $T - X$ -Teilbereichs abgebildet (es wird der "Unterschied bis zu 200 km/h " dargestellt). Anschaulich wird das positive Blockdiagramm "umgedreht"; ehemals langsame Geschwindigkeiten werden als hohe, zuvor hohe Geschwindigkeiten nun als kleine Werte wiedergegeben.

Diese einfache Transformation ("v" wird zu "200-v") erlaubt es, besonders interessante Bereiche geringer Geschwindigkeiten sofort zu identifizieren. Der Stillstand von Fahrzeugen wird als "flache Hochebene" wiedergegeben und alle Geschwindigkeiten, die kleiner als ein bestimmter Grenzwert sind, gelten als "staugefährdet". Abb. 23 zeigt ein Beispiel für ein inverses Blockdiagramm (erneut im unteren Bildteil um 90 Grad gedreht).

Ein Blockdiagramm der "Langsamkeit" (LEUTZBACH, 1972) würde im Prinzip dasselbe Bild ergeben. Bereiche mit stehendem Verkehr ($v=0$) würden allerdings als "unendlich" hoch liegende Ebenen dargestellt. Da dies grafisch unmöglich ist, wird auf die Darstellung von Blockdiagrammen der Langsamkeit verzichtet.

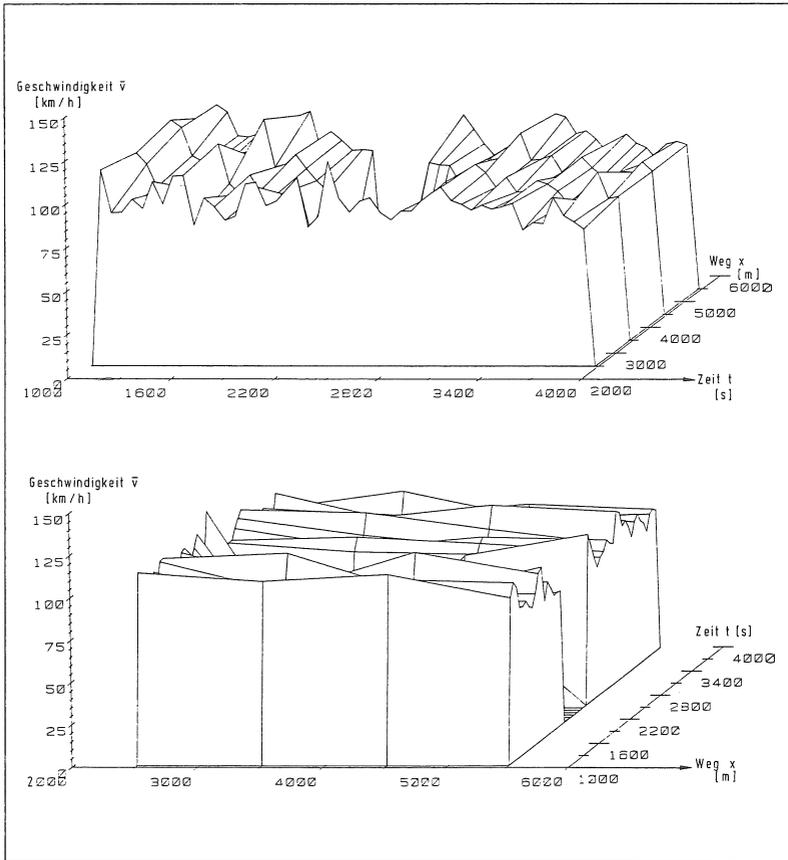


Abbildung 22:
Blockdiagramme der Geschwindigkeit im betrachteten Zeit-Weg-Intervall

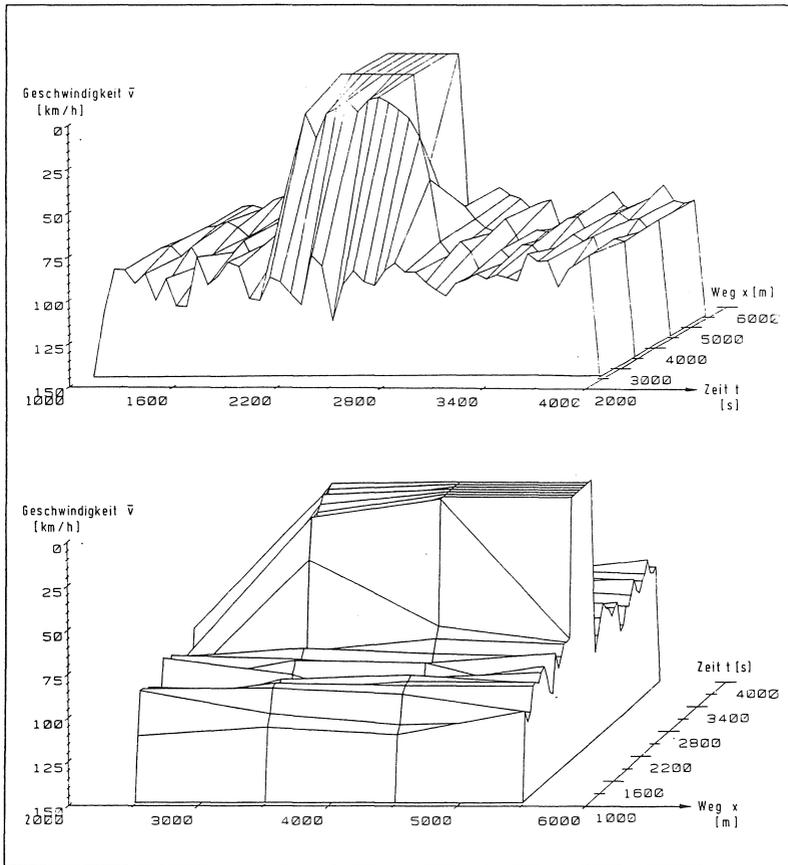


Abbildung 23:
Blockdiagramme der "inversen Geschwindigkeit" im betrachteten Zeit-Weg-Intervall

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Die nach der Bestimmung (angenäherter) Zeit-Weg-Fahrlinien berechenbaren Verkehrsgrößen für alle Zeit-Weg-Teilbereiche können auf verschiedene Arten aufbereitet und dargestellt werden.
- Die Grundform aller Darstellungen, die sog. "Karte", ist exakt, weist aber einige Nachteile auf.
- Die "Karte" und deren "dreidimensional perspektivisches " Pendant, das Blockdiagramm, besitzen denselben Informationswert. Grundlage des Blockdiagramms sind die "Kartenwerte"; aus Blockdiagrammen können "Karten" ebenfalls sehr einfach (Bildung von Höhenlinien, Überlagerung der Schnitte) gewonnen werden.
- Sowohl Ganglinien als auch Profile lassen sich sehr einfach als senkrechte Schnitte parallel zur Zeit- bzw. Wegachse eines Blockdiagramms erstellen.
- Ein automatisches Verfahren kann direkt aus den zugrundeliegenden Daten kritische Situationen bestimmen bzw. Warnmeldungen einleiten.

Insgesamt können Blockdiagramme als allgemeine und vollständige Form grafischer Darstellung von Verkehrsgrößen betrachtet werden. Sie eignen sich sowohl zur Weiterverarbeitung in Rechenanlagen als auch zur anschaulichen Darstellung für das menschliche Auge.

7.4 Bestimmung von Einflußfaktoren auf den Verkehrszustand

Sind die Bewegungslinien aller Fahrzeuge (annähernd) bekannt, so können Verkehrsgrößen für alle Zeit-Weg-Bereiche bestimmt werden (s.o). Die Kenntnis dieser Verkehrsgrößen ermöglicht neben der Beschreibung des Verkehrszustands auch die Untersuchung von Einflußfaktoren auf den Verkehr. Es sollte möglich sein, aus der Kenntnis aller Ausprägungen der jeweiligen Verkehrsgröße auf das Vorliegen zeitlicher (über die Zeit hinweg), räumlicher (entlang der Strecke) oder verkehrlicher (durch das Verhalten der Fahrzeuge bedingter) Veränderungen zu schließen.

In diesem Abschnitt wird diese Frage näher untersucht. Selbstverständlich stellen die beschriebenen Ansätze nur erste Schritte zur Entwicklung solcher Verfahren dar. Eine erschöpfende Untersuchung bedarf vor allem umfangreicheren empirischen Datenmaterials, das hier nicht vorlag.

7.4.1 Veränderungsanalyse (“VA”)

In einem ersten Ansatz wird auf die Veränderung des Geschwindigkeitsverhaltens in einem Teilintervall der Größe “a” ($a \in A$) abgehoben. Grundlage des Verfahrens ist die Überlegung, die Geschwindigkeitsänderungen aller Fahrzeuge, die einen Zeit-Weg-Teilbereich “a” durchfahren, geeignet zu addieren. Bei freiem Verkehr ist zu erwarten, daß einige Fahrzeuge beschleunigen, so daß sich die geschwindigkeitsändernden Effekte neutralisieren. Verzögern oder beschleunigen dagegen alle Fahrzeuge, die den Teilbereich durchfahren, so muß dafür eine Ursache vorliegen.

Dabei ist zu beachten, daß die Bremsverzögerung von Kraftfahrzeugen höhere Absolutwerte erreicht, als die (positive) Beschleunigung. Insgesamt wird sich die Beschleunigung “b” im Bereich $-10m/s^2 \leq b \leq 5m/s^2$ bewegen. Für die Bestimmung der Charakteristik eines Zeit-Weg-Teilbereichs genügt es also nicht, lediglich die Beschleunigungen der erfaßten Fahrzeuge zu addieren. Da Bremsbeschleunigungen nur kurze Zeit, positive Beschleunigungen dagegen längere Zeit wirken, müssen “Beschleunigungen” mit der “Zeit” gewichtet werden. Die resultierende Untersuchungsgröße ist die “Geschwindigkeit”. In dem dafür entwickelten Verfahren “VA” (= “Veränderungsanalyse”) wird wie folgt vorgegangen:

- Untersucht werden alle Fahrzeuge, die die Teilfläche “a” berühren (s. Abb. 24). Für jedes Fahrzeug werden Einfahrort, -zeit und -geschwindigkeit bestimmt. Daraus wird errechnet, wann und wo das Fahrzeug bei gleichbleibender Geschwindigkeit den Zeit-Weg-Teilbereich verlassen würde (prognostizierte Ausfahrt). Verläßt das Fahrzeug den Teilbereich nach einer kürzeren Fahrzeit oder einer längeren Strecke, so muß es die Individualgeschwindigkeit erhöht haben; im umgekehrten Fall wurde verzögert. Aus der Summation der Effekte kann auf den Charakter des Zeit-Weg-Teilbereichs geschlossen werden.

Wesentlich bei diesem Vorgehen ist, daß nicht die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit bei der Ausfahrt mit der aktuellen Geschwindigkeit bei der Einfahrt verglichen wird (da beides nur Momentaufnahmen sind). In Abb. 24 besitzt Fahrzeug 3 bei der Ausfahrt eine geringere Geschwindigkeit als bei der Einfahrt, trotzdem erfolgte insgesamt eine Geschwindigkeitserhöhung.

Diese Tatsache berücksichtigt das Verfahren, indem es die tatsächlich zurückgelegten Wegstrecken in “a” mit der bei der Einfahrt prognostizierten Wegstrecke vergleicht. Die Unterschiede werden über alle Fahrzeuge, die den Bereich ganz oder teilweise durchfahren, aufsummiert. Damit ergibt sich eine positive oder negative “Gesamt-Änderungs-Wegstrecke” (ausgedrückt in Metern oder “Hundert-Metern”). In Tab. 14 sind – für 200 Zeit-Weg-Bereiche der Größe $1000m \cdot 60s$ – die entstehenden “Gesamt-Änderungs-Wegstrecken” eingetragen.

