

# **Automatische Kalibrierung von innerstädtischen Verkehrsablaufmodellen mittels ortsverteilt-zeitparalleler Verkehrsvideoaufzeichnungen**

**Robert Hoyer**

**Institut für Automation und Kommunikation Magdeburg,  
Steinfeldstraße 3, 39179 Barleben**

## **Zusammenfassung**

Leistungsfähigere Rechentechnik und bessere Simulationswerkzeuge lassen ein zunehmendes Interesse erkennen, Verkehrsabläufe in Stadtstraßennetzen unter Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen zu modellieren. Die fahrzeugfeine Modellierung und Simulation von Straßenverkehr hat über komfortable Softwarewerkzeuge mittlerweile Einzug in die Arbeit von Ingenieur- und Planungsbüros gehalten. Dank moderner Benutzerschnittstellen kann ein Modell mit relativ wenig Zeitaufwand erstellt und simuliert werden. Größere Probleme bereiten dagegen die Beschaffung konsistenter Daten zur Modellparametrierung und die effiziente Modellkalibrierung. Der Beitrag stellt ein komplexes System zur automatischen Kalibrierung von einzelfahrzeugauflösenden Verkehrsablaufmodellen vor.

## **1. Ausgangslage und Motivation**

Als ein Hauptproblem beim Einsatz von fahrzeugauflösenden Verkehrssimulatoren kristallisiert sich zunehmend die sehr aufwendige Beschaffung aller benötigten Eingangsdaten heraus. Es besteht eine Diskrepanz zwischen theoretisch machbarer Modellierungstiefe und der Erfüllbarkeit von geweckten Erwartungen an die Qualität des Simulationsergebnisses. Bereits am Anfang einer Simulationsuntersuchung, bei der Nachbildung des Ist-Zustandes im Referenzmodell, können Mängel im Modell sichtbar werden. In diesem Fall steht bereits frühzeitig die Gültigkeit des Ausgangsmodells für die sich anschließenden Variantenuntersuchungen in Frage.

Es zeichnet sich folgende Problemsituation ab: Am Markt befindliche Verkehrssimulatoren versetzen den Anwender dank ihres hohen Bedienkomforts prinzipiell in die Lage, mit relativ wenig Einarbeitungs- und Arbeitsaufwand Verkehrsablaufmodelle zu erstellen. Die fehlende Kenntnis über ortsspezifische Modellparameter wird durch die Annahme bzw. Vorgabe von Standardwerten ausgeglichen. Wenn hierdurch die modellierte Situation nur unzureichend widerspiegelt wird, muß jedoch mit fehlerhaften Simulationsergebnissen gerechnet werden.

Neben Einzelknoten lassen sich mit moderner PC-Technik auch Streckenzüge oder sogar Netze mit erträglichem Zeitaufwand mikroskopisch simulieren (Bild 1). Dies hat einerseits einen weiter wachsenden Aufwand für die Modellparametrierung, andererseits wegen der

Verflechtungen im Straßennetz eine überproportionale Sensibilitätszunahme gegenüber Parameterfehlern zur Folge. Da Verkehrsprozesse stark nichtlinearen Charakter haben, führen selbst kleine Parameterfehler zu falschen Simulationsergebnissen. Die realitätsnah erscheinende Animation der Fahrzeugbewegungen im Straßennetz führt zu einer trügerischen Plausibilität der Simulationsergebnisse. Die dadurch bei den Entscheidungsträgern hinsichtlich der Ergebnisqualität geweckte Erwartungshaltung kann unter diesen Umständen nicht erfüllt werden, was wiederum die Simulationstechnik generell in Mißkredit bringt. Nicht zuletzt sollen einmal aufwendig erstellte Modelle weitergenutzt werden, wobei innerhalb der Modellpflege eine teilweise Neuparametrierung erforderlich werden kann.

Vor diesen Hintergründen erlangt die automatische Parametrierung und Validierung von Verkehrsablaufmodellen eine entscheidende Bedeutung. In der Modellierungspraxis ergeben sich die nachfolgend skizzierten Problemfelder, die durch eine weitgehend automatisierte Modellparametrierung umgangen werden sollen:

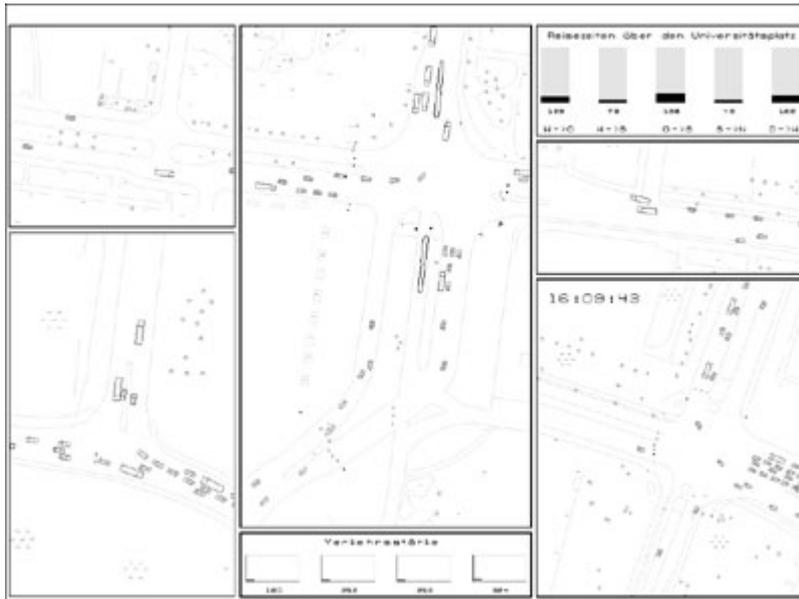
1. Die Anzahl der Parameter ist so groß, daß deren Übertragung bzw. Einstellung von Hand bei wachsenden Netzen zunehmend fehleranfällig wird. Fehlerhaft eingestellte Parameter sind anhand des Simulationsergebnisses schwer zu lokalisieren, da sie sich über das gesamte Netz fortsetzen und Abhängigkeiten nicht immer offensichtlich sind. Im Ergebnis einer zeitaufwendigen Fehlersuche stellt sich oft heraus, daß lediglich falsche Parametereingaben das mangelhafte Modellverhalten verursachten. Eine automatische Erfassung und Übertragung der Parameter zum Simulationssystem schließt diese Fehlerquelle aus.
2. Weil die Verkehrsablaufmodelle stochastische Elemente enthalten, ist auch bei augenscheinlich fehlerfrei eingestellten Modellparametern eine Validierung erforderlich. Der Modellabgleich gestaltet sich schon bei kleinen Netzen als sehr aufwendig. Die Änderung eines Parameters hat in der Simulation oft unerwartete Auswirkungen auf Validierungsgrößen an anderer Stelle, die dann wiederum korrigiert werden müssen. Dies bedeutet, daß nach einer Änderung sämtliche Validierungsgrößen wieder abgeprüft und ggf. angepaßt werden müssen.

