Kapitel 2

Forschungsschwerpunkt Verkehr

Neben interessanten wissenschaftlichen Fragestellung aufgrund der komplexen Dynamik von Verkehrssystemen ist die Beschäftigung mit diesen von hoher gesellschaftlicher Bedeutung. Gefragt sind wirkungsvolle Werkzeuge, die die Beurteilung von Verkehrszuständen und die vorausschauende Bewertung von Steuerungsmaßnahmen ermöglichen. Hierbei hat sich in den letzten Jahren die mikroskopische Simulation des Verkehrsgeschehens zu einem solchen Werkzeug entwickelt, das im Gegensatz zu konventionellen Modellen der Verkehrsplanung in der Lage ist, die wichtigen dynamischen Effekte im Verkehr abzubilden. Zu diesen Eigenschaften zählen das stark über Tag (rush hour), Woche und Jahr (Ferienverkehr) variierende Verkehrsaufkommen, sowie die Bildung von Staus und die Einzelfahrzeugdynamik.

Seit vielen Jahren bildet die Untersuchung und Entwicklung mikroskopischer Verkehrsmodelle einen bedeutenden Schwerpunkt in unserer Arbeitsgruppe. Das Arbeitsfeld reicht inzwischen von der Modellierung mobilitätserzeugender Verhaltensmuster und der Beschreibung der daraus resultierenden Verkehrsnachfrage, über die dynamische Routenumlegung bis zur eigentlichen Simulation der Bewegung der einzelnen Fahrzeuge und der Berechnung der sich ergebenden Schadstoffemissionen.

Unsere Arbeit findet in sehr enger Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft– und Raumfahrt statt, das seit Anfang dieses Jahres ein neues Institut mit dem Schwerpunkt Verkehrsforschung/–technik errichtet. Die dort ansässige Arbeitsgruppe ist 1996 aus unserer Gruppe entstanden und wächst seit Entstehung des neuen Forschungsschwerpunktes stetig. Neben dieser sehr fruchtbaren Zusammenarbeit ist unsere Arbeitsgruppe auch in vielen anwendungsorientierten Projekten (s.a. Abschnitt **??**) mit unterschiedlichsten Projektpartnern aktiv. Dies ist ein ständiger Motor für die Weiterentwicklung unserer Modelle und die Erschließung neuer Bereiche aus dem Umfeld der Verkehrssimulation. Insbesondere hat sich die Arbeitsgruppe im vergangenen Jahr erstmals mit der Modellierung von Schienenverkehr beschäftigt.

2.1 Wissenschaftlicher Fortschritt

Innerhalb unserer anwendungsorientierten Forschungsprojekte ergeben sich ständig neue wissenschaftliche Fragestellungen, die im Rahmen von Diplom– und Doktorarbeiten untersucht werden. Neben daraus resultierenden zahlreichen Veröffentlichungen, wurden im Berichtzeitraum verschiedene Dissertationen und Diplomarbeiten abgeschlossen. Die Dissertationen beschäftigten sich inhaltlich mit den folgenden Themen:

Heuristische Verfahren zur Bestimmung von kürzesten Wegen in großen Straßengraphen

Das Problem, einen kürzesten Weg zwischen zwei Knoten in einem gewichteten Graphen zu finden, ist eines der klassischen Probleme in der Netzwerkoptimierung, das seit über vierzig Jahren Gegenstand ausgiebiger Forschungstätigkeit ist. In vielen praktischen Anwendungen taucht die Bestimmung von kürzesten Wegen auf, entweder als eigenständige Fragestellung (z.B. bei Transportproblemen, Projektmanagement und DNA-Sequenzierung) oder als Teilproblem eines komplexeren Problemzusammenhangs (z.B. bei der Approximation von Funktionen und dem Knapsack-Problem).

Im Rahmen einer Dissertation wurden verschiedene algorithmische Verfahren zur Bestimmung kürzester Wege