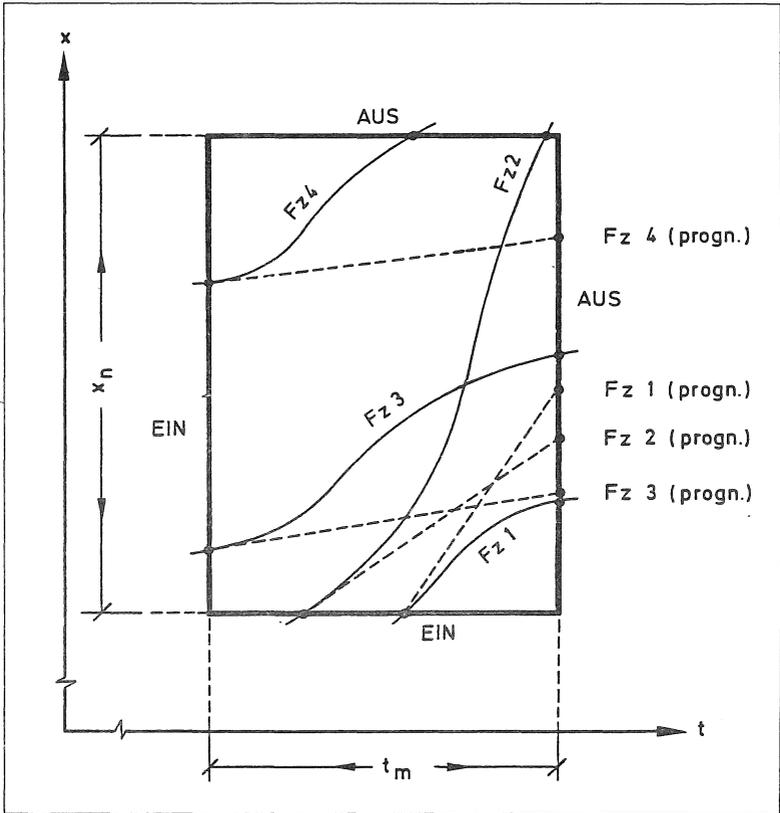


Abbildung 24:
Veränderungen der Geschwindigkeit innerhalb eines Zeit-Weg-Teilbereichs

Ergebnisausdruck für das Programm "VA"

Ausgewertetes Zeitintervall: von $t=1000s$ bis $t=4000s$ (50 min)

Ausgewertetes Wegintervall: von $x=2000m$ bis $x=6000m$ (4 km)

"Veränderungs-Wegstrecken" in Einhundert Meter (pro Intervall)

	km1	km2	km3	km4		km1	km2	km3	km4
1. Min	0	0	0	0	26. Min	0	-71	0	0
2. Min	0	0	0	0	27. Min	-12	-91	12	0
3. Min	0	0	0	0	28. Min	0	-33	147	0
4. Min	0	0	0	0	29. Min	-11	19	99	-14
5. Min	0	0	0	0	30. Min	0	-80	35	-26
6. Min	0	0	0	0	31. Min	0	102	12	-14
7. Min	0	0	0	0	32. Min	0	0	30	-29
8. Min	0	-14	0	0	33. Min	0	0	0	-16
9. Min	0	0	0	0	34. Min	-11	0	0	0
10. Min	0	-16	0	-11	35. Min	0	0	0	0
11. Min	0	0	-11	0	36. Min	0	0	0	0
12. Min	-12	0	0	0	37. Min	0	0	0	0
13. Min	0	29	0	0	38. Min	0	0	0	0
14. Min	0	0	0	0	39. Min	0	0	0	0
15. Min	0	0	0	0	40. Min	0	0	0	0
16. Min	0	0	0	0	41. Min	0	-11	0	0
17. Min	0	-17	-12	0	42. Min	0	0	0	0
18. Min	0	-152	0	-12	43. Min	0	0	0	0
19. Min	0	-99	0	0	44. Min	0	0	0	0
20. Min	0	-84	0	0	45. Min	0	0	0	0
21. Min	0	-126	0	0	46. Min	0	0	0	0
22. Min	0	-107	0	0	47. Min	0	0	0	0
23. Min	0	-95	0	0	48. Min	0	0	0	0
24. Min	-14	-94	0	0	49. Min	0	0	0	0
25. Min	0	-164	0	0	50. Min	0	0	0	0

Tabelle 14: "Gesamt-Veränderungs-Wegstrecken" für 200 Zeit-Weg-Teilbereiche

Tab. 14 stellt einen Ergebnisausdruck des Programms "VA" dar. Die Eingabe besteht aus den (angenäherten) Zeit-Weg-Fahrlinien; Ausgabe von "VA" sind die nach obigem Verfahren berechneten Weglängen. Negative Zahlen bezeichnen Zeit-Weg-Teilbereiche, in denen die Fahrzeuge verzögern, z.B. vor einem Stau. Positive Strecken kennzeichnen Bereiche, in denen die Fahrzeuge "beschleunigen". Dadurch ist es möglich, die charakteristischen Eigenschaften räumlich-zeitlicher Teilbereiche zu erfassen und gewisse verkehrsbeeinflussende Effekte zu erkennen.

7.4.2 Doppelte Varianz-Analyse ("DVA")

Im Rahmen der ebenfalls implementierten "Doppelten Varianzanalyse" wird der Einfluß zweier voneinander unabhängiger Einflußgrößen auf die untersuchten Verkehrsparameter (Dichte, Geschwindigkeit, Lkw-Anteil o.ä.) bestimmt. Auch hier müssen die – aus den Bewegungslinien bestimmten – Verkehrsgrößen für jeden Zeit-Weg-Teilbereich vorliegen. Es wird unterstellt, daß sich jeder einzelne (zeitlich-räumlich gegliederte) Parameter " p_{ij} " wie folgt darstellen läßt:

$$p_{ij} = \text{Mittelwert} + \text{"Zeitfaktor"} + \text{"Wegfaktor"} + \text{"Restfaktor"}$$

Wechselwirkungen enthält das System somit nicht. Die Voraussetzungen sind in KREYSZIG (1968) oder SACHS (1984) näher beschrieben. Damit kann erstmals die Frage beantwortet werden, ob die (zwangsläufig) unterschiedlichen Verkehrsparameter im Rahmen üblicher statistischer Schwankungen liegen oder ob Fremdeinflüsse eine deutlichere Veränderung bewirken.

Dazu wird angenommen, daß für alle Zeit-Weg-Teilbereiche einer Beobachtungsfläche Verkehrsgrößen bestimmt wurden. Damit liegen ($i \cdot j$) Werte vor. Die Summe der Abweichungsquadrate aller Parameter vom Gesamtmittelwert wird in je eine Quadratsumme zwischen Zeilen- und Spaltenmittelwerten sowie eine quadratische Restsumme aufgespalten. Die sich unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade ergebenden mittleren Abweichungsquadrate werden mit Werten der F-Verteilung des gewählten Signifikanzniveaus verglichen. Das Ergebnis des Vergleichs bestimmt, ob auf dem gewählten Niveau ein statistisch signifikanter Einfluß des Weges oder der Zeit vorliegt.

Die doppelte Varianzanalyse wird innerhalb des Programmteils "DVA" durchgeführt. Eingabe für "DVA" ist eine zweidimensionale Matrix (siehe z.B. die Dichtekarte in Abb. 18), wobei jedes Matrixelement einem bestimmten Zeit-Weg-Intervall "a" entspricht.

Innerhalb des Programms werden die jeweiligen Teil-Varianzen für die Einflußfaktoren berechnet. Weiter fordert das Programm für die jeweils vorliegende Zahl

von Beobachtungen (und damit für die Freiheitsgrade jeder Einflußgröße) einen bestimmten Wert der F-Verteilung an. Dieser Wert kann nach Wahl eines bestimmten Signifikanzniveaus direkt aus statistischen Tabellen abgelesen werden. Auf die Integration der jeweils bevorzugten Tabellen (95% Niveau, 99% Niveau o.ä.) in das Programm wurde verzichtet, um dem Programmbenutzer eine freizügige Wahl des Signifikanzniveaus zu ermöglichen. Tabellen finden sich in allen statistischen Standardwerken.

Das Ergebnis des Programms besteht – neben den entsprechenden Parametern zum Vergleich mit den Werten der F-Verteilung – im Prinzip aus zwei “Ja/Nein”-Antworten:

- der Antwort auf die Frage, ob statistisch signifikante Änderungen der Verkehrsparameter auf Einflüsse des Weges (z.B. in Kurven oder Steigungen) zurückzuführen sind (bzw. korrekt: ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Spalten vorliegt), und
- der Antwort auf die Frage, ob statistisch signifikante Änderungen der Verkehrsparameter auf Einflüsse der Zeit zurückzuführen sind (bzw. ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Zeilen vorliegt).

Wie diese Antworten zu interpretieren sind, soll an dem bereits mehrfach untersuchten Testdatensatz mit 10-minütiger Autobahnvollsperrung erläutert werden, da sich dieser Datensatz am besten zur Veranschaulichung eignet.

7.4.3 Test und Interpretation der “DVA”

Die Programmläufe für den Test des Moduls “DVA” wurden mit zwei Zielrichtungen – und zwei verschiedenen Datengrundlagen – durchgeführt.

- Als erstes wurde “DVA” mit Original-Simulationsdaten (aus MISSION) getestet:
Bei der Erzeugung der Simulationsdaten wurden bestimmte räumliche und zeitliche Einflußfaktoren vorgegeben. Dazu berechnete MISSION Fahrzeug-Bewegungslinien, aus denen in kleinen Zeit-Weg-Teilbereichen charakteristische Verkehrsgrößen bestimmt wurden (Dichte, mittlere Geschwindigkeit). Diese Matrix von Verkehrsparametern bildete die erste Eingabe für DVA. Es wurde untersucht, ob DVA die ursprünglich unterstellten Einflußfaktoren korrekt erkennt.
- Als zweites wurde “DVA” mit Daten getestet, die aus der bewegten Beobachtung vom Flugzeug aus errechnet worden waren (unter Verwendung des hier beschriebenen und im folgenden als “FLUG”-Auswertung bezeichneten Verfahrens).

Dazu war MISSION-Simulationsdaten die Bewegung eines Flugzeugs überlagert worden, um die in bewegten Beobachtungen meßbaren Daten bestimmen zu können (s.o.). Aus der Zuordnung mehrfach erfaßter Fahrzeuge wurden (angenäherte) Fahrzeug-Bewegungslinien berechnet, die ebenfalls zur Bestimmung von Verkehrsgrößen herangezogen worden waren. Diese Matrix von Verkehrsparametern bildete die zweite Eingabe für "DVA". Es wurde untersucht, ob das entwickelte Auswerteprogramm trotz der drastisch reduzierten Information, die ihm aus den bewegten Beobachtungen noch zur Verfügung stand, die Erkennung der ursprünglichen Einflüsse erlaubt.

Im ersten Fall wird also die Funktionsfähigkeit von "DVA" getestet, während im zweiten Fall die Güte der in Abschnitt 4 bis 7 entwickelten Verfahren zur Auswertung bewegter Luftbildbeobachtungen geprüft wird.

Hierzu wurden jeweils Zeit-Weg-Teilbereiche der Größe $60s \cdot 1000m$ definiert und für diese Bereiche die mittlere räumlich-zeitliche (\approx momentane) Geschwindigkeit sowie die Verkehrsdichte bestimmt. Bei der als Beispiel verwendeten Vollsperrung einer zweistreifigen BAB ergaben sich vier Weg-Teilbereiche (da die Gesamtlänge der Strecke vier Kilometer betrug) und 50 Zeit-Teilbereiche (da die ausgewertete Beobachtungsdauer 50 Minuten umfaßte). Alle vier Datensätze (Geschwindigkeit aus Originaldaten, Geschwindigkeit aus "FLUG", Dichte aus Originaldaten, Dichte aus "FLUG") wurden in "DVA" auf statistisch signifikante zeitliche und räumliche Einflüsse untersucht (s. Tab. 15).