Die weiteren Ausführungen beschreiben ein komplexes System zur automatischen Kalibrierung von Verkehrsablaufmodellen und geben erste Einsatzerfahrungen wieder.

## **2. Mobile Verkehrsdatenerfassung mit Videoaufzeichnungen**

### **2.1 Kalibrierungs- und Validierungsgrößen eines Verkehrsablaufmodells**

Ein Verkehrsmodell soll reale oder fiktive Verkehrsszenarien mit realen Hintergründen nachbilden. Hierfür belegt der Anwender Eingangsgrößen des Modells mit Werten, startet die Simulationsberechnungen und erhält verschiedene Ausgangsgrößen als Simulationsergebnis.



*Bild 1: Ausschnitte aus den Animationen simulierter Verkehrsabläufe*

Die Menge der Eingangsgrößen läßt sich in meßbare Größen und nicht meßbare Größen unterteilen. Zu den meßbaren Größen gehören alle Daten, die sich aus der Realität bzw. aus Dokumentationen ermitteln lassen. Es handelt sich z.B. um die Netztopologie, Signalprogramme, Fahrpläne und verkehrsablaufbeschreibende Kenngrößen. Im Rahmen des Beitrages gilt eine Eingangsgröße als meßbar, wenn sie mit Hilfe des verwendeten Erfassungssystems aus dem realen Verkehrsablauf bestimmt werden kann.

Kalibrierungsgrößen sind solche Eingangsgrößen bzw. Modellparameter, die sich in der Realität nicht oder nicht wirtschaftlich messen lassen, aber die trotzdem im Modell eingestellt werden müssen. Dazu gehört z.B. eine Wunschgeschwindigkeitsverteilung. Tabelle 1 faßt die Ein- und Ausgangsgrößen des im Vorhaben verwendeten Simulators zusammen.

Der Einstellvorgang nicht meßbarer Eingangsgrößen (Kalibrierungsgrößen) in der Art, daß das Modellverhalten bestmöglich mit dem Verhalten des reale Systems übereinstimmt, wird im Beitrag als Kalibrierung bezeichnet. Validierungsgrößen sind im Sinne des Beitrages solche Ausgangsgrößen des Modells, mit denen der Übereinstimmungsgrad des Modells mit der Realität bestimmt wird.

	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
meßbare Größen	Zuflußverkehrsstärken Topologie des Verkehrsnetzes Position und Freigabezeiten von LSA ÖPNV-Fahrpläne Fahrdynamik für ÖPNV-Fahrzeuge Aufenthaltsverteilungen an Haltestellen LKW-Anteile und -Längenverteilungen	Verkehrsstärke an Querschnitten (n-mal)
nichtmeßbare Größen	Routenbelegungen Weg- und Zeitlücken zur Vorfahrtsgewährung Wunschgeschwindigkeitsverteilungen Erwartungswert für Stillstandsabstand Erwartungswert für Anfahrbeschleunigung Maximale Bremsverzögerung Zeitspanne für Einordnungsvorgang Min. Weglücke für Spurwechsel bei Stillstand Diffusionszeit blockierender Fahrzeuge	Simulationsergebnisse Geschwindigkeiten Reisezeiten Verlustzeiten
globale FFE-Parameter	lokale Parameter (n-mal)	

Tabelle 1: Ein- und Ausgangsgrößen eines Verkehrsablaufmodells in Vissim

## 2.2 Anforderungen an die Datenerfassung

Grundvoraussetzung für die automatische Kalibrierung von fahrzeugauflösenden Verkehrsablaufmodellen ist das Vorliegen gemessener Verkehrskenngrößen, die das durch Simulation nachzubildende Szenario über das gesamte Straßennetz konsistent beschreiben.

Für Planungszwecke werden von den Kommunen in meist halbjährlichem Rhythmus Verkehrsbelastungen überwiegend auf der Basis von Handzählungen ermittelt. Diese Daten sind für die Modellparametrierung wenig geeignet, da sie in der Regel aus mehreren Zeiträumen stammen und daher nicht durchgängig zusammenpassen. Oft liegen sie nur in Viertelstundenintervallen vor und sind somit zu stark aggregiert. Geschwindigkeitsmessungen werden bei Handzählungen nicht vorgenommen.

In den wenigsten Fällen lassen sich alle für den Modellabgleich erforderlichen verkehrlichen Kenngrößen aus der bestehenden technischen Infrastruktur (Detektorschleifen, Infrarotsensoren etc.) lückenlos ermitteln. Selbst wenn an einzelnen Knoten Detektoren für die verkehrabhängige Steuerung von Lichtsignalanlagen vorhanden sind, muß eine geeignete Schnittstelle für die Datenausgabe zur Verfügung stehen. Um ein konsistentes Verkehrsabbild zu erlangen, müssen also zumindest an solchen Knoten Verkehrsdaten erhoben werden, für die keine Detektordaten erhältlich sind.