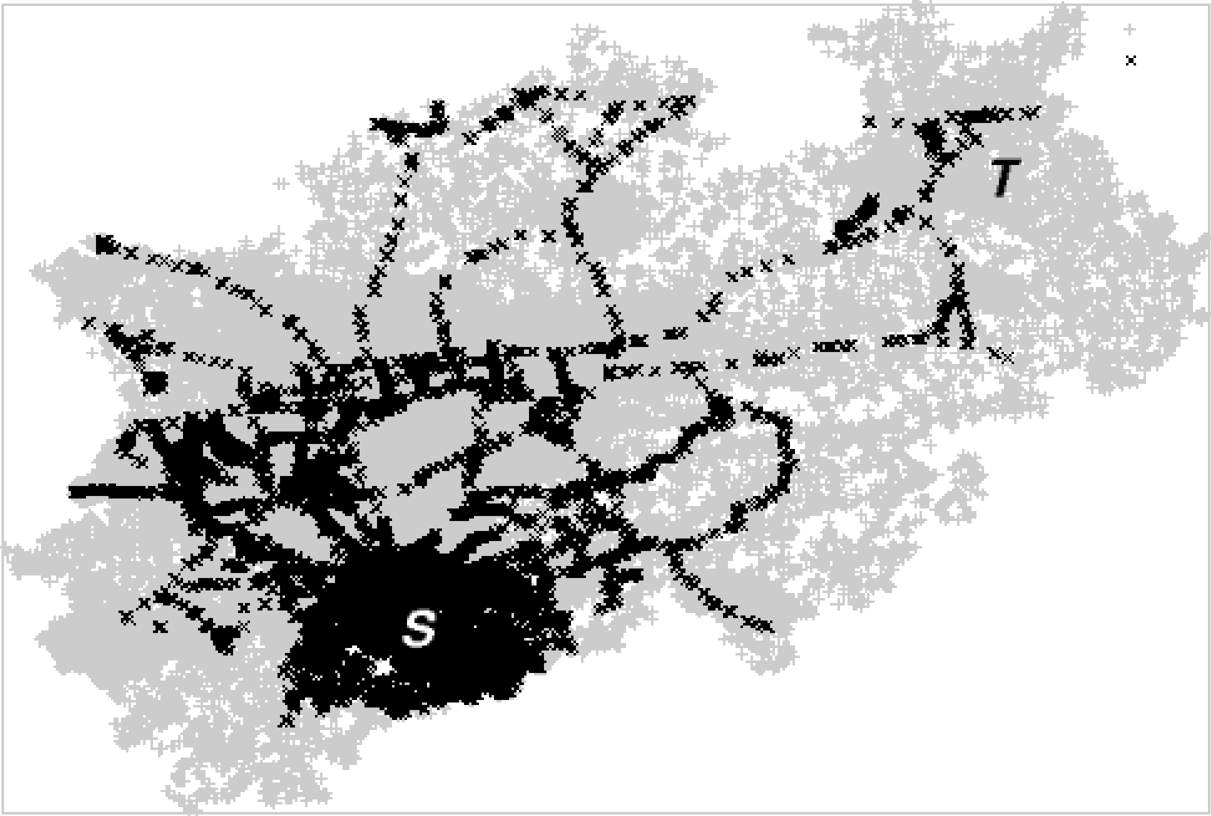

Abbildung 2.1: *Bestimmung des kürzesten Weges zwischen den Knoten S und T. Es wird ein Rückwärtsdijkstra vom Zielknoten T aus auf dem Suchgraphen der Partitionsklasse, in der S liegt, durchgeführt. Im Gesamtgraphen sind alle Knoten schwarz eingefärbt, die während der Suche vom Algorithmus „besucht“ werden.*

in sehr großen Straßengraphen untersucht. Die Beschäftigung mit diesen Fragestellungen wurde angeregt durch die zunehmende praktische Bedeutung der Generierung von geeigneten Routenempfehlungen für eine Vielzahl von Fahrern in Straßennetzen.

Ausgelöst wurde diese Entwicklung durch die Notwendigkeit einer effektiveren Verkehrslenkung aufgrund des immer weiter steigenden Verkehrsaufkommens und durch den Einsatz neuer Technologien im Bereich der Fahrzeugelektronik in den letzten Jahren. Hier sind insbesondere die zunehmende Verbreitung von individuellen Navigationssystemen und das damit verbundene Gebiet der Telematik zu nennen. Seit der Markteinführung solcher Navigationssysteme vor einigen Jahren verzeichnen die Hersteller jährlich sich verdoppelnde Umsatzzahlen mit einem erwarteten Absatz von über 600.000 Geräten in Deutschland für das Jahr 2000. Dabei tendiert die Entwicklung zu einer Routenführung hin, bei der zunehmend dynamische Verkehrsdaten berücksichtigt werden.