Es wurde ein statistisch signifikanter Einfluß auf dem 95 % -99 % Signifikanzniveau bei folgenden Datensätzen/Verkehrsgrößen festgestellt:

Eingabedatensatz/Verkehrsgröße:	zeitlich:	räumlich:
a) bei Verwendung der Original-Simulationsdaten und Berechnung der mittleren Geschwindigkeit	Ja / Ja	Ja / Ja
b) bei Verwendung der "FLUG"-Auswertedaten und Berechnung der mittleren Geschwindigkeit	Ja / Ja	Ja / Ja
c) bei Verwendung der Original-Simulationsdaten und Berechnung der Verkehrsdichte	Nein / Nein	Ja / Ja
d) bei Verwendung der "FLUG"-Auswertedaten und Berechnung der Verkehrsdichte	Nein / Nein	Ja / Ja

Tabelle 15:

Ergebnisse von "DVA" für die gesamte Beobachtung auf dem 95 % / 99 % Signifikanzniveau (5 % / 1 % Irrtumswahrscheinlichkeit)

Das Ergebnis läßt erkennen:

- Die statistische Untersuchung der Originaldaten ergibt dieselben Aussagen wie die Untersuchung der aus Luftaufnahmen bestimmten Datensätze. Dadurch verstärkt sich das Vertrauen in die Güte der entwickelten Verfahren zur Auswertung bewegter Beobachtungen.
- Es treten keine Unterschiede zwischen dem 95% und dem 99% Niveau auf; das Ergebnis kann also bereits auf einem “frühen” (tiefen) Signifikanzniveau als “sicher” betrachtet werden. Dies bestätigt auch die Analyse der Quotienten $v_1 = (q_{s_1} 2 / q_{s_3} 2)$ und $v_2 = (q_{s_2} 2 / q_{s_3} 2)$ (zur Bezeichnungsweise s. KREYSZIG, 1968): Die tatsächlichen Quotienten unterscheiden sich deutlich von den für die Ja/Nein-Entscheidung relevanten Grenzquotienten. Daraus kann auf eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit des Ergebnisses geschlossen werden. Die Entscheidung fällt immer eindeutig aus; “Fast-Entscheidungen” (in der Nähe des Grenzwertes der F-Verteilung) kommen nicht vor.
- Die Vollsperrung der Fahrbahn bei $x=4000\text{m}$ für $t=10\text{min}$ schlug sich auf 95 % Niveau und auf dem 99 % Signifikanzniveau als Einfluß von Weg und Zeit auf die Geschwindigkeit nieder. Dieses Ergebnis war zu erwarten: die Geschwindigkeiten änderten sich deutlich entlang des Weges (vor oder nach der Vollsperrung) und über die Zeit (vor, während oder nach der Sperrung).
- Dagegen ergab sich bei Verwendung der Dichte als Verkehrsgröße nur ein signifikanter Einfluß des Weges, nicht aber der Zeit. Auch dieses Ergebnis ist einsichtig, da sich die Verkehrsdichten räumlich vor und hinter der Vollsperrung völlig voneinander unterscheiden (hinter der Sperrung: Dichte “0”; vor der Sperrung: maximale Dichte “150”). Dagegen sind zu allen Zeitpunkten vor, während und nach der Störung immer gleich viele Fahrzeuge auf der Strecke anzutreffen (kein Fahrzeug kann die Fahrbahn verlassen); ein zeitlicher Einfluß ist also nicht feststellbar.

Auch die anderen Testläufe bestätigen das hier an einem Beispieldatensatz aufgezeigte Bild. Das beschriebene Programm “DVA” eignet sich somit zur Erkennung signifikanter Einflußfaktoren auf die Verkehrssituation. Allerdings ist zunächst nicht klar, wann bzw. wo diese Einflußfaktoren wirksam werden. Vor allem bei der Untersuchung vieler (kleiner) Zeit-Weg-Bereiche kann nicht geprüft werden, ob nur ein einzelner, sehr starker räumlich/zeitlicher Einfluß vorliegt oder ob der festgestellte Einfluß auf viele, kleinere Veränderungen zurückzuführen ist. “DVA” eignet sich allerdings auch zur Beantwortung dieser Fragen.

7.4.4 Doppelte Varianzanalyse für Zeit-Weg-Teilbereiche

Unter Verwendung von "DVA" kann auch die Frage beantwortet werden, wo bzw. wann die statistisch signifikanten Einflüsse auftraten.

Dazu muß das Programm "DVA" nicht nur die gesamte räumlich-zeitliche Beobachtung, sondern auch eine Reihe kleinerer Zeit-Weg-Teilbereiche auf Einflußfaktoren hin überprüfen. Hierzu eignen sich Teilintervalle, die zeitlich und räumlich jeweils zwischen vier und acht "Meßeinheiten" (und damit insgesamt $4 \times 4 = 16$ bis $8 \times 8 = 64$ Zeit-Weg-Teilflächen "a") enthalten.

Bezogen auf das obige Beispiel von insgesamt 4×50 Weg-Zeit-Intervallen bedeutet das, daß nicht weniger als alle vier räumlichen Intervalle (Teilstrecken) ausgewertet werden sollten. Eine Teilung der Strecke ist allerdings nicht sinnvoll. Dagegen ist es sinnvoll, das Programm "DVA" für kürzere Zeitintervalle einzusetzen, z.B. für Intervalle von sechsmal einer Minute (statt 50mal einer Minute) Dauer. In diesem Fall wird die doppelte Varianzanalyse nicht in einem Lauf mit $50 \times 4 = 200$ Werten, sondern stattdessen in acht Läufen mit $4 \times 6 = 24$ Wertepaaren durchgeführt. Damit werden in jedem der acht Teilläufe sechs Zeilen der Matrix der Verkehrsdichte oder der mittleren Geschwindigkeit (wie beispielsweise in Abb. 18 dargestellt) untersucht. Für jeden der Teilläufe ergibt sich eine Ja/Nein-Aussage, ob im untersuchten Teilintervall ein signifikanter Einfluß von Weg und Zeit festgestellt werden kann.

Auch hier wurde die doppelte Varianzanalyse mit den Verkehrsgrößen "Dichte" und "Geschwindigkeit" sowohl für die (Original-)Simulationsdaten als auch für die von "FLUG" bestimmten Verkehrsdaten durchgeführt. In der folgenden Tabelle 16 (Weg und Zeit) sind die Ergebnisse der doppelten Varianzanalyse bei einem Signifikanzniveau von 95% zusammengefaßt:

D V A : Vergleich zwischen
Original-Eingabedaten (Fahrlinien aus MISSION) ("real") und
daraus berechneten Daten der bewegten Beobachtung ("FLUG").
Ausgewertet wurden Zeit-Weg-Teilintervalle der Größe :
Zeit $t = 60$ Sekunden Weg $x = 1000$ Meter

Es besteht ein signifikanter Zeit-Weg-Einfluß auf dem
95%-Signifikanzniveau in den Zeit-Weg-Teilintervallen:

Intervall	WEG				ZEIT			
	Geschw.		Dichte		Geschw.		Dichte	
	real	Flug	real	Flug	real	Flug	real	Flug
2-7	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
8-13	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
14-19	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein
20-25	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein
26-31	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein
32-37	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
38-43	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein
44-48	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
2-47 (gesamt)	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein

Tabelle 16:
Einfluß des Weges und der Zeit auf Verkehrsparameter für 200 Zeit-Weg-Teilbereiche

Eine Analyse der Ergebnisse läßt erkennen:

- Mit einer einzigen Ausnahme (Intervall 38-43, Einfluß der Zeit) liefert die Auswertung der Originaldaten dieselben Ergebnisse wie die Auswertung der aus bewegten Beobachtungen ermittelten Zeit-Weg-Fahrlinien. In dem Zeit-Weg-Bereich, für den sich unterschiedliche Aussagen ergeben, wurden vom Zuordnungsmodul einige Fahrlinien neu generiert (da diese Fahrzeuge vorher nicht beobachtet worden waren). Dadurch ergibt sich auf dem 95% Signifikanzniveau ein (in den Originaldaten nicht vorliegender) Einfluß der Zeit. In allen anderen Fällen werden die Einflußfaktoren korrekt bestimmt. Während sich bei der Analyse auf dem 95 % Signifikanzniveau in einem Bereich eine unterschiedliche Bewertung ergab, lauten die Ergebnisse bei der Untersuchung auf dem 99 % Signifikanzniveau in allen Fällen gleich. Hier verschwinden die Unterschiede völlig.
- Untersucht man den Einfluß des Weges auf die Geschwindigkeit und die Verkehrsdichte, so ergibt sich in den Intervallen 14-31 (in denen die Vollsperrung bestand) ein signifikanter Einfluß des Weges. Dieses Ergebnis ist korrekt und war so zu erwarten. In allen anderen Fällen ergibt sich kein Wegeinfluß – ebenfalls ein korrektes Ergebnis.
- Bei der Untersuchung der zeitlichen Einflußfaktoren muß zwischen der Analyse der Geschwindigkeit und der Verwendung der Verkehrsdichte unterschieden werden:
 - Wird die Verkehrsdichte verwendet, so läßt sich kein zeitlicher Einfluß nachweisen (da sich die Zahl der Fahrzeuge pro Strecke durch die Sperrung nicht ändert).
 - Wird dagegen die mittlere Geschwindigkeit untersucht, so sollte sowohl am Anfang als auch am Ende der Vollsperrung ein zeitlicher Einfluß auf die Geschwindigkeit feststellbar sein. Nach Tab. 16 wird lediglich der Beginn der Sperrung als zeitlich signifikante Änderung erkannt. Zwei Gründe sind dafür verantwortlich:
 - Zum einen sind die Geschwindigkeitsunterschiede beim Abbremsen der Fahrzeuge größer als beim (z.T. zeitversetzten) Anfahren. Dadurch ist eine Beschleunigung generell schlechter als zeitlicher Einfluß erkennbar.
 - Zum anderen ist die Dauer des auszuwertenden Zeitraums von großer Bedeutung für das Ergebnis. Werden z.B. jeweils sechs Zeilen (= sechs Minuten) untersucht, und ist in einem dieser Teilbereiche der gesamte Anfahrvorgang aller Fahrzeuge enthalten, so läßt sich natürlich keine zeitliche Veränderung in diesem Zeitraum erkennen.

Mit anderen Worten: Signifikante Veränderungen können nur entdeckt werden, wenn sie auch im Auswertebereich als Unterschiede enthalten sind. Unterscheiden sich dagegen nur zwei benachbarte Auswertebereiche voneinander, nicht aber die Werte in den einzelnen Bereichen, so kann von "DVA" auch kein Einfluß erkannt werden.

Um dieser Schwierigkeit zu begegnen, sollte deshalb in der Praxis die Untersuchung von Teilintervallen in alternierend versetzten Stufen und mit verschiedenen Intervallgrößen erfolgen. Erst die Analyse "versetzter" Teilbereiche erlaubt die Suche nach allen Einflußfaktoren, da dann Unterschiede im Datenmaterial nicht mehr mit den Intervallgrenzen zusammenfallen können.

Das bedeutet, daß sowohl die Zeit-Weg-Teilbereiche:

2-7 8-13 14-19 20-25 ... (usw.)

als auch die Bereiche

0-4 5-10 11-16 17-22 ... (usw.)

untersucht werden müssen. Erst dann ist sichergestellt, daß keine Einflußfaktoren übersehen werden. Wird diese zweite – alternierende – Analysereihe für das in Tabelle 16 beschriebene Beispiel durchgeführt, so wird auch tatsächlich der zweite, zeitliche Einfluß auf die Geschwindigkeit bei Aufhebung der Vollsperung gefunden.

"DVA" erlaubt damit die zuverlässige Bestimmung zeitlicher und räumlicher Einflußfaktoren auf Verkehrsgrößen, sofern die Testreihe komplett und alternierend versetzt durchgeführt wird. Selbstverständlich erfolgt dies in dem beschriebenen Programmpaket ebenfalls automatisch. Untersuchungen zur Bestimmung von räumlichen oder zeitlichen Einflüssen können damit erstmals ebenfalls automatisch durchgeführt werden.

7.4.5 Analyse der "Flüssigkeit des Verkehrs"

Zur Bestimmung der Zeit/Weg-Einflüsse wurde innerhalb der doppelten Varianzanalyse die gesamte Quadratsumme " q_s " in drei Faktoren q_{s_1} , q_{s_2} , q_{s_3} zerlegt:

" q_{s_1} " entspricht der Quadratsumme zwischen dem Mittelwert der Zeilen,

" q_{s_2} " dem entsprechenden Wert der Spalten und

" q_{s_3} " der quadratischen Restsumme.