Da für die Modellparametrierung nur Verkehrsdaten des interessierenden Simulationszeitraumes von Belang sind, reicht eine temporäre Datenerfassung aus. Die Montage und Demontage des Meßsystems soll nur wenig Zeit in Anspruch nehmen und zu

keiner Verkehrsbehinderung führen. Daraus ergibt sich, daß solche Systeme, die mit einem Sensor möglichst viele Fahrstreifen überwachen können, diesbezüglich im Vorteil sind.

Aus Bild 2 geht hervor, daß ein Erfassungssystem sowohl Modelleingangsgrößen als auch Validierungsgrößen bereitstellen muß. Demnach werden die Anforderungen an die Datenqualität auch durch das Verkehrsmodell bestimmt. Bei mikroskopischen Verkehrsablaufmodellen, welche die Bewegungsdynamik von Fahrzeugen nachbilden, sind zehntelsekundengenaue Meßwerte wünschenswert.

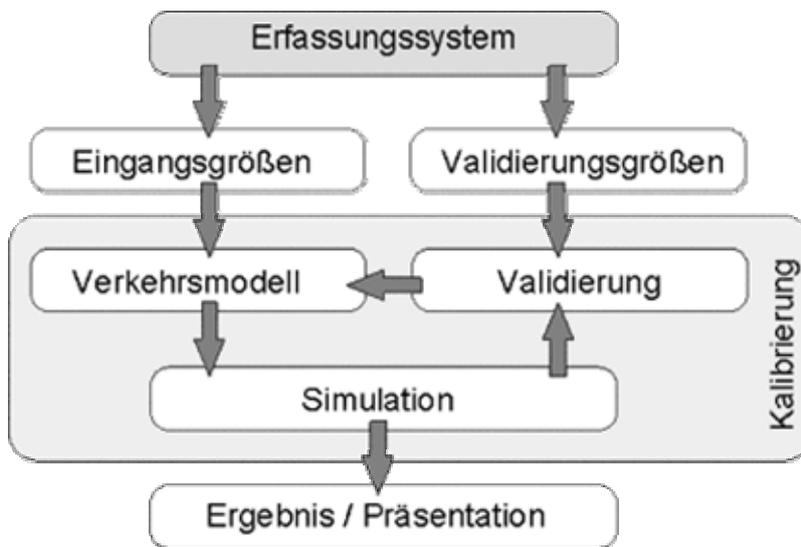


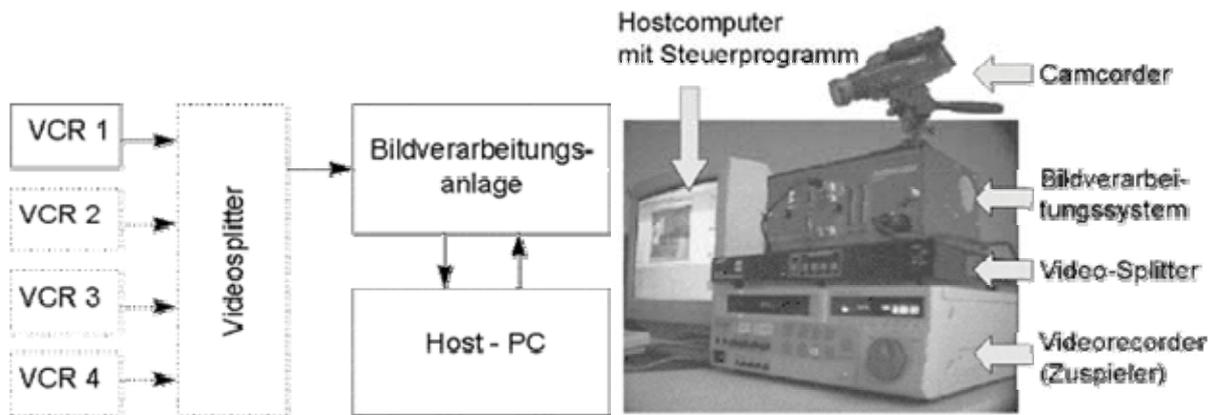
Bild 2: Kalibrierungsprozedur

Schließlich erfordert die simultane Beobachtung der Verkehrsabläufe an mehreren Knoten den zeitgleichen Einsatz mehrerer Erfassungssysteme, die daher kostengünstig zur Verfügung stehen müssen.

Die genannten Anforderungen lassen sich mit Camcordern zur Videoaufzeichnung vor Ort und einer anschließenden automatisierten Auswertung im Labor gut erfüllen. Darüber hinaus bietet der Einsatz von Camcordern zur Verkehrsdatenerfassung weitere Vorteile:

- Aus einem bildgebenden Sensorsystem lassen sich wesentlich mehr Informationen gewinnen als aus anderen bekannten Verkehrserfassungssystemen.
- Es können auch nachträglich zusätzliche Merkmale (Eingangs- und Validierungsgrößen) analysiert werden, die zum Zeitpunkt der Datenerfassung und Modellerstellung noch nicht von Interesse waren.
- Die Funktionstüchtigkeit des Systems ist visuell nachprüfbar, und bei der Präsentation des Simulationsergebnisses kann die Gültigkeit des Ist-Zustandsmodells anhand der Videoaufzeichnung demonstriert werden.
- Eine Videoaufzeichnung kann im Gegensatz zu anderen Detektorarten keine unbemerkbaren Fehler enthalten, bei ungünstigen Bedingungen können Kenngrößen auch visuell ermittelt werden.
- Zur Aufnahme eines zeitkonsistenten Verkehrsszenarios müssen lediglich genügend viele Camcorder bereitstehen.