Auch bei einer effizienteren Planung und Steuerung von Verkehr mittels der am Institut entwickelten einzelfahrzeugbasierten Mikrosimulation müssen bei der iterativen Bestimmung des dabei angestrebten Verkehrsgleichgewichts idealerweise in jedem Iterationsschritt die Routen aller Fahrer neu berechnet werden. Bereits für ein relativ kleines Untersuchungsgebiet wie das Straßennetz der Stadt Wuppertal mit ungefähr 17.000 Kanten im Graphen bedeutet dies die Berechnung von 500.000 Routen pro Iterationsschritt, was selbst auf Computerworkstations der aktuellen Technik mehrere Stunden in Anspruch nimmt.

Den beschriebenen Anwendungen ist gemeinsam, dass eine benötigte Route nicht unbedingt der tatsächlich kürzeste Weg zwischen den beiden Endpunkten sein muss. Es reicht, wenn die Fahrtzeit einer vorgeschlagenen Routenempfehlung hinreichend nahe an derjenigen des optimalen Weges ist. Für die Zufriedenheit des Benutzers eines individuellen Navigationssystems ist es dabei insbesonders wichtig, dass seine persönlichen Erwartungen erfüllt werden. Dagegen steht im Rahmen einer Verkehrssimulation eine ausreichende Beschreibung des realen Verkehrszustandes im Vordergrund. Dieser ist gegenüber vereinzelten nicht zu großen Abweichungen der Routen von optimalen Wegen relativ unempfindlich.

Für das darunter liegende Problem der Bestimmung von kürzesten Wegen in Graphen mit nicht-negativer Kostenfunktion ist der klassische Lösungsalgorithmus das bereits 1959 von Dijkstra vorgeschlagene Verfahren. Die schnellsten Implementierungen von Dijkstras Algorithmus benötigen für die Bestimmung eines kürzesten Weges im Straßengraphen von Nordrhein-Westfalen mit etwas über einer Million Kanten weniger als eine Sekunde auf einer Sun Enterprise E450 mit 4 mit 400 MHz getakteten UltraSPARC-II Prozessoren.

In praktischen Anwendungen kommen häufig heuristische Verfahren zur Routengenerierung in Straßengraphen zum Einsatz. Solche Methoden nutzen meist die spezielle Struktur von Straßengraphen mit gerichteten Kanten, Kantenlängen nah der euklidischen Distanz der beiden Endknoten sowie die Fastplanarität und eine hierarchischen Struktur aufgrund einer Typisierung der Kanten nach Wichtigkeit.

Im Rahmen der Dissertation wurde eine Heuristik entwickelt, die die Ähnlichkeit von kürzesten-Wege-Bäumen in Straßengraphen für nah beeinander liegende Startknoten ausnutzt. Die Heuristik gliedert sich in mehrere Phasen. Zuerst wird der Graph in k Klassen möglichst gleicher Größe partitioniert, und nachdem für jede Partitionsklasse eine Reihe von Basisknoten bestimmt wurde, wird in jeder der Klassen ein Suchgraph auf Basis dieser Knoten erzeugt. Diese Suchgraphen enthalten wesentlich weniger Kanten als der Gesamtgraph, aber alle Knoten des Graphen. Die Kantenmenge eines Suchgraphen besteht aus allen Kanten der Klasse und der Vereinigung aller Kanten von kürzesten-Wege-Bäumen der Basisknoten. Die Suchgraphen sind somit lokal dicht, aber global dünn besetzt. Die Anwendung eines Rückwärtsdijkstra bei der eigentlichen Routensuche führt schließlich zu einem sehr schnellen Algorithmus, s.a. Abbildung **??**.

Auf den größten betrachteten Netzen ist die Baumheuristik um einen Faktor drei bis acht schneller als Dijkstras Algorithmus. In Bezug auf die Anzahl permanent markierter Knoten erzielt die Heuristik einen Gewinn um den Faktor 7 bis 20. Dabei werden Pfade gefunden, die im Mittel um weniger als 1% vom optimalen Weg abweichen, sofern die beiden Endknoten nicht zu nahe beeinander liegen. Es ist zu erwarten, dass über 90% der exakten kürzesten Wege von der Heuristik gefunden werden.

Darüber hinaus wurden etablierte Heuristiken untersucht und für das spezielle Problem auf Straßengraphen angepasst. Der Vergleich der Baumheuristik mit diesen Ansätzen zeigt, dass die neu entwickelte Heuristik aufgrund der gleichzeitigen Ausnutzung von geometrischen und hierarchischen Strukturen der Straßennetze und der Möglichkeit der dynamischen Anpassung der Suchgraphen zu sehr guten Ergebnissen führt.