Im Term " q_{s_3} " sind dabei alle Störgrößen und Einflüsse zusammengefaßt, die nicht durch die beiden ersten Effekte erfaßt werden können. Die Größe von " q_{s_3} " gibt damit an, wie stark sich die Verkehrsgrößen "per se" im betrachteten Zeit-Weg-Intervall verändern bzw. wie unruhig der Verkehrsablauf nach Eliminierung von Zeit- und Wegeinflüssen ist. Die quadratische Restsumme kann damit als Maß für die Flüssigkeit, die innere Unruhe des Verkehrsablaufs oder der verkehrlichen

Einflüsse betrachtet werden.

Innerhalb des Programms "DVA" findet die Aufteilung in die drei quadratischen Summen automatisch statt. Es ist deshalb möglich, die quadratische Restsumme auszugeben und als Maß für alle anderen, hier verkehrlich genannten Einflüsse zu verwenden.

In dem als Beispiel verwendeten Datensatz (mit Vollsperrung beider Fahrstreifen) ergeben sich für die Restsumme " qs_3 " die in Tab. 17 zusammengefaßten Werte:

D V A : Vergleich zwischen
Original-Eingabedaten (Fahrlinien aus MISSION) ("real") und
daraus berechneten Daten der bewegten Beobachtung ("FLUG").
Ausgewertet wurden Zeit-Weg-Teilintervalle der Größe :
Zeit $t = 60$ Sekunden Weg $x = 1000$ Meter

Die quadratischen Reststreuungen innerhalb der 200
Zeit-Weg-Teilintervalle erreichen folgende Werte :

INTERVALL	GESCHWINDIGKEIT		VERKEHRSDICHTE	
	real	Flug	real	Flug
2-7	52.9	58.3	8.4	9.2
8-13	115.6	119.0	18.2	17.5
14-19	639.4	493.4	196.3	184.5
20-25	236.3	147.0	161.2	114.5
26-31	390.5	337.2	576.3	557.2
32-37	35.6	51.1	11.0	10.9
38-43	19.1	12.9	9.9	10.1
44-48	39.1	26.3	13.6	13.3

Tabelle 17:
Flüssigkeit des Verkehrsablaufs, dargestellt anhand der quadratischen Reststreuung für 200 Zeit-Weg-Teilbereiche

Aus Tab. 17 ist zu erkennen:

- In den Intervallen 14-31 sind erheblich größere Werte der quadratischen Restsumme festzustellen. Selbst nach Eliminierung der Zeit-/Weg-Einflüsse treten hier noch "Verwirbelungen" (und damit auf andere Einflüsse zurückführende Veränderungen) auf. Eine mögliche Interpretation dieser Tatsache ist, daß in diesem Bereich – neben den Auswirkungen der Vollsperrung – auch Wechselwirkungen zwischen einzelnen Fahrzeugen deutlich werden.
- In den übrigen Bereichen liegen relativ geringe quadratische Restsummen vor ($\hat{=}$ ruhiger Verkehrsablauf).
- I.d.R. sind die quadratischen Restsummen wegen der größeren Absolutbeträge bei der Untersuchung der Geschwindigkeiten größer. Vor allem beim Abbremsen der Fahrzeuge (Intervall 14-19) ergeben sich die größten quadratischen Restsummen bei Analyse der Geschwindigkeit. Gegen Ende der Vollsperrung (Intervall 26-31) sind die Unterschiede der Verkehrsdichte allerdings so groß geworden, daß die quadratischen Restsummen der Dichte sehr große Werte (>500) erreichen. Dies ist ein Zeichen der entstandenen Ungleichgewichte.
- Größere Unterschiede zwischen den Originaldaten und den Ergebnissen bewegter Beobachtungen sind nicht feststellbar. Auch hier verläuft der Test für die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren positiv, alle Tendenzen werden richtig erkannt.
- Allerdings ist festzuhalten, daß die Unterschiede zwischen Original- und berechneten Daten bei Untersuchung der Geschwindigkeit größer sind als bei Analyse der Verkehrsdichte. Die Verkehrsdichte kann also exakter bestimmt und ausgewertet werden als die Fahrzeuggeschwindigkeit. Dies kann auch dadurch erklärt werden, daß die Geschwindigkeit leichter veränderbar ist und häufiger wechselt als der Aufenthaltsort eines Fahrzeugs (und damit die Dichte). Zudem wird innerhalb des Zuordnungsmoduls die Bewegungslinie eines Fahrzeugs durch verschiedene Geradenstücke approximiert, was fast zwangsläufig zu Abweichungen bei einzelnen Geschwindigkeiten führen muß.

Insgesamt bietet die Analyse der quadratischen Restsummen innerhalb des Programms "DVA" eine weitere Möglichkeit, automatisch ausgewertete Luftbilddaten bei verschiedenen Fragestellungen einzusetzen. Vor allem zwei Ergebnisse zeigten sich bei der Überprüfung der Testdatensätze (die allerdings noch durch umfangreichere Tests überprüft werden müssen):

- DVA erkennt zeitliche, räumliche sowie “verkehrliche” (sonstige) Einflüsse zuverlässig.
- Die Auswertung von Daten, die mit dem für bewegte Beobachtungen entwickelten Instrumentarium bestimmt wurden, ergibt i.d.R. zutreffende (auch in den Originaldaten vorliegende) Ergebnisse.

Damit wird die Analyse der aus bewegten Beobachtungen errechneten Größen in dieser Arbeit abgeschlossen. Selbstverständlich wurden die dargestellten Verfahren nur anhand von Beispielen untersucht; eine erschöpfende Darstellung konnte, auch wegen der geringen Menge realer Beobachtungen, nicht durchgeführt werden. Es konnten dagegen zahlreiche Verwendungsmöglichkeiten für die aus bewegten Beobachtungen errechneten Größen aufgezeigt werden. Die vorgestellten Verfahren eröffnen eine Vielzahl neuer, verkehrstechnisch interessanter Einsatzgebiete.

Wissenschaftlich interessant wäre beispielsweise auch die Verwendung des so bestimmten Datensatzes zur Eichung bzw. Validierung von Simulationsalgorithmen (s. z.B. BRANNOLTE u. HOLZ, 1983; HUBSCHNEIDER, 1983) oder von Verkehrsflußtheorien (wie etwa der Kontinuumstheorie, s. LIDTHILL u. WHITHAM, 1955; LEUTZBACH, 1972 oder KÜHNE, 1981). Dazu sind aber zusätzliche, umfangreiche Beobachtungen realer Verkehrsabläufe notwendig.

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten der automatischen Bestimmung, Verwendung und Analyse von Verkehrsgrößen aus bewegten Beobachtungen vom Flugzeug aus untersucht.

Zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen eignen sich bewegte Beobachtungen besser als die zumeist verwendeten lokalen Beobachtungen. Deshalb wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Ansätze zur Erfassung und Auswertung von Luftbildern entwickelt. Da die Auswertung des Bildmaterials aber bisher nur "manuell" möglich war und einen hohen Zeit- und Kostenaufwand bedingte, war die Verwendung dieser Ansätze in der Praxis nur beschränkt möglich.

Das hier vorgestellte Verfahren, das sich auf automatische Auswerteverfahren von VÖGTLE (1988) stützt, erlaubt erstmals die automatische Bestimmung repräsentativer und unverzerrter Verkehrsparameter aus Luftbilddaten. Dazu wird ein System theoretischer Umrechnungsbeziehungen geschaffen, das Vergleiche bzw. Kombinationen der bewegten Beobachtung mit allen anderen Beobachtungsarten erlaubt. Die praktische Berechnung der Verkehrsgrößen wird durch die Angabe von Algorithmen für verschiedene Gruppen von Parametern und ein spezielles Zuordnungsprogramm erleichtert bzw. ermöglicht.

Die so bestimmten Verkehrsgrößen lassen sich für eine Vielzahl von Aufgaben verwenden. In der Arbeit werden sowohl verschiedene Darstellungsformen als auch Verfahren zur weitergehenden Verarbeitung und Analyse der berechneten Daten untersucht. So kann beispielsweise unter Verwendung statistischer Verfahren das Vorliegen signifikanter zeitlicher, räumlicher oder "verkehrlicher" Einflußfaktoren abgeschätzt werden. Dadurch wird der Verwendung von Luftbilddaten zur Bestimmung von Verkehrsgrößen ein weites Feld neuer Möglichkeiten eingeräumt.

8.1 Vorgehen und Ergebnis

Die eigentliche Verkehrsbeobachtung erfolgt vom Flugzeug aus (sog. "bewegte Beobachtung"), das die Strecke mehrfach sowohl in Fahrtrichtung (Hinflug) als auch entgegen der Fahrtrichtung (Rückflug) der beobachteten Fahrzeuge überfliegt. Dabei erfaßt die CCD-Kamera etwa 50-100 m der Beobachtungsstrecke.

Die Auswertung (s. VÖGTLE, 1989) der Bilddaten erfolgt nach dem Ende des Fluges und liefert einen Datensatz, der für jedes beobachtete Fahrzeug die Werte

Zeit, Ort, Geschwindigkeit, Größe, Grauwert (Farbe) und Spur zum Zeitpunkt der Beobachtung enthält. Auf diesen Werten basieren alle weiteren Analysen.

Allerdings sind die daraus direkt abgeleiteten "bewegten" Verkehrsparameter im Vergleich zur momentan vorliegenden Situation in mehreren Punkten verzerrt:

- In Hinflügen werden prinzipiell "zu wenige" Fahrzeuge beobachtet. In der Stichprobe sind schnelle Fahrzeuge unter-, langsame Fahrzeuge überrepräsentiert.
- In Rückflügen werden prinzipiell "zu viele" Fahrzeuge beobachtet. In der Stichprobe sind schnelle Fahrzeuge über-, langsame Fahrzeuge unterrepräsentiert.

Um die charakteristischen Verzerrungen der bewegten Beobachtung abschätzen bzw. eliminieren zu können, werden die theoretischen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Beobachtungsarten (momentan, lokal, räumlich-zeitlich und bewegt) analysiert und in mathematischen Umrechnungsbeziehungen dargestellt. Umrechnungsbeziehungen werden für die jeweiligen Geschwindigkeitsverteilungen, die mittleren Geschwindigkeiten, die Geschwindigkeitsvarianzen und die Parameter der Zustandsgleichung explizit angegeben.

Das entwickelte System von Beziehungen eliminiert die Verzerrungen der bewegten Beobachtung und erlaubt somit deren praktische Verwendung. Es kann daneben auch für alle anderen Beobachtungsarten eingesetzt werden und erlaubt letztendlich die Umrechnungen von Parametern verschiedener Beobachtungsarten ineinander bzw. einen Vergleich oder eine Kombination solcher Größen.

Unter Verwendung der entwickelten Verfahren können praktisch alle relevanten makroskopischen Verkehrsgrößen bestimmt werden. Das angegebene Berechnungsschema definiert drei Gruppen von Verkehrsparametern und beschreibt für jede Gruppe den jeweiligen Rechengang. Damit ist z.B. die Berechnung folgender Größen möglich:

- Verkehrsdichte (über Zeit und Weg hinweg)
- mittlere Geschwindigkeit/Geschwindigkeitsverteilungen
- Lkw-Anteile, Anteile anderer Fahrzeuggruppen
- Fahrstreifenbelegungen und Abstandsverhalten
- Überholungen (passive und aktive)
- alle damit verwandten bzw. davon abgeleiteten Größen.

Zur Beantwortung weitergehender Fragestellungen bildet die Bestimmung individueller (mikroskopischer) Fahrzeug-Bewegungslinien eine Grundvoraussetzung. Diese Zeit-Weg-Fahrlinien sowie alle damit zusammenhängenden, mikroskopischen Verkehrsgrößen können erst berechnet werden, wenn es gelingt, mehrfach beobachtete Fahrzeuge einander zuzuordnen. Unter Verwendung des dafür entwickelten Zuordnungsprogramms gelingt dies mit vergleichsweise großer Genauigkeit.