Um eine große Flächendeckung zu erreichen, müssen möglichst viele Erfassungsgeräte installiert werden. Diese Bedingung läßt sich mit dem Einsatz von Camcordern zur Bildaufnahme und der anschließenden Bildverarbeitung im Labor wesentlich kostengünstiger erfüllen als mit der Installation mehrerer Bildverarbeitungsanlagen, welche die Szenen vor Ort analysieren. Camcorder aus dem Consumermarkt stehen überaus preiswert zur Verfügung. Eine Auswertung vor Ort würde zwar eine Videoaufzeichnung erübrigen, somit aber auch einige der o.g. Vorteile aufheben.



*Bild 3: Konfiguration des Meßsystemaufbaus*

Bild 3 zeigt die Konfiguration des gewählten Meßsystemaufbaus. Damit die Videoaufzeichnungen in möglichst kurzer Zeit ausgewertet werden können, ist der Bildverarbeitungsanlage ein Videosplitter vorgeschaltet. Über diesen können optional bis zu 4 Videosignale zur zeitgleichen Auswertung eingespeist werden. Die Bildverarbeitungsanlage wird von einem Host-PC gesteuert, der die analysierten Verkehrskenngrößen für die automatische Parametrierung des Verkehrsflußmodells zusammenstellt.

An die Bildverarbeitungsanlage wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Das System muß sowohl mit Standardvideosignalen nach CCIR-Norm als auch mit kritischen Signalen aus Videorecordern und Videosplittern fehlerfrei funktionieren.
- Um einen möglichst großen Verkehrsraum flexibel überwachen zu können, sollte eine große Anzahl von virtuellen Detektoren zur Verfügung stehen. Ein virtueller Detektor ist eine Bildregion, bei deren Überfahren ein Detektionssignal erzeugt wird.
- Es müssen sich verschiedene Detektoren kombinatorisch verknüpfen lassen, so daß online ein Ausgangssignal gebildet wird, welches der hinterlegten Boole'schen Funktion entspricht.
- Damit eine Direktversorgung der ausgewählten Verkehrssimulatoren vorgenommen werden kann, muß sich das Bildverarbeitungssystem auf einer PC-Plattform unter dem Betriebssystem Windows integrieren lassen. Die erforderlichen Schnittstellen müssen offengelegt sein.
- Mehrere Video- und Auswertekanäle verkürzen die Auswertzeit der Videobänder.
- Nicht zuletzt müssen die Messungen bei verschiedenen Witterungsbedingungen hinreichend zuverlässig sein. Angestrebt wird hierbei die Meßgenauigkeit von Induktionsschleifen.

## **2.3 Aufnahme- und Aufzeichnungstechnik**

Die rechnergestützte automatische Auswertung von Videosequenzen erfordert eine gewisse Sorgfalt bei der Erstellung der Videoaufnahmen. Es zeigte sich, daß Aufnahmefehler und unzweckmäßig gewählte Aufnahmestandorte die automatisierte Bildauswertung erheblich erschweren.

Für die Bildaufzeichnung wurden Camcorder mit dem Format Video8 eingesetzt. Das Video8-Format ermöglicht im Longplay-Modus eine Aufnahmedauer von 4 Stunden, die über der von VHS-C-Geräten liegt. Die Bildqualität war auch im Longplay-Modus ausreichend.

Um eine adäquate Camcorderlaufzeit auch bei niedrigen Außentemperaturen zu gewährleisten, wurden die mitgelieferten NiCd- oder NiMh-Akkus durch Blei-Gel-Akkus höherer Kapazität (z.B. 6V/12Ah) ersetzt.

Da die Kameras unter verschiedenen Wetterbedingungen eingesetzt werden müssen, ist auf einen ausreichenden Staub- und Nässeschutz zu achten. Als geeignet erwiesen sich hierbei flexible Wetterschutzhüllen mit Einsätzen aus optischem Glas. Beim Einsatz dieser Schutzhüllen sind einige Dinge zu beachten:

- Die in der Regel dunklen Kameragehäuse müssen vor Überhitzung bei Sonneneinstrahlung geschützt werden. Hierzu wird ein nach außen weißes Blatt Papier zwischen Kamera und Wetterschutzhülle geschoben. Die Unterseite dieser Abdeckung sollte möglichst dunkel sein, um störende Reflexionen in der Kameraoptik zu vermeiden.
- Kann die Kamera in ausreichender Höhe montiert werden, setzen sich wegen der starken Kameraneigung bei Regen kaum Tropfen auf die Optik. Es ist auf eventuelle Einwirkung von Spritzwasser durch vorbeifahrende Fahrzeuge zu achten. Bei der temporären Montage an Lichtmasten in einer Höhe von 7 bis 13 Metern traten keine Probleme durch Diebstahl und Vandalismus auf.
- Durch den Einsatz von Weitwinkelvorsätzen kann der Bildausschnitt effektiv vergrößert werden. Trotzdem bleibt das Verdeckungsproblem insbesondere bei niedrigen Montagehöhen bestehen. Die auftretenden Verzerrungen am Bildrand haben keinen maßgeblichen Einfluß auf das Meßergebnis. Eine unscharf gestellte Optik schränkt die Auswertbarkeit der Aufnahmen mit dem verwendeten Bildverarbeitungssystem wider Erwarten nicht ein.
- Es ist zu beachten, daß einige Kameras nach einem Akkuwechsel alle Einstellungen (Fokus, Zoom, Blende usw.) zurücksetzen. In diesem Fall darf ein erneutes Einrichten der Geräte nicht vergessen werden.

## **2.4 Bildverarbeitungssystem**

Eine umfassende Marktrecherche zu Beginn des Vorhabens ergab, daß lediglich das Bildverarbeitungssystem Autoscope 2004 (Image Sensing Systems Inc.) die gestellten Anforderungen erfüllte. Es wurde deshalb trotz seiner hohen Beschaffungskosten für die Arbeiten ausgewählt.