Untersuchungen zur parallelen, objektorientierten Verkehrssimulation

Um Mehrprozessorsysteme mit verteiltem Speicher effizienter für die Simulation von Verkehr nutzen zu können, wurde innerhalb einer Dissertation untersucht, in wieweit sich objektorientierte Verkehrssimulationen und insbesondere die in unserer Arbeitsgruppe entwickelte Software PLANSIM-T parallelisieren lassen. Wesentlich hierzu ist die hinsichtlich der Lastenverteilung ausgewogene Zerlegung des zugrunde liegenden gewichteten Objektgraphen, der das Straßennetz mit seinen Eigenschaften repräsentiert. Die daraus resultierenden Teilgraphen werden dann parallel von unterschiedlichen Rechnern oder Prozessoren bearbeitet. Um die Kommunikation zwischen den einzelnen Prozessen niedrig zu halten, ist es nötig, die Anzahl der geschnittenen Kanten möglichst gering zu halten, da eine Absprache zwischen den Prozessoren genau dann erforderlich ist, wenn Fahrzeuge zwischen zwei Teilnetzen bewegt werden.

Aus diesem Grund ist der Algorithmus, der das Netz auf die Prozessoren aufteilt, besonders wichtig. Es wurden hierfür verschiedene Verfahren untersucht, die zur Zerlegung eines Objektgraphen verwendet werden können. Dabei wurden sowohl einfache Verfahren betrachtet, die keine Informationen über die Struktur des Graphen verwenden, als auch physikalisch motivierte sowie geometrische Verfahren, die Zerlegungen über die Berechnung von Trägheitsmomenten oder harmonischen Schwingungen finden. Zusätzlich wurden Reduktionsverfahren untersucht, die aus dem Graphen einen vereinfachten Hilfsgraphen konstruieren, der dann mit einem einfachen Verfahren zerlegt wird. Diese Zerlegung lässt sich mit lokalen

Optimierungsverfahren auf den ursprünglichen Graphen übertragen. Es hat sich gezeigt, dass als Reduktionsverfahren die von Karypis vorgeschlagen Multilevel k–way Partitionierung die für das vorliegende Problem geeignetesten Ergebnisse liefert. Dieses Verfahren lässt sich zudem sehr gut parallelisieren.

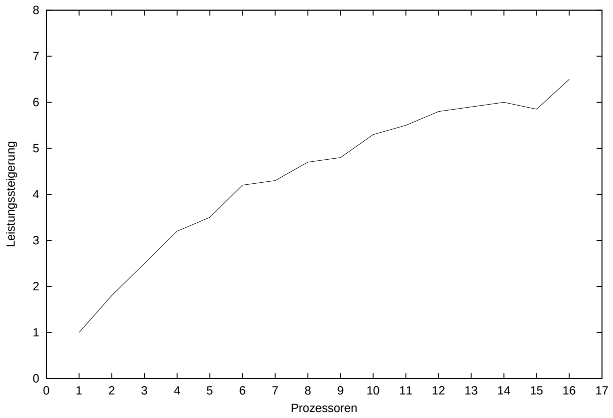

Abbildung 2.2: *Erzielte Leistungssteigerung durch die Parallelisierung von* PLANSIM-T *mit zunehmender Zahl von Prozessoren.*

Neben den theoretischen Überlegungen über die Zerlegung von Straßennetzen wurde eine universell einsetzbare Bibliothek entwickelt, welche es den einzelnen Prozessen ermöglicht, miteinander zu kommunizieren. Diese wurde speziell auf die Verkehrssimulation PLANSIM-T zugeschnitten und greift auf die frei erhältlichen Standardbibliotheken PVM (Parallel Virtual Machine) und MPI (Message Passing Interface) zurück, welche die Programmierung eines heterogenen Netzwerks von parallelen und seriellen Computersystemen als einen einzigen parallelen Rechner mit verteiltem Speicher ermöglicht.

Um die Leistungssteigerung zu messen, wurden verschiedene Netze auf unterschiedlichen Rechnersystemen simuliert und der Geschwindigkeitszuwachs bewertet. Abbildung **??** zeigt die Ergebnisse für ein großes Netz von NRW mit über 50.000 Kanten und 65.000 Knoten. Als Testrechner wurde eine SGI SC 900 XL mit 16 Prozessoren mit je 75 MHz und insgesamt 8 Gigabyte Hauptspeicher verwendet.