Damit kann erstmals aus Luftbildern ein Datensatz bestimmt werden, der (in angenäherter Form) die Bewegung aller Fahrzeuge im beobachteten Zeit-Weg-Intervall beschreibt. Dieser Datensatz erlaubt die Ableitung weiterer Parameter; hierzu ist lediglich ein auf die spezielle Fragestellung zugeschnittenes Auswerteprogramm zu entwickeln, das die gewünschte Größe aus den Fahrlinien errechnet. Damit werden etwa Untersuchungen zum Abstandsverhalten, zu Interaktionen zwischen einzelnen Fahrzeugen oder zum Beschleunigungsrauschen ermöglicht.

Die Kenntnis der individuellen Zeit-Weg-Fahrlinien ermöglicht auch die Schätzung makroskopischer Verkehrsgrößen für solche Zeit-Weg-Teilbereiche, die außerhalb des direkt überwachten Beobachtungsbereichs liegen.

Die so berechneten Verkehrsgrößen erschließen einen weiten Bereich von Verwendungsmöglichkeiten. Zur Veranschaulichung dieses Bereichs wird in der vorliegenden Arbeit die Darstellung der Größen (in Karten, Ganglinien, Profilen oder Blockdiagrammen) und ihre Weiterverwendung in nachgeordneten Analyseprogrammen skizziert. So wurden in dem entwickelten Programmpaket zusätzlich die "Veränderungsanalyse VA" und die "Doppelte Varianzanalyse DVA" implementiert. Die "Veränderungsanalyse" erkennt die Charakteristik eines beliebigen Zeit-Weg-Teilbereichs; in der "Doppelten Varianzanalyse" wird der Einfluß von zeitlichen oder räumlichen Faktoren auf die Verkehrsparameter ermittelt. Falls solche Einflüsse vorliegen, werden Ort und Zeit ihres Einwirkens eingegrenzt. Die innerhalb der "Doppelten Varianzanalyse" bestimmte quadratische Reststreuung erlaubt z.B. auch Aussagen über die Flüssigkeit des um räumliche oder zeitliche Einflußfaktoren bereinigten Verkehrsablaufs. Verkehrsgrößen werden damit nicht nur bestimmt, sondern auch auf die zugrundeliegenden Einflußgrößen hin untersucht.

8.2 Einsatzbereiche

Die entwickelten Ansätze können prinzipiell bei allen verkehrstechnischen Fragestellungen eingesetzt werden, bei denen Verkehrsgrößen über eine längere Strecke hinweg erhoben werden. Die Verfahren eignen sich insbesondere für Luftbilddaten, deren effiziente Auswertung erst mit dem entwickelten Instrumentarium ermöglicht wird, ggf. auch für die Auswertung der Beobachtungen von einem fahrenden Fahrzeug aus. Dabei ist die aktuelle Fragestellung der Verkehrsstudie zunächst zweitrangig.

Die möglichen Einsatzbereiche werden vor allem dadurch beschränkt, daß gewisse Mindestanforderungen an die Bilddaten gestellt werden. Generell können diese nur bei guter Sicht aufgenommen werden; dadurch sind beispielsweise kontinuierliche Verkehrsbeobachtungen oder Schlechtwetteraufnahmen a priori ausgeschlossen.

Luftaufnahmen eignen sich primär für kürzere Verkehrsbeobachtungen auf verhältnismäßig ebenen und geraden Straßen. Vor allem die Kurvigkeit der Strecke ist entscheidend für den Einsatz der entwickelten Verfahren, denn es muß sichergestellt sein, daß das Flugzeug der Streckenführung exakt folgen kann.

Dagegen zeigte eine mehrfache Überfliegung der BRENNER-Autobahn A13 (Innsbruck - Brenner, s. RUDELSTORFER, 1987), daß Beobachtungen des Verkehrs auf steigenden bzw. fallenden Streckenabschnitten (bzw. auch auf kurvenreichen Abschnitten von Autobahnen) durchaus möglich sind. Die dort im realen Anwendungsfall gemachten positiven Erfahrungen bei Aufnahme und Auswertung bewegter Beobachtungen unterstreichen die umfangreichen Möglichkeiten des Verfahrens.

Auswertungen von Luftbilddaten sind zwar auch in städtischen Verkehrsnetzen möglich (z.B. PERSAUD u. HURDLE, 1987 oder ROBIN-PREVAILLEE, 1986), allerdings sind in solchen Fällen aufwendigere Verfahren zur Fahrzeugentdeckung notwendig. Die größere Zahl bewegter Objekte, rasche Kursänderungen, Ein- und Ausfahrten sowie die rechtlich vorgeschriebene größere Flughöhe und Verdeckungen (z.B. durch Häuser) bereiten große Schwierigkeiten.

Es ist deshalb davon auszugehen, daß das beschriebene Verfahren vorwiegend zur Beantwortung verkehrstechnischer Fragestellungen auf Bundesautobahnen oder auf Abschnitten von Bundes-, Landes- oder Kreisstraßen Verwendung finden wird. Teile der entwickelten Verfahren (z.B. das Fahrzeugzuordnungsverfahren oder die doppelte Varianzanalyse) können daneben in allen Bereichen des Verkehrswesens eingesetzt werden, in denen ähnliche Eingangsdaten und Fragestellungen vorliegen.

8.3 Offene Fragen

Trotz der Vielfalt möglicher Verwendungsbereiche muß festgehalten werden, daß eine Reihe offener Arbeitspunkte einem standardisierten Einsatz der entwickelten Verfahren in der Praxis zur Zeit noch entgegensteht.

- Die automatische Einspeisung beliebiger Bilddaten vom Videoband in die EDV-Anlage ist derzeit noch nicht realisiert (VÖGTLE, 1989).
 - Um das Verfahren vollautomatisch einsetzen zu können, muß eine direkte Kopplung zwischen Videorecorder und Bildverarbeitungsrechner vorhanden sein. Solche Kopplungen existieren bereits und stellen kein technisches Problem dar, waren hier aber nicht verfügbar.
- Die Verfahren zur Bestimmung der Fahrzeugdaten sollten weiter verbessert werden. Größe und Grauwert sowie Ort und Geschwindigkeit der beobachteten Fahrzeuge sind so genau wie möglich zu bestimmen.
 - Da die Genauigkeit aller berechneten Verkehrsgrößen direkt von der Qualität der Eingabedaten abhängt, sollten die Fehler bei der Bestimmung der verkehrlichen Grundgrößen (die z.T. aus physikalischen Gründen unumgänglich sind) möglichst minimiert werden. Dazu ist z.B. eine besondere Berücksichtigung von Schatten, Verdeckungen oder Veränderungen des jeweiligen Bildneigungswinkels notwendig. Hierzu wurden bereits einige Konzepte entwickelt (VÖGTLE, 1989).
- Unter Umständen erlaubt die Verwendung einer Farbkamera die Bestimmung präziserer Parameter. Insbesondere für das Fahrzeugzuordnungsmodul stellt die Angabe der Fahrzeugfarbe ein weiteres Hilfsmittel bei der Zuordnung dar, das sich in deutlich geringeren Fehlerfaktoren auswirken könnte.
- Für den praktischen Einsatz ist ein geeigneter Verarbeitungsrechner zu entwickeln bzw. zu konfigurieren.
 - Ein solcher Rechner sollte über verschiedene Standard-Bildverarbeitungsprozeduren verfügen und eine schnelle Befehlsausführung gewährleisten.
- Je nach Einsatzbereich sind die sekundären verkehrstechnischen Auswerteprogramme noch zu optimieren bzw. auf die Berechnung einiger Parameter zu beschränken.
 - Durch die Berechnung weniger, aber besonders aussagekräftiger Parameter verkürzt sich die Rechenzeit. Im Fahrzeug-Zuordnungsmodul sollte

eine raschere Erkennung ausscheidender bzw. aussichtsreicher Zuordnungen im Staubereich angestrebt werden. Hierzu sind empirische Untersuchungen (z.B. zur Varianz der beobachteten Fahrzeugfarben oder -größen) durchzuführen.

Einer direkten "on-line"-Verarbeitung der aufgenommenen Bilddaten steht im jetzigen Stadium von Programm- und Rechnerentwicklung (noch) der Rechenzeitbedarf der eingesetzten Verfahren entgegen. Der Zeitbedarf für die Auswertung einer einstündigen Befliegung (= ca. 120 bis 180 km Streckenlänge) beträgt je nach Verkehrsdichte und Streckenführung etwa 60-100 Stunden. Durch die genannten Programmänderungen wird der Zeitbedarf zwar nochmals sinken; zum jetzigen Zeitpunkt ist die Auswertung der Bilddaten in Echtzeit aber noch nicht möglich.

Die zwischenzeitlich realisierte "off-line"-Auswertung im Labor beweist, daß die in Abschnitt 2 beschriebenen Entwicklungsziele realistisch waren und inzwischen als größtenteils erreicht betrachtet werden können. Für die weitere Entwicklung dieser Beobachtungsart und der Verwendungsmöglichkeiten im Verkehrswesen sind insbesondere die folgenden vier Punkte festzuhalten:

1. Bildverarbeitungsverfahren erlauben die automatische Bestimmung von Verkehrsgrößen aus bewegten Beobachtungen und verringern damit deutlich den Arbeits-, Personal- und Kostenaufwand, der bisher den praktischen Einsatz dieser Beobachtungsart behinderte.
2. Aus bewegten Beobachtungen können praktisch alle relevanten Verkehrsgrößen ermittelt und auf verschiedene Arten untersucht, dargestellt oder weiterverarbeitet werden.
3. Individuelle Zeit-Weg-Fahrlinien von Fahrzeugen können näherungsweise bestimmt werden und erlauben damit die Untersuchung einer Reihe weitergehender verkehrlicher Fragestellungen.
4. Die entwickelten Verfahren und Zusammenhänge eröffnen der Bestimmung, Darstellung, Verwendung und Analyse von Verkehrsgrößen im Bereich des Verkehrswesens neue Möglichkeiten.

9 Literaturverzeichnis

ABGAS-GROSSVERSUCH

Abschlußbericht über die Ergebnisse des Abgas-Großversuchs.
TÜV Rheinland, Heusch/Boesefeldt, Institut für Verkehrswesen
V.d. TÜV e.V., Essen 1986

ABRAMCZUK, T.:

A "TV-detector" for motorway traffic flow. (EUCCO-COST 30 project)
Instrumentation Laboratory, Royal Institute of Technology, Stockholm 1982

ABRAMCZUK, T.:

A microcomputer based TV-Detector for road traffic.
Electronics and Traffic on major roads, International seminar, COSR, CEC,
ECMD, Nr. E 4081, Paris 1985

ALBERTZ, J.; MEHLBREUER, A.; PÜHLER, W.; GONSCHOREK, G.:

Luftbildinterpretation für umweltrelevante Straßenplanung.
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 377, Bonn 1982

ARDEKANI, S.; HERMAN, R.:

Urban Network-Wide Traffic Variables and Their Relations.
In: Transportation Science, Vol.21, No.1, p.1-16, February 1987

ASHWOOD, J.E.; INGLIS, P.F.:

Time-lapse aerial photography: application to traffic surveys.
In: Traffic Eng. and Control, p.19-21, January 1975

BAMBERG, G.; BAUR, F.:

Statistik.
Oldenbourg Verlag, München 1980

BECKER, U.; VÖGTLE, TH.:

Automatische Bildauswerteverfahren im Verkehrswesen.

In: Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und Straßenverkehr,
12. Statusseminar des BMFT in Bad Ems 1986, S.X24-34, Verlag TÜV
Rheinland e.V., Köln 1987

BECKMANN, H.; JACOBS, F.; LENZ, K.H.; WIEDEMANN, R.;
ZACKOR, H.:

Das Fundamentaldiagramm.

Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen; Hrsg.: Forschungsgesellschaft
für das Straßenwesen, Heft 89, Köln 1973

BELL, M.G.H.:

Automatic Traffic Counting By Image Processing.

Division of Transport Engineering, Internal Paper, Univ. of Newcastle upon
Tyne, 1986

BENYEI, A.; AMBRUS, K.; CSORJA, Z.:

Recherches pour définir la congruence des circonstances de la circulation
des routes à deux voies à grande trafic.

Diskussionspapier, Lehrstuhl für Straßenbau, Technische Universität Buda-
pest, Budapest 1984

BENZ, TH.:

Mikroskopische Simulation von Energieverbrauch und Abgasemission im
Straßenverkehr (MISEVA).