Das Bildanalysestystem wird üblicherweise in LSA-Steuergeräten eingesetzt und ersetzt dort Induktionsschleifen oder Infrarotsensoren. Es besteht aus einer Kombination aus Hard- und

Software und arbeitet mit Farb- und Schwarzweiß-Videoaufnahmen im PAL-Composite-Format. Es stehen zwei voneinander unabhängige Kameraeingänge zur Verfügung. Pro Eingang können bis zu 99 virtuelle Detektoren positioniert werden. In der Detektionsphase werden verschiedene Verkehrskenngrößen unabhängig von einem Steuerungsrechner (Host-PC) aus den zugespielten Bildfolgen abgeleitet und in einem internen Speicher gesichert. Abhängig vom Speicherausbau, von der Anzahl der virtuellen Detektoren und der Größe des festzulegenden Aggregationsintervalls für die Meßgrößen kann das Gerät Daten über mehrere Tage speichern.

Die auf einem Host-PC installierte Auswertesoftware bildet die Schnittstelle zwischen dem Anwender und der Bildverarbeitungshardware. Sie ermöglicht die querschnittsbezogene Erfassung bzw. Berechnung und Speicherung folgender Kenngrößen:

- Überfahrzeitpunkte virtueller Detektoren (mehr als zehntelsekundengenau),
- Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit,
- Verkehrsstärke,
- Fahrzeuglänge,
- Klassifizierung von Geschwindigkeits- oder Längengruppen sowie
- Belegungsgrad und Zeitlücken.

Bevor diese Größen gemessen werden können, müssen die virtuellen Detektoren eingerichtet und ggf. kalibriert werden. Es stehen Zähl-, Anwesenheits- und Geschwindigkeitsdetektoren zur Verfügung, die auf die ihnen zugeordnete Aufgabe spezialisiert sind. Verschiedene geometrische Anordnungen und logische Verknüpfungen mehrerer Detektoren ermöglichen eine beträchtliche Senkung der Fehlerrate. Insbesondere die Erkennung und das Separieren von verschiedenen gerichteten Verkehrsströmen im zentralen Bereich von Knotenpunkten erfordert das Ausnutzen der unterschiedlichen Eigenschaften der spezialisierten Detektoren und der logischen Kombination ihrer Ausgangssignale. Die Erstellung und Erprobung eines solchen Detektorlayouts ist relativ zeitaufwendig. In diesen Fällen sollte der Einsatz zusätzlicher Kameras erwogen werden.

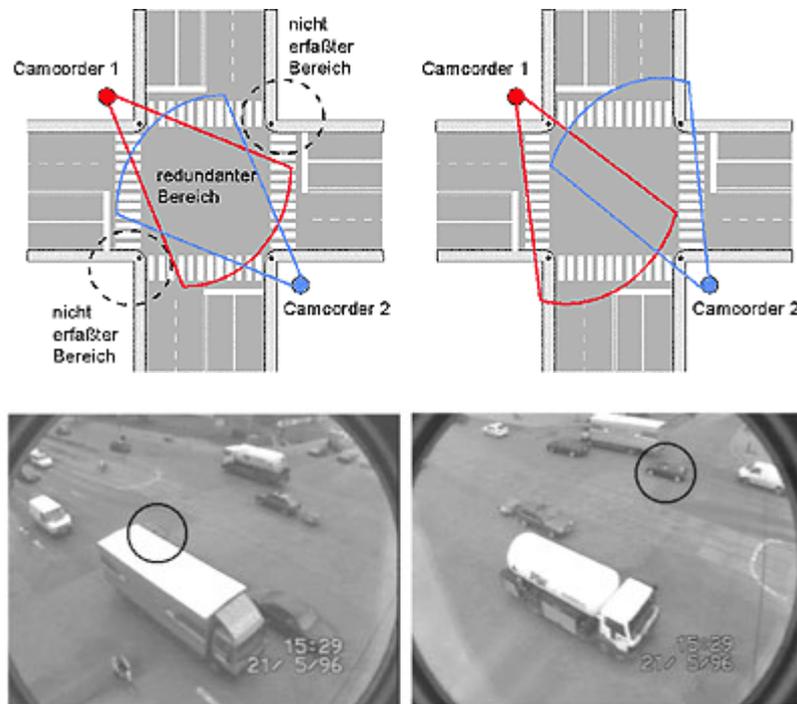
## **2.5 Aufnahmestandorte**

Bereits die ersten praktischen Einsätze haben gezeigt, daß die richtige Standortwahl für die Kameras einen größeren Einfluß auf die Ergebnismenge haben kann als die Aufnahmequalität.

Als ein Hauptproblem bei der videogestützten Verkehrsbeobachtung erweist sich die gegenseitige Fahrzeugverdeckung. Bei ungünstigem Beobachtungswinkel können größere Fahrzeuge (Lkw, Busse, Zugmaschinen) kleinere Fahrzeuge (Pkw, Krad) teilweise oder vollständig verdecken (Bild 4). Das Bildverarbeitungssystem ist dann nicht mehr in der Lage, die Objektkonturen aufzulösen und die Fahrzeuge richtig zu erkennen. Deshalb ist auf eine ausreichende Höhe des gewählten Kamerastandortes zu achten.

Lassen sich Verdeckungen nicht vermeiden, können mehrere Kameras an einem Querschnitt eingesetzt werden, welche die gleiche Verkehrsszene von verschiedenen Standorten erfassen (Bild 4). Durch eine "Oder-Verknüpfung der Bildinhalte" lassen sich Verdeckungen korrigieren. Hierbei geht die angestrebte Redundanz in den Bildbereichen zu Lasten anderer Erfassungsbereiche (Bild 4).

Bei großen Knoten und geringer Montagehöhe ist es ratsam, an jedem Zufluß und quer zur Fahrtrichtung eine Kamera anzuordnen. Da dann auch keine Bildbereiche vorhanden sind, die von mehreren Verkehrsströmen nacheinander aus unterschiedlichen Richtungen befahren werden, können im Bildverarbeitungssystem einfachere Detektoranordnungen verwendet werden, die zuverlässiger arbeiten und weniger vorgetestet werden müssen.