Es zeigt sich, dass die Leistung mit der Anzahl der Prozessoren steigt, dabei jedoch die Zuwachsrate sinkt. Diese Sättigungstendenz hängt mit der Kommunikation zwischen den Prozessoren zusammen, die mit zunehmender Anzahl immer aufwändiger und ineffizienter wird.

Abschließend lässt sich feststellen, dass durch die angewandten Verfahren zur Parallelisierung der Verkehrsflusssimulationen PLANSIM-T wesentliche Leistungssteigerungen erreicht werden können. Die erzielbare Steigerung ist dabei stark abhängig von der Struktur des zugrunde liegenden Straßennetzes. Insbesondere im Hinblick auf große Netze mit vielen Einzelfahrzeugen wurde die Einsatzfähigkeit der Software PLANSIM-T durch die Parallelisierung deutlich erweitert. Die Überlegungen der Arbeit lassen sich desweiteren auf andere Verkehrssimulationen übertragen, die objektorientiert konzipiert sind.

2.2 Anwendungsprojekte

3V – Verteilte Verkehrssimulation und Visualisierung

Das im August 1997 gestartete und inzwischen abgeschlossene Projekt Gigabit-Testbed West (GTB) wurde vom DFN eingeleitet und vom BMBF gefördert. Ziel dieses Projektes war die Erprobung und Untersuchung der Gigabit-Netztechnik, welche inzwischen vom DFN in Betrieb genommen wurde. Hierzu wurden verschiedene wissenschaftliche Anwendungen entwickelt, die sich die neue Netztechnik zu nutze machen sollten und sich ohne die im GTB vorhandene hohe Brandbreite nicht umsetzen ließen.

In dem von uns in Zusammenarbeit mit der GMD, dem DLR und der Firma echtzeit GmbH bearbeiteten Teilprojekt 3V, wurde die vom ZAIK entwickelte Simulationssoftware PLANSIM-T weiterentwickelt, um Möglichkeiten zu schaffen, die in Echtzeit errechneten Daten auf mehreren Rechnern, welche über das GTB miteinander verbunden sind, zu visualisieren. Dies war aufgrund des hohen Datenaufkommens der Mikrosimulation von etwa 400 Mbits/s bisher nicht möglich.

Durch die Trennung von Simulation und Visualisierung sowie der Option, verschiedene Visualisierungen an unterschiedlichen Arbeitsplätzen betreiben zu können, ergeben sich vielfältige neue Nutzungsmöglichkeiten. So sind von einer einfachen zweidimensionalen, über verschiedene wissenschaftliche Darstellung bis hin zur komplexen VR-Visualisierung verschiedene Darstellungsformen denkbar, von denen zwei innerhalb des Projektes realisiert wurden. Durch die Unabhängigkeit der Visualisierung von der Simulation lässt sich diese einfach auf die Bedürfnisse verschiedener Benutzergruppen zuschneiden. Heterogene Gruppen können räumlich voneinander getrennt durch die