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe,
Heft 32, Karlsruhe 1985

BLEHER, W.:

Messung des Verkehrsablaufs aus einem fahrenden Fahrzeug – Beurteilung
der statistischen Genauigkeit mittels Simulation.

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe,
Heft 38, Karlsruhe 1987

BÖHNKE, P.:

Beitrag zu einer Systemtheorie von Objektfunktionen.

Dissertation, RWTH Aachen, Fak. f. Elektrotechnik, Aachen 1980

BRANNOLTE, U.; HOLZ, S.:

Simulation des Verkehrsablaufs auf Landstraßen.

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 402, Bonn 1983

BREIMAN, L.:

Point and Trajectory Processes in One-Way Traffic Flow.

In: Transp. Research, Vol.3, p.251-264, Pergamon Press, 1969

BREIMAN, L.:

A Relationship between Space and Time Distributions. Homogenous Traffic Flow and its Applications.

In: Transp. Research, Vol.8, p.39-44, Pergamon Press, 1974

CEDER, A.; MAY, A.D.:

Consistency of Maximum Flow Characteristics and Congestion Patterns on a Urban Freeway.

In: Transp. Res. Record 644, p.8-14, Washington 1977

CHARLESWORTH, G.; WARDROP, J.G.:

A Method of Estimating Speed and Flow of Traffic from a Moving Vehicle.

In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, p.158-171, London 1954

COERS, H.G.:

Die internationale Forschungsentwicklung und das räumlich-zeitliche Prinzip mikroskopischer und makroskopischer Untersuchungen des Verkehrsflusses.

In: Die Straße, Heft 7, S.368-374, Juli 1970

COHEN, S.:

Cartographie automatique et représentation des phénomènes des congestion des autoroutes.

In: Recherches Transport Sécurité No. 6, p.11-16, Accueil, 1985

DEPARIS, J.P.; BOUTRY, F.; POSTAIRE, J.G.; VIEREN, C.:

Traitment d'images appliqué à la détection d'obstacle en carrefour.

In: RTS - Recherche Transports Sécurité, No. 16, Dec. 1987, p.5-12, Paris

DICKINSON, K.W.; ASHWORTH, R.:

Traffic Data Collection and Analysis using Video Image Processing.

In: PTRC Summer Annual Meeting, p.95-106, University of Sussex, July 1983

DICKINSON, K.W.; ASHWORTH, R.:

Image Processing Systems for Monitoring Road Traffic.

In: Electronics and Traffic on major Roads, International seminar, COSR, CEC, ECMD, p.284-300, Paris 1985

DICKINSON, K.W.; ASHWORTH, R.; DARKIN, C.G.; WAN, C.L.; HARTLEY, M.G.:

Road Traffic Data Collection Using the TRIP-System.

In: PTRC 13th Summer Annual Meeting, p.135-146, University of Sussex, Brighton 1985

DICKINSON, K.W.; WATERFALL, R.C.:

Image Processing applied to traffic.

In: Traffic Engineering and Control, p.6-13, p.60-67, Jan/Feb.1984

DÖHLER, M.:

Straßenverkehrsuntersuchungen mittels photogrammetrischer Verfahren und elektronischer Datenverarbeitung.

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 52, Bonn 1966

EDIE, L.C.:

Discussions of Traffic Stream Measurements and Definitions.

In: Proceedings of the Second Int. Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, p.139-154, London 1963

FRICKER, J.D.; TSAY, H.-S.:

Estimating Highway Speed Distributions From a Moving Vehicle.

In: Transp. Res. Rec. 1047, TRB, p.49-55, Nat. Res. Council, Washington 1985

HAIGHT, F.A.:

Mathematical Theories of Road Traffic.

ITTE Special Report 1, Los Angeles, ITTE 1960

HAIGHT, F.A.:

Mathematical Theories of Traffic Flow.

Academic Press, New York 1963

HEWITT, R.H.:

Traffic Flow Theory.

In: The Highway Engineer, p.2-10, November 1979

HEWITT, R.H.:

Relative Traffic Flow Theory.

Unveröffentlichtes Diskussionspapier, Dep. of Civil Eng., Univ. of Glasgow 1980

HILLIER, F.S.; LIEBERMANN, G.J.:

Introduction to Operations Research.

Holden Day, San Francisco 1980

HOEFS, D.H.:

Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen.

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 140, Bonn 1972

HOOSE, N.; WILLUMSEN, L.G.:

Traffic Data Collection Using Image Processing Techniques.

Transport Studies Group, University College London, London 1985

HOOSE, N.; WILLUMSEN, L.G.:

Real Time Vehicle tracking Using The Clip 4 Parallel Processor.

Transport Studies Group, University College London, London 1986

HOOSE, N.; WILLUMSEN, L.G.:

Automatically Extracting Traffic Data from Videotape Using the Clip 4 Parallel Image Processor.

Unveröffentlichtes Diskussionspapier, Transport Studies Group, University College London, London 1986

HOROWITZ, A.; SAHNI, S.:

Fundamentals of Computer Algorithms.

Computer Science Press, Rockville 1978

HOUGHTON, A.; HOBSON, G.S.; TOZER, R.C.:

Automatic monitoring of vehicles at road junctions.

In: Traffic engineering and Control, October 1987

HUBSCHNEIDER, H.:

Mikroskopisches Simulationsmodell für Individualverkehr und öffentlichen Personennahverkehr.

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe, Heft 26, 1983

INIGO, R.M.:

Traffic Monitoring and Control Using Machine Vision.

In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol IE-32, No.3, p.177-185, August 1985

JACOBS, F.:

Untersuchungen zur stochastischen Theorie des Verkehrsablaufs auf Straßen.

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 96, Bonn 1970

JORDAN, T.D.:

Development of the Sky Count Technique for Highway Traffic Analysis.

In: Highway Res. Record 19, HRB, p.35-46, Washington 1963

KELLER, H.; HAMPE, H.; SCHMICKL, J.:

Störungen im Fahrt- und Verkehrsablauf auf Schnellstraßen.

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 396, Bonn 1983

KÜHNE, R.:

Kontinuumstheorie zur Beschreibung des Verkehrsablaufs auf Fernstraßen.

Forschungsbericht Nr. 12.001/81 der AEG Telefunken AG, Ulm 1981

KREBS, W.:

Sensoren für die Bildauswertung VTE-Announcement.

VTE (Digital Video), Herrsching, März 1986

KREYSZIG, E.:

Statistische Methoden und ihre Anwendung.

Verlag Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen 1968

LEUTZBACH, W.:

Probleme der Kolonnenfahrt.

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 44, Bonn 1966

LEUTZBACH, W.:

Zur Problematik der Messungen und Beobachtungen von einem fahrenden Fahrzeug.

Vorläufiger Bericht 25 des Instituts für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe, Karlsruhe 1971

LEUTZBACH, W.:

Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses.

Springer Verlag, Berlin 1972

LEUTZBACH, W.:

Introduction to the theory of traffic flow.

Springer, Berlin/New York 1988

LEUTZBACH, W.; BÄHR, H.P.; BECKER, U.; VÖGTLE, TH.:

Entwicklung eines Systems zur Erfassung von Verkehrsdaten mittels photogrammetrischer Aufnahmeverfahren und Verfahren zur automatischen Bildauswertung.

Techn. Schlußbericht zum FA. TV 8452/8 des Bundesministers für Forschung und Technologie, Bonn,

Institut für Verkehrswesen und Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität (TH) Karlsruhe, Karlsruhe 1987

LEUTZBACH, W.; EGERT, P.H.:

Geschwindigkeitsmessungen vom fahrenden Fahrzeug aus.

In: Straßenverkehrstechnik, Heft 3, S.91-96, 1959

LEUTZBACH, W.; HUBSCHNEIDER, H.:

Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen.

Institut für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe, Karlsruhe 1976

LEUTZBACH, W.; WIEDEMANN, R.:

Traffic flow in upgrade bottlenecks.

In: Proceedings Transport and Traffic Theory, 7th Symposium, p.105-118, Kyoto 1977

LIGHTHILL, M.J.; WHITHAM, G.B.:

On Kinematic Waves, Part II: A Theory of Traffic on Long, Crowded Roads.
In: Proceedings of the Royal Society, series A, Math. and Phys. Sciences
No. 1178, Vol. 229, p.317-345, London 1955

LUFT-VO, Luftverkehrs-Ordnung

Ausgabe April 1981, Bundesministerium für Verkehr, Bonn

MAKIGAMI, Y.; SAKAMOTO, H.; HAYASHI, M.:

An Analytical Method of Traffic Flow Using Aerial Photographs.
In: Journal of Transp. Eng., Vol.111, No.4, p.377-394, 1985

MARTIN, W.:

Verkehrsablauf auf Stadtstraßen mit Lichtsignalanlagen.
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 268, Bonn 1979

NEUMANN, K.:

Operations Research Verfahren. Band III: Graphentheorie und Netzplantechnik.
C. Hanser Verlag, München 1975

PELEG, M.; STOCH, L.; ETROG, U.:

Urban Traffic Studies from Aerial Photographs.
In: Transportation, Vol.2, p.373-390, 1983

PERSAUD, B.N.; HURDLE, V.O.:

Freeway Traffic Data from Time-Lapse Aerial Photography – an alternative approach.
Transp. Res. Board, 1987 Annual Meeting, TRB, January 1987

PERSAUD, B.; HURDLE, V.O.:

Freeway Traffic Data from Time-Lapse-Film.
In: Transp. Science, Vol. 22, p.251-257, November 1988

PFANNERSTILL, E.:

Ein Verfahren zur Merkmalsextraktion aus Linienmustern zur Zuordnung von Fahrzeugkollektiven.

Dissertation, RWTH Aachen, 1983

ROBIN-PREVALLEE, Y.:

Mesures de l'efficacité de dispositifs de régulation de la circulation par photographies aériennes.

In: Transport, environment, circulation, No.77, p.23-27, Juillet-Aout 1986, Paris

RUDELSTORFER, K.:

Verkehr 2000: Leistungsberechnung für die Brenner-Autobahn A13; Verkehrsuntersuchung 1987.

Institut für Straßenbau und Verkehrsplanung, Universität Innsbruck, 1987

RÜENAUFER, P.:

Untersuchung zur Ermittlung von Möglichkeiten und Grenzen der Einbeziehung des elektronischen Fernsehens in die Analyse des Straßenverkehrsablaufs.

Dissertation, Fak. f. Elektrotechnik, RWTH Aachen, 1976

SACHS, L.:

Angewandte Statistik.

Springer Verlag, Berlin 1984

SMITH, S.A.; ROSKIN, M.E.:

Creation of Data Sets to Study Microscopic TrafficFlows in Freeway Bottleneck Sections.

In: Transp. Research Record 1005, TRB, p.121-128, Washington 1985

SPIVEY, W.A.; THRALL, R.M.:

Linear Optimization.

H.R. and W., New York 1970

STREMME, W.:

Klassifikation von Verkehrszuständen in Streckenabschnitten von Schnellstraßen.

Dissertation, RWTH Aachen, Aachen 1984

SWISSAIR:

Swissair Photo- und Vermessungs AG, Zürich.

In: Das Luftbild als Informationsträger für Verkehrsplanung, S.20; Bernath & Landolt, Lausanne, Forschungsarbeit 2/82 der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, April 1984

TAYLOR, M.A.P.; YOUNG, W.:

Traffic Analysis – new technology and new solutions.

Hargreen Publ. Company, Melbourne 1988

THEUWISSEN, A. et al.:

Analysis of Traffic Flow with a CCD-Camera and a Micro-Processor.

In: PTRC Summer Annual Meeting, p.283-289, University of Warwick, 1980

TRB (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD); NATIONAL RESEARCH COUNCIL:

Traffic Flow Theory.

TRB Special Report 165, Washington 1975

TREITERER, J.; CLEAR, D.R.; TOLLE, J.E.; VECCELLIO, R.L.; LEE, J.:

Investigations of Traffic Dynamics by Aerial Photogrammetry Techniques.

Interim Report No. EES 278-2, The Ohio State University, Dep. of Civil Engineering, Columbus (OH) 1969

TREITERER, J.; MYERS, J.:

The hysteresis phenomenon in traffic flow.