*Bild 4: Erfassung verdeckter Fahrzeuge durch Einsatz mehrerer Kameras*

### 3. Gesamtsystem

Für die automatisierte Modellparametrierung müssen das Bildverarbeitungssystem, der Host Computer und ein Zuspieldrecorder zu einer Gesamtanlage zusammengeführt werden, deren Hardware- und Softwarestruktur in Bild 6 gezeigt wird. Auf dem Host Computer laufen neben der Auswertesoftware der Bildverarbeitung (BV-Software) ein Steuerprogramm SP, ein Tabellenkalkulationsprogramm zur Datenaufbereitung und -präsentation sowie der Verkehrssimulator, hier Vissim. Neben der eigentlichen Bildauswertung muß das Gesamtsystem folgende Aufgaben wahrnehmen:

- Herstellung der Korrespondenz von virtuellen Detektoren des Bildverarbeitungssystems und der Topologie des Simulationsmodells,
- Koordinierung der Bildzuspielung zur Videoauswertung,
- Datenauswertung und -interpretation,
- Plausibilitätstest und Fehlermanagement,
- Kalibrierungsfunktionen für nicht meßbare Modellparameter sowie
- Archivierung von Konfigurations- und Meßdaten.

Die Datenkommunikation zwischen den Softwarekomponenten auf dem Host Computer wird entweder offline über ASCII-Dateien oder zur Laufzeit der Programme über DDE-Schnittstellen realisiert. Der dynamische Datenaustausch über DDE (Dynamic Data

Exchange) beruht auf dem Nachrichtenkonzept des Windows-Betriebssystems. Bei offengelegten DDE-Schnittstellen können verschiedene Anwendungsprogramme online miteinander kommunizieren. Von dieser Möglichkeit wurde Gebrauch gemacht, um den Verkehrssimulator Vissim auch während einer laufenden Simulation durch das eigenständige Steuerprogramm SP bedienen und parametrieren zu können. Bei der Datenübertragung über ASCII-Dateien sind dagegen keine Interaktionen zwischen den beteiligten Programmen möglich.

Die Datenübertragung zwischen dem Host Computer und der Bildverarbeitungshardware sowie dem Zusprieler erfolgt über serielle RS 232-Schnittstellen.

Da in einem Projekt viele einzelne Videoaufzeichnungen verschiedener Standorte und verschiedener Aufnahmezeiten entstehen und modellkonsistent ausgewertet werden, müssen zur Qualitätssicherung Vorkehrungen gegen Verwechslungen bei der Bearbeitung getroffen werden. Diese Aufgabe übernimmt das zentrale Steuerprogramm SP. Es kontrolliert den gesamten Prozeß der Fahrzeugdetektion, der Modellparametrierung und -kalibrierung, der anschließenden Simulation sowie der Datenverwaltung.

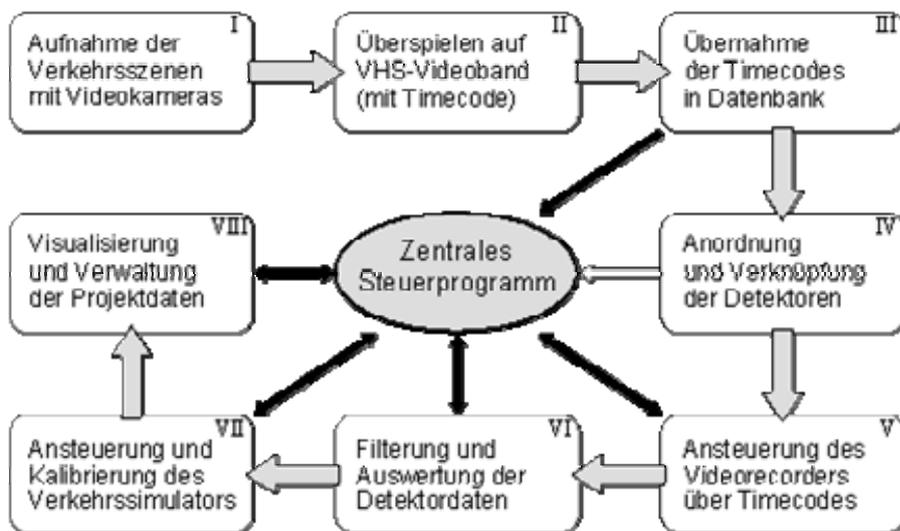


Bild 5: Von der Videoaufzeichnung bis zur Ergebnispräsentation

Beim Betrachten des schematischen Arbeitsablaufes von der Verkehrsaufnahme bis zur Präsentation der Simulationsergebnisse (Bild 5) wird deutlich, daß in jedem Arbeitsschritt Daten und Informationen anfallen, die im weiteren Verlauf immer wieder benötigt werden. Viele dieser Daten bilden eine logische Einheit, die bei der Bearbeitung eines Simulationsprojektes nicht zerstört werden darf. Diese Gefahr besteht insbesondere dann, wenn mehrere Bearbeiter beteiligt sind, die Bearbeitung sich über längere Zeiträume erstreckt oder ein Modell im Rahmen einer Fortschreibung gepflegt werden muß.

Neben der Datenkonsistenzsicherung übernimmt das Steuerprogramm SP die automatische Steuerung der beteiligten Komponenten während der Kalibrierungsprozedur. Vor dem Hintergrund der Qualitätssicherung werden alle Vorgänge protokolliert, so daß das Zustandekommen eines Simulationsergebnisses bis zur Videoaufnahme zurückverfolgt werden kann.