In: Proceedings Transp. and Traffic Theory, 6th Int. Symp., p.13-38,
Sydney 1974

TREITERER, J.; TAYLOR, J.I.:

Traffic Flow Investigations by Photogrammetric Techniques.

In: Highway Research Record 142, Highway Res. Board, p.1-12,
Washington 1966

VAN DER HORST, A.R.A.:

The Use of Video-Techniques in Traffic Research.

In: PRTC Summer Annual Meeting, p.179-190, University of Warwick, 1980

VÖGTLE, TH.:

Photogrammetrische Bilddatenerfassung im Verkehrswesen.

Dissertation, Fak. f. Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität
(TH) Karlsruhe, 1989

VOLK, W.:

Applied Statistics for Engineers.

Mc. Graw-Hill, New York 1958

WAGNER, F.A.; MAY, A.D.:

Use of Aerial Photography in Freeway Traffic Operation Studies.

In: Highway Research Record 19, Highway Res. Board, p.24-34,
Washington 1963

WARDROP, J.G.:

Practical Applications of Traffic Theories.

In: Traffic Engineering and Control, Vol. 5, p.607, 1964

WIEDEMANN, R.; BECKER, U.; BUCK, A.:

Geschwindigkeitsverhalten auf Bundesautobahnen und Landstraßen.

Forschungsbericht des Instituts für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe, Karlsruhe 1985

WIEDEMANN, R.; HUBSCHNEIDER, H.:

Zusammenhang zwischen der Wunschgeschwindigkeit und relevanten Kenngrößen des Verkehrsablaufs.

Institut für Verkehrswesen, Universität (TH) Karlsruhe, Karlsruhe

WILLIAMS, P.G.; KIRBY, H.R.; MONTGOMERY, F.O.; BOYLE, R.D.:

Evaluation of Video-Recognition Equipment for Number-Plate Matching.

In: Proc. of the 2nd Int. Conference on Road Traffic Monitoring, IEE, London, Febr. 1989.

WINZER, TH.:

Messung von Beschleunigungsverteilungen.

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 319, Bonn 1980

WIRTH, N.:

Algorithmen und Datenstrukturen.

Teubner Studienbücher Informatik 31, Stuttgart 1979

WOHL, M.:

Vehicle Speeds and Volumes Using Sonne Stereo Continuous Strip Photography. Traffic Engineering, Proceedings of the Institute of Traffic Engineers, Washington 1958

WOLFERTS, K.:

Untersuchungen zur automatischen Bildauswertung für verkehrstechnische Ermittlungen.

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr, Heft 175, Bonn 1974

WRIGHT, C.:

A Theoretical Analysis of the Moving Observer Method.

In: Transportation Research, Vol.7, p.293-311, 1973

WYBORN, J.H.:

The Use of Aerial Traffic Survey Techniques in West Yorkshire.

Internal Report, Leeds City Council, West Yorkshire, Metropolitan County Council, 1973

Veröffentlichungen aus dem Institut für Verkehrswesen

Die mit * versehenen Veröffentlichungen sind vergriffen

Schriftenreihe des Instituts (ISSN 0341-5503)

- Heft 1: BARON, P. S. (1967): *
Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast-
Empfangsanlagen
- Heft 2: STOFFERS, K. E. (1968):
Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen
- Heft 3: KOEHLER, R. (1968): *
Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen - Untersuchungen zur
Leistungsfähigkeitsberechnung und Reisezeitverkürzung
- Heft 4: BÖTTGER, R. (1970): *
Die numerische Behandlung des Verkehrsablaufs an signalgesteu-
erten Straßenkreuzungen
- Heft 5: DROSTE, M. (1971):
Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ru-
henden Verkehrs
- Heft 6: 10 Jahre Institut für Verkehrswesen (1973) *
- Heft 7: BEY, I. (1972): *
Simulationstechnische Analyse der Luftfrachtabfertigung
- Heft 8: WIEDEMANN, R. (1974):
Simulation des Straßenverkehrsflusses
- Heft 9: KÖHLER, U. (1974):
Stabilität von Fahrzeugkolonnen
- Heft 10: THOMAS, W. (1974):
Sensitivitätsanalyse eines Verkehrsplanungs-Modells
-

-
- Heft 11: PAPE, P. (1976):
Weglängenreduzierung in Fluggast-Empfangsanlagen durch flexible Vorfeldpositionierung
- Heft 12: KOFFLER, TH. (1977):
Vorausschätzung des Verkehrsablaufs über den Weg
- Heft 13: HAENICKE, W. (1977): *
Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit
- Heft 14: BAHM, G. (1977): *
Kabinengröße und Betriebsablauf neuer Nahverkehrssysteme
- Heft 15: LAUBERT, W. (1977):
Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnsystemen
- Heft 16: SAHLING, B.-M. (1977): *
Verkehrsablauf in Netzen - Ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren
- Heft 17: ZAHN, E. M. (1978):
Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Transportnetze
- Heft 18: HANDSCHMANN, W. (1978):
Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers
- Heft 19: WILLMANN, G. (1978): *
Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen
-

-
-
- | | | |
|----------|---|---|
| Heft 20: | SPARMANN, U. (1980):
ORIENT - Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose | * |
| Heft 21: | ALLSOP, R. E. (1980):
Festzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen | * |
| Heft 22: | ADOLPH, U.-M. (1981):
Systemsimulation des Güterschwerverkehrs auf Straßen | * |
| Heft 23: | JAHNKE, C.-D. (1982):
Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Abstandswarnsystemen | |
| Heft 24: | LEUTZBACH, W. (1982):
Verkehr auf Binnenwasserstraßen | * |
| Heft 25: | 20 Jahre Institut für Verkehrswesen (1982) | * |
| Heft 26: | HUBSCHNEIDER, H. (1983):
Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Öffentlichen Personennahverkehr | * |
| Heft 27: | MOTT, P. (1984):
Signalsteuerungsverfahren zur Priorisierung des Öffentlichen Personennahverkehrs | * |
| Heft 28: | MAY, A. D. (1984):
Traffic Management Research at the University of California | |
| Heft 29: | HAAS, M. (1985):
LAERM - Mikroskopisches Modell zur Berechnung des Straßenverkehrslärms | |
-

-
- Heft 30: BOSSERHOFF, D. (1985):
Statische Verfahren zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Matrizen im
Öffentlichen Personennahverkehr - Ein Vergleich
- Heft 31: BAASS, K. (1985):
Ermittlung eines optimalen Grünbandes auf Hauptverkehrs-
straßen
- Heft 32: BENZ, TH. (1985):
Mikroskopische Simulation von Energieverbrauch und Abgas-
emission im Straßenverkehr (MISEVA)
- Heft 33: STUCKE, G. (1985):
Bestimmung der städtischen Fahrtenmatrix durch Verkehrszähl-
ungen
- Heft 34: YOUNG, W. (1985):
Modelling the Circulation of Parking Vehicles - a Feasibility
Study
- Heft 35: GIPPS, P. G. (1986):
Simulation of Pedestrian Traffic in Buildings
- Heft 36: 25 Jahre Institut für Verkehrswesen (1987) *
- Heft 37: MÖLLER, K. (1986):
Signalgruppenorientiertes Modell zur Optimierung von Festzeit-
programmen an Einzelknotenpunkten
- Heft 38: BLEHER, W. G. (1987):
Messung des Verkehrsablaufs aus einem fahrenden Fahrzeug -
Beurteilung der statistischen Genauigkeit mittels Simulation
-

-
-
- Heft 39: MAIER, W. (1988):
Bemessungsverfahren für Befragungszählstellen mit Hilfe eines Warteschlangenmodells
- Heft 40: AXHAUSEN, K. (1989):
Eine ereignisorientierte Simulation von Aktivitätenketten zur Parkstandwahl
- Heft 41: BECKER, U.J. (1989):
Beobachtung des Straßenverkehrs vom Flugzeug aus :
Eigenschaften, Berechnung und Verwendung von Verkehrsgrößen
- Heft 42: HEIDEMANN, D. (1989):
Ein mathematisches Modell des Verkehrsflusses
- Heft 43: ALY, M.S. (1989):
Headway Distribution Model and Interrelationship between
Headway and Fundamental Traffic Flow Characteristics
-

Vorläufige Berichte des Instituts

- Nr. 1: LEUTZBACH, W.; KOEHLER, R. (1964):
Binnenwasserstrassenverkehr als Zufallsverteilung
- Nr. 2: EICK, P. (1964):
Experimentelle Überprüfung des Folgetests von WALD
- Nr. 3: BEXELIUS, S. (1965):
Größe der Verkehrstheorie - ihre Definition und Anwendung
- Nr. 4: LEUTZBACH, W.; ERNST, R. (1965): *
Untersuchung über den Einfluß der Fahrbahnmarkierung auf das Verhalten der Fahrzeuglenker
- Nr. 5: GULLON LÖW, M. (1965):
Die Planung des spanischen Stadt- und Landstraßennetzes
- Nr. 6: BEXELIUS, S. (1965):
An Extended Model for Car Following
- Nr. 7: BEXELIUS, S. (1965): *
Beschreibung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf verschiedene Arten von Engpässen
- Nr. 8: LEUTZBACH, W.; LENZ, K.-H. (1966):
Wartezeitverluste an Schleusen
- Nr. 9: MARTIN, W. (1967): *
Zeitstudie über die Passagierabfertigung am Flughafen Stuttgart
- Nr. 10: DROSTE, M. (1968):
Parkraumerhebungen in Intervallen
-

-
-
- Nr. 11: LEUTZBACH, W. (1968):
Bewegung als Funktion von Zeit und Weg
(also in Transportation Research, Vol. 3 (1969) 421-428)
- Nr. 12: DROSTE, M. (1969):
Die Berechnung optimaler Signalzeitenpläne als Problem der
ganzzahligen linearen Programmierung
- Nr. 13: LUDES, K.; SIEGENER, W. (1969):
Untersuchung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf riskantes
Fahrverhalten
- Nr. 14: HAIGHT, F. A. (1970):
Problems in Transport Safety
- Nr. 15: DILLING, J.: (1970) *
Reisegeschwindigkeit und Straßencharakteristik
- Nr. 16: COBLENTZ, H. S. (1971): *
Transportation Planning and Social Issues: Function and Dys-
function
- Nr. 17: KÖHLER, U. (1971): *
Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsganglinie bzw. Ge-
schwindigkeitsprofil und Häufigkeitsdichte der Geschwindigkei-
ten
- Nr. 18: BRILON, W. (1973): *
Der Zusammenhang zwischen räumlich-zeitlichen Kennwerten
des Verkehrsablaufs und lokal ermittelten Parametern
-

-
- Nr. 19: VASARHELYI, B. (1975):
Stochastische Simulation an Straßenkreuzungen nach dem
"rechts-vor-links-Prinzip"
- Nr. 20: BAHM, G.; LAUBERT, W. (1977):
Modelle zur Simulation des Betriebsablaufs von neuen Personen-
nahverkehrssystemen
- Nr. 21: WIEDEMANN, R.; BRILON, W.; BRANNOLTE, U. (1977):
Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen
- Nr. 22: BRANNOLTE, U.; VASARHELYI, B. (1977): *
Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf kurvigen Land-
straßen
- Nr. 23: SPARMANN, U. (1979):
Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Vorbeifahrten-
häufigkeit auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen
- Nr. 24: STUCKE, G. (1979):
Ermittlung der Teilströme aus Querschnittsmessungen
- Nr. 25: LEUTZBACH, W. (1981):
Zur Problematik der Messungen und Beobachtungen aus einem
fahrenden Fahrzeug
- Nr. 26: BRANNOLTE, U.; BOTMA, H.; SCHMIDT, M. (1989):
Überholungen von langsamen Fahrzeugen auf Landstraßen
-

Institutsnotizen

- Nr. 1: BISBEE, E. F. (1967): *
Beispiele zur Transportanalyse (Übers. W. Siegener)
- Nr. 2: Seminarbericht SS 1968: *
Vergleich einiger Verkehrserzeugungs- / -verteilungsmodelle
- Nr. 3: Seminarbericht WS 1968/69: *
Berechnungsbeispiel zum Verkehrsablauf an Engpässen
- Nr. 4: Seminarbericht SS 1969: *
Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit des Straßennetzes und der Kapazität des Parkraums
- Nr. 5: BRILON, W. (1970): *
Erzeugung von Zufallszahlen
- Nr. 6: DILLING, J. (1970):
Charakteristik des Verkehrsablaufs auf einem Autobahnabschnitt
- Nr. 7: Seminarbericht WS 1969/70:
Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Ausbauvarianten einer Straßenkreuzung
- Nr. 8: Seminarbericht SS 1970:
Untersuchung der Verkehrssicherheit einer Straßenkreuzung
- Nr. 9: Seminarbericht SS 1971:
Einsatz eines Kabinen-Taxi-Systems (CAT) für den Bereich der Universität Karlsruhe
- Nr. 10: Seminarbericht WS 1971/72: *
Wirtschaftlichkeitsrechnung im Straßenbau
-

-
-
- Nr. 11: Seminarberichte SS 1972:
Möglichkeiten der Steuerung von Lichtsignalanlagen in städtischen Netzen
- Nr. 12: Exkursionsbericht SS 1973:
- Nr. 13: Seminarbericht SS 1973: *
Unfalluntersuchung und Stauberechnung auf einem Abschnitt der Bundesautobahn
- Nr. 14: Seminarbericht WS 1973/74:
Wochenendverkehr im nördlichen Schwarzwald
- Nr. 15: Seminarbericht SS 1974:
Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Nr. 16: Seminarbericht WS 1974/75:
Autohöfe - ihre Bedeutung für den Güterverkehr
- Nr. 17: Seminarbericht SS 1975:
Die Karlsruher Häfen
- Nr. 18: Seminarbericht WS 1975/76: *
Lärmschutz an Straßen
- Nr. 19: Seminarbericht SS 1976:
Der Einfluß des Fluglärms auf Planung und Betrieb von Flughäfen und Landeplätzen
- Nr. 20: Seminarbericht WS 1976/77:
Kombinierter Verkehr
- Nr. 21: Seminarbericht SS 1977:
Koordination eines Straßenzuges mit Lichtsignalanlagen
-

-
-
- Nr. 22: Seminarbericht WS 1977/78:
Die Sicherheit von Verkehrssystemen
- Nr. 23: Seminarbericht SS 1978:
Verkehrsablauf als Warteschlangenproblem
- Nr. 24: Seminarbericht WS 1978/79: *
Bordsteinparken
- Nr. 25: Seminarbericht SS 1979:
Verkehrssteuerungssysteme
- Nr. 26: Seminarbericht WS 1979/80:
Das Planspielmodell PLUS
- Nr. 27: Seminarbericht SS 1980:
Stauwarnanlagen auf Bundesautobahnen
- Nr. 28: Seminarbericht WS 1980/81:
Planungsmodelle im Verkehrswesen
- Nr. 29: Seminarbericht SS 1981:
Linienplanung im Öffentlichen Personennahverkehr
- Nr. 32: Seminarbericht WS 1982/83: *
Standardisierte Bewertung von Weginvestitionen im ÖPNV
- Nr. 33: Seminarbericht SS 1983:
Geschwindigkeit im Straßenverkehr
- Nr. 34: Fortbildungsseminare 1978-1983 (1984): *
Fachwörterbuch Verkehrswesen
(deutsch-englisch/englisch-deutsch)
-

-
-
- Nr. 35: Seminarbericht WS 1983/84:
Tempo 30 in Wohngebieten
- Nr. 36: Seminarbericht SS 1984:
Analyse des Radwegenetzes Karlsruhe
- Nr. 37: Seminarbericht WS 1984/85:
Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Autobahnen
- Nr. 38: BAASS, K.; AXHAUSEN, K.; MÖLLER, K. (Seminarbericht SS
1985):
Optimierungsmodelle in der Lichtsignalsteuerung
- Nr. 39: YOUNG, W. (1985): *
Traffic Simulation Modelling in Australia
- Nr. 40: Seminarbericht SS 1986
Verkehrsverhalten im Bereich der Universität Karlsruhe
- Nr. 41: Fortbildungsseminare 1978-1986 (1987):
Fachwörterbuch Verkehrswesen
(deutsch-englisch/englisch-deutsch)
- Nr. 42: SCHNITTGER, St. (1987):
Richtlinien zur Dokumentation von Programmen
AXHAUSEN, K., FELLENDORF, M. (1987):
Merkblatt zur Anfertigung von Studien- und Diplomarbeiten
- Nr. 43: Seminarbericht SS 1987
Beobachtung und Beschreibung des Fußgängerverkehrs
- Nr. 44: Seminarbericht WS 1987/88
Beschleunigungsmaßnahmen für den ÖPNV
-

Anderweitig publizierte Forschungsberichte

LEUTZBACH, W.; BEXELIUS, S. (1966):

Probleme der Kolonnenfahrt;

Heft 44 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LENZ, K.-H. (1966):

Ein Beitrag zur Anwendung der Theorie der Warteschlangen;

Heft 66 der Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg.

ERNST, R. (1967):

Verkehrsablauf an Straßenknoten;

Heft 60 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; BARON, P. (Hrsg.) (1969):

Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses; Referate anlässlich des IV. Internationalen Symposiums über die Theorie des Verkehrsflusses in Karlsruhe, Juni 1968;

Heft 86 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

WIEDEMANN, R. (1968):

Verkehrsablauf hinter Lichtsignalanlagen - Untersuchungen über die Ausbreitung von Fahrzeugpulk;

Heft 74 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

ZIEGLER, M. (1970):

Wegewahl als Regelkreis - Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Wegewahl, Reisezeiten und Verkehrsmengen;

Heft 99 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

HOEFS, D.H. (1972):

Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen;
Heft 140 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

DILLING, J. (1973):

Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken;
Heft 151 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; WETTERLING, K. (1974):

Kurzfassungen ausgewählter Arbeiten aus der Bundesrepublik Deutschland, Techn. Untersuchungen;
Heft 3 der Schriftenreihe "Forschung Stadtverkehr - Sonderreihe", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

FINDEISEN, H.-G. (1975):

Das Verhalten verkehrsrechtlich untergeordneter Fahrzeuge an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen;
Heft 178 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

BRILON, W. (1976):

- a) Unfallgeschehen und Verkehrsablauf.
b) Warteschlangenmodell des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen;
Heft 210 der Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

BRILON, W.; BRANNOLTE, U. (1977):

Simulationsmodell für den Verkehrsablauf auf zweispurigen Straßen mit Gegenverkehr;
Heft 239 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

HANDSCHMANN, W.; VOSS, M. (1978):

Der Mensch als Fahrzeugführer; Informationsaufnahme und -verarbeitung durch den Menschen;

Heft 8 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.) Schriftenreihe, Frankfurt.

LEUTZBACH, W. et al. (1978):

Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen - Ein Systemmodell;

Heft 9 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.) Schriftenreihe, Frankfurt, 1978

SPARMANN, U. (1978):

Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen;

Heft 263 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

MARTIN, W. (1979):

Verkehrsablauf auf Stadtstraßen mit Lichtsignalanlagen;

Heft 268 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

MOHAMED IBRAHIM, M. Y. (1979):

Modell zur Anpassung eines städtischen Erschließungsnetzes an die wachsende Motorisierung in Entwicklungsländern unter besonderer Berücksichtigung des Radverkehrs;

Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

KOFFLER, TH., METZGER, W. (1980):

Untersuchung über zweckmäßige Zeit- und Wegeabschnitte zur Erfassung des Verkehrsablaufs;

Heft 283 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

BOLL, C. (1980):

Reißverschlußverfahren zur Regelung des Verkehrs an Engstellen;
Heft 291 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

WETTERLING, K. (1980):

Mehrspuriger Richtungsverkehr bei unterschiedlichen Fahrvorschriften;
Heft 292 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W., et al. (1980):

Güterverkehr auf Bundesautobahnen - Ein Systemmodell, 2. Teil;
Heft 16 der FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.) Schriftenreihe, Frankfurt.

BRANNOLTE, U. (1980):

Verkehrsablauf an Steigungsstrecken von Richtungsfahrbahnen;
Heft 318 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

WINZER, TH. (1980):

Messung von Beschleunigungsverteilungen;
Heft 319 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; BEIL, D. (1981):

Ein Matrixmodell zur Ermittlung der Verkehrsbelastung in Netzen;
Heft 338 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; MAIER, W.; HANDSCHMANN, W.; SCHULER, M. (1982):

a) Einfluß von Verkehrsbeschränkungen und Ausbauförmern auf die Sicherheit an plangleichen, außerörtlichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen

b) Einfluß von Verkehrsbeschränkungen und Ausbauförmern auf die Sicherheit an plangleichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen außerhalb bebauter Gebiete;

Heft 376 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

BRANNOLTE, U.; HOLZ, S. (1983):

Simulation des Verkehrsablaufs auf Landstraßen - Modellerweiterung;

Heft 402 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; HOLZ, S. (1984):

Unfallcharakteristik von Radfahrern auf Außerortsstraßen;

Heft 433 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

WIEDEMANN, R.; MÖLLER, K.; MOTT, P. (1986):

Berücksichtigung aller Verkehrsteilnehmer bei der Beurteilung von lichtsignalgesteuerten Knoten;

Heft 464 Teil B der Schriftenreihe "Forschung Strassenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

LEUTZBACH, W.; HAAS, M.; PAPAVASILIOU, V.; SCHWERDTFGER, TH. (1986):

Dynamische Umlegung in Verkehrsnetzen;

Heft 469 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Bundesminister für Verkehr, Bonn.

KIM, H.-S. (1987):

Methoden zur Beschreibung des Unfallgeschehens - Versuch eines Vergleich zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Republik Korea;
Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

LEUTZBACH, W.; PAPAVALIOU, V. (1988):

Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr:
Wahrnehmung in konkreten Verkehrssituationen;
Bericht zum Forschungsprojekt 8306 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach.

Im Buchhandel erhältlich

LENZ, K.-H.; GARSKY, J. (1968):

Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren in der Straßenverkehrstechnik; Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg.

LEUTZBACH, W. (1972):

Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses;

Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, ISBN 3-540-05724-2.

BECKMANN, H.; JACOBS, F.; LENZ, K.-H.; WIEDEMANN, R.;
ZACKOR, H. (1973):

Das Fundamentaldiagramm;

Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg, 1973, ISBN 3-7812-0846X.

HERZ, R.; SCHLICHTER, H. G.; SIEGENER, W. (1976):

Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner;

Werner-Ingenieur-Text 42, Werner-Verlag Düsseldorf, ISBN 3-8041-1934-4

RUPPERT, W.-R.; LEUTZBACH, W.; ADOLPH, U.-M. et al. (1981):

Achslasten und Gesamtgewichte schwerer Lkw. Nutzen- Kosten-Untersuchung einer Anhebung der zulässigen Höchstwerte;

Hrsg. BMV, Verlag TÜV Rheinland, Köln, ISBN 3-88585-035-4.

WIEDEMANN, R.; HUBSCHNEIDER, H. (1987): Simulationsmodelle,

in: LAPIERRE, R., STEIERWALD, G. (Hrsg.) "Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr", Band 1, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, 1987, ISBN 3-540-16850-8.

LEUTZBACH, W. (1988):

Introduction to the Theory of Traffic Flow;

Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, ISBN 3-540-17113-4.

Sonderheft zum 20jährigen Jubiläum: Ein Institut stellt sich vor.

Institut f. Verkehrswesen (Hrsg.), Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1982.

LEBENS- UND BILDUNGSGANG

- 1957 geb. am 13. August in Schwenningen
- 1963 – 1967 Grundschule in Karlsbad-Langensteinbach
- 1967 – 1976 Besuch des Albert-Magnus-Gymnasium in Ettlingen/Baden
- 1976 Abitur am 12. Mai in Ettlingen
- 1976 – 1977 Grundwehrdienst in Koblenz
- 1977 – 1983 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Karlsruhe, Vertiefungsrichtung Operation Research/Informatik
- 1983 Diplomhauptprüfung am 11. Juli in Karlsruhe
- 1983 – 1984 Studium des “Industrial Engineering” (graduate) an der Ohio State University, Columbus Ohio, USA
- 1984 – 1989 Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Verkehrswesen der Universität (TH) Karlsruhe
- 1988 Doktorprüfung am 14. November in Karlsruhe