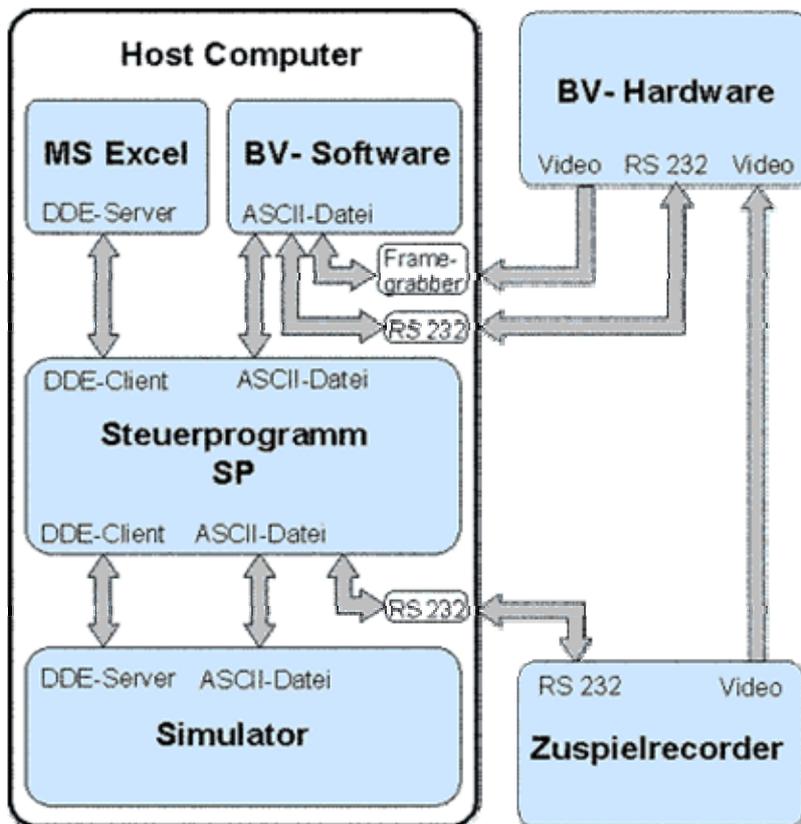


Bild 6: Hardware- und Softwarestruktur der Gesamtanlage

#### 4. Modellkalibrierung

Die Kalibrierung ist eine iterative Prozedur, bei der eine Kalibrierungsgröße zunächst mit einem angenommenen Wert belegt und nach anschließender Simulation anhand ausgewählter Validierungsgrößen die Güte des Modells beurteilt wird. Falls die Modellgüte nicht den Vorstellungen entspricht, wird versucht, durch Modifikation des angenommenen Wertes eine verbesserte Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Validierungsgrößen zu erreichen. Dies geschieht über geeignete Algorithmen.

Tabelle 1 enthält die mit Blick auf die Kalibrierung wesentlichen Ein- und Ausgangsgrößen für ein Verkehrsablaufmodell in Vissim. Dort wird noch zwischen lokalen Verkehrsparametern und globalen Parametern der Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE) unterschieden. Die Ausgangsgrößen können nach einem Vergleich mit den entsprechenden real gemessenen Werten Aufschluß darüber geben, ob die für die nicht meßbaren Größen angenommenen Werte plausibel sind. Die kursiven Hervorhebungen sollen eine sich als zweckmäßig erwiesene Einteilung widerspiegeln. Es mag bezüglich der Zugehörigkeit einzelner Größen zu den meßbaren bzw. nicht meßbaren Eingangsgrößen oder auch zu den Validierungsgrößen durchaus andere Auffassungen geben.

Die kursiv hervorgehobenen Größen werden in der weiteren Betrachtung im Mittelpunkt der Diskussion stehen. Ziel ist es, Werte für diese nicht meßbaren Kalibrierungsgrößen so zu finden, daß ein geeignetes Maß für die Abweichung hinsichtlich der Validierungsgrößen minimiert wird. Für die meßbaren Eingangsgrößen werden die mit dem verwendeten Bildverarbeitungssystem gemessenen Werte eingesetzt.

Ein Hauptproblem beim Aufbau von Verkehrsablaufmodellen ist die Kalibrierung der Routenbelegungen innerhalb des Verkehrsnetzes. Im Rahmen einer Simulationsstudie ist es de facto unmöglich, für Verkehrsnetze mit mehreren Knoten Quelle-Ziel-Beziehungen bzw. Routenbelegungen durch Messungen zu ermitteln.

Es ist prinzipiell möglich, die Routen zu benennen, auf denen sich die Fahrzeuge im Verkehrsnetz bewegen. Für die Angabe der vollständigen routenspezifischen Quelle-Ziel-Beziehungen werden noch die Routenanteile benötigt, d.h. die Anzahl der Fahrzeuge, die sich auf jeder Route bewegen. Zur Bestimmung dieser Routenanteile werden Querschnittsmessungen (Verkehrsstärkewerte) herangezogen, die in ein Gleichungssystem eingehen, das bekanntermaßen hochgradig unterbestimmt ist. Die Lösung des Gleichungssystems führt zu einem Lösungsraum mit einer unendlich großen Lösungsmenge. Die gesuchten Routenanteile, die als Lösungen des Gleichungssystems die gemessenen Verkehrsstärken ergeben, sind somit nicht eindeutig bestimmbar. Um dennoch zu einem Ergebnis zu gelangen, muß mit einer geeigneten Schätzmethode eine Lösung aus dem Lösungsraum ausgewählt werden. Dazu wird postuliert, daß unter allen Lösungen diejenige am besten geeignet ist, bei der die Anteile auf die einzelnen Routen am ausgeglichsten verteilt sind. Das entspricht einem in der Naturwissenschaft üblichen Prinzip im Umgang mit Unbestimmtheiten - dem Entropieprinzip.

Es wurde ein Softwaremodul entwickelt, welches aus der Modellbeschreibung (Vissim: \*.inp-Datei) und den Bildverarbeitungsmeßwerten (ASCII-Datei) ein Gleichungssystem aufbaut und in Anlehnung an [BEI-79] löst. Die so ermittelten Routenanteile werden dem Simulator direkt über eine modifizierte Modellbeschreibungsdatei (\*.inp) bekanntgemacht.

Durch das Zurückgreifen auf die \*.inp-Datei kann bei automatisch eingestellten Verkehrsstärken der automatische Ablauf bis hin zur Kalibrierung der Routenanteile gewährleistet werden. Das Modul erbrachte insbesondere bei der Modellierung größerer Netze einen erheblichen Zeitvorteil.

Nach der Schätzung der Routenbelegungen sind für weitere Kalibrierungsgrößen (s. Tabelle 1) Werte zu bestimmen, die nach einem Simulationslauf nur noch eine Abweichung zwischen (simulierten) Validierungsgrößen und Meßwerten aufweisen, die innerhalb einer Toleranzgrenze liegt. Diese Aufgabe wird als Optimierungsproblem aufgefaßt und entsprechend gelöst. Dazu ist aus einer Menge von möglichen Wertekombinationen der Kalibrierungsgrößen diejenige auszuwählen, für welche der Funktionswert einer auf dieser Menge definierten Funktion sein Minimum annimmt.

Die klassische Optimierungstheorie beschreibt Lösungsalgorithmen für Optimierungsprobleme mit Hilfe von Eigenschaften der zu optimierenden Funktion, der Zielfunktion. Da a-priori allerdings nichts über die Eigenschaften der Funktion bekannt ist, muß jeder Funktionswert erst durch eine komplette Simulation der modellierten Verkehrssituation beschafft werden.

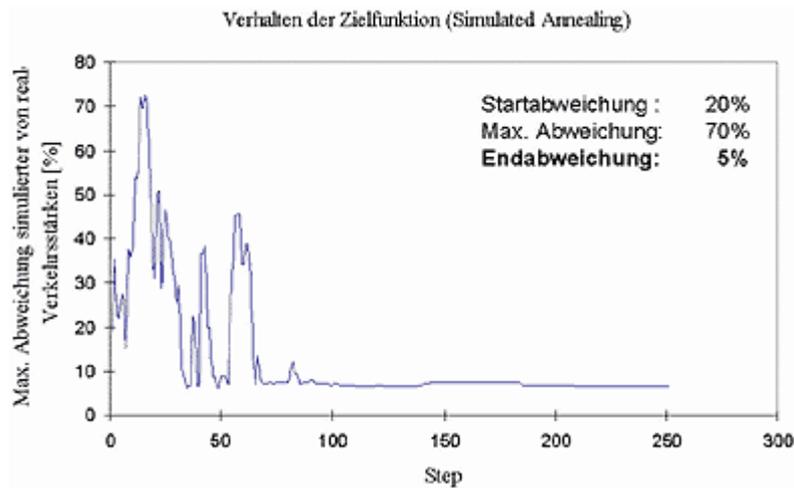


Bild 7: Verlauf der Zielfunktionswerte beim Simulated Annealing

Wegen der Fülle von möglichen Wertekombinationen wurden heuristische Methoden der Optimierung favorisiert, wobei das sogenannte "Simulated Annealing" [KIN-94] erfolgreich zur Anwendung kam. Eine typische zeitliche Entwicklung des Zielfunktionswertes (die maximale prozentuale Abweichung einer simulierten Verkehrsstärke von der Realität) für den Vorgang der automatischen Kalibrierung eines Modells mit dem Simulated-Annealing-Algorithmus geht aus Bild 7 hervor. Es wird deutlich, daß die Modellgüte durch die automatische Kalibrierung von einer Startabweichung bei 20% auf ein akzeptables Abweichungsniveau von 5% erheblich verbessert werden konnte. Detailliertere Ausführungen zum Algorithmus und dessen Anwendung zur Kalibrierung von Verkehrsablaufmodellen können [HOY-97] entnommen werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein integriertes System zur rechnergestützten Kalibrierung komplexer Verkehrsablaufmodelle auf der Grundlage von ortsverteilt-zeitparallelen Videoaufzeichnungen vorgestellt. Es wurde verdeutlicht, wie der Zeit- und Kostenaufwand zur Modellkalibrierung und -validierung bei gleichzeitiger Verbesserung der Modellgüte erheblich reduziert werden kann.

Mit der Abbildung des Straßenverkehrs in Videoaufzeichnungen und der anschließenden Extraktion von Verkehrskenngrößen mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems lassen sich wesentlich mehr Informationen gewinnen als aus anderen bekannten Verkehrserfassungssystemen. Die Meßgrößen können sehr flexibel, visuell überprüfbar und vor allem ohne Eingriff in den Verkehrsablauf ermittelt werden. Eine Simultanaufzeichnung an mehreren im Straßennetz verteilten Standorten gewährleistet die geforderte Konsistenz der Meßdaten. Eine direkte Übernahme von Meßdaten in den Simulationsrechner umgeht zeitaufwendige und in der Regel fehlerbehaftete Handeingaben.

Die methodischen Ergebnisse des dem Beitrag zugrunde liegenden Vorhabens sind prinzipiell auf andere Verkehrsmodelle übertragbar. Von besonderem Interesse sind hierbei makroskopische und mesoskopische Modelle, die sich durch eine große

Simulationsgeschwindigkeit auszeichnen und daher mit den entwickelten Methoden in wesentlich kürzerer Zeit kalibriert werden können. Das ständige Nachführen (Kalibrieren) von Modellparametern gewinnt mit dem Einsatz von Online-Simulationsmodellen für die Verkehrsprognose zunehmend an Bedeutung.

### **Literatur:**

- [BEI-77] Beil, D.: Matrixmodelle zur Ermittlung von Teilströmen aus Querschnittsmessungen. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe, 1979.
- [HOY-97] Hoyer, R., Fellendorf, M.: Parametrization and Validation of microscopic Traffic Flow Models through Image Processing. 8. IFAC-Symposium on Transportation Systems, Chania, GR, 16.06-18.06.1997, Proceedings.
- [KIN-94] Kinnebrock, W.: Optimierung mit genetischen und selektiven Algorithmen. München, Wien: Oldenburg Verlag, 1994.