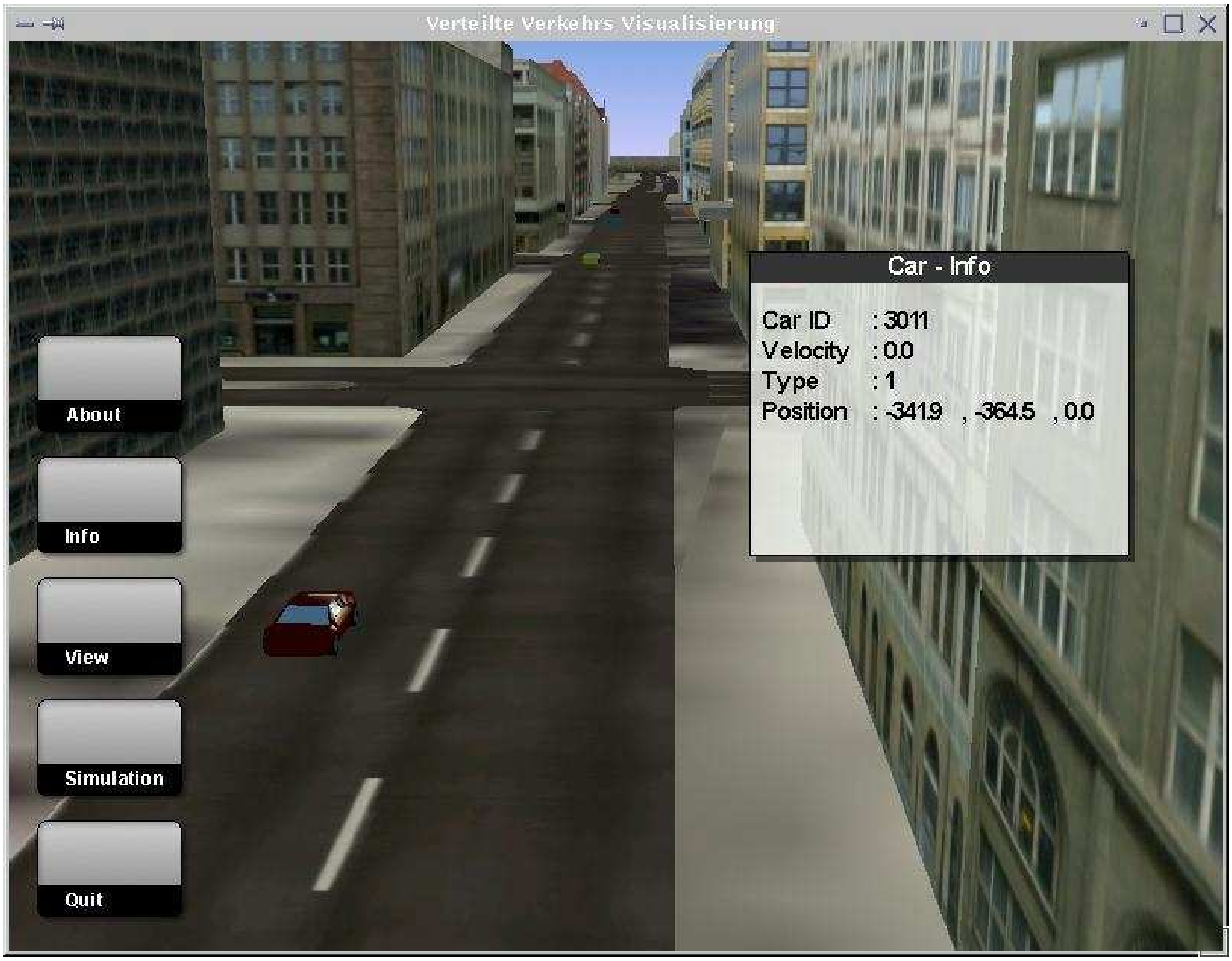

Abbildung 2.3: *3D-Visualisierung (echtzeit GmbH) der von* PLANSIM-T *erzeugten Daten.*

Nutzung der Datenübertragung im GTB zusammenarbeiten. Denkbar wäre die gemeinsame Erarbeitung und Bewertung von verkehrlichen Maßnahmen durch verschiedene Entscheidungsträger aus Politik, Stadtplanung und Wissenschaft, indem den Gruppen simultan, die aus der Simulation einmal erzeugten Informationen, benutzergerecht präsentiert werden.

Eine weitere wichtige Funktion, um die PLANSIM-T erweitert wurde, ist die Möglichkeit der Interaktion zwischen dem Anwender der Visualisierung und der Simulation. Mit Hilfe eines Rückkanals können verschiedene Befehle an die Simulation übermittelt werden, die dann sofort im aktuellen Simulationsprozess ausgeführt werden. Die Anwendungsbereiche dieser Option reichen von einer einfachen Aufforderung an die Simulation, Daten über das Netz zu verschicken, bis hin zu einem direkten Eingreifen in die Simulation und die Ausführung vorgefertigter Szenarien.

Die Übertragung der Daten über das GTB wird mit Hilfe der multicastfähigen Netzprotokolle IP-Multicast und ATM vorgenommen. Dadurch muss der Datenstrom nur ein einziges mal durch den Simulator erzeugt werden, und die Netzbelastung lässt sich so auch für mehrere angeschlossene Visualisierungen konstant halten. Während IP-Multicast sehr weit verbreitet und auf nahezu jedem modernen Rechner verfügbar ist, bietet ATM den Vorteil, eine gewisse Bandbreite für die Daten reservieren zu können. Es kann bei der Verwendung von ATM also gewährleistet werden, dass die gewünschten Daten auch rechtzeitig bei der Visualisierung ankommen. Für den Rückkanal wird zwischen jeder Visualisierung und der Simulation eine eigene TCP/IP-Verbindung hergestellt.

Zur Demonstration der erzielten Ergebnisse wurde ein Teil des Berliner Stadtkerns in ein Beispielszenario übernommen und simuliert. Die daraus gewonnenen Daten ließen sich auf verschiedenen über das Gigabit-Testbed West angeschlossenen Rechnern darstellen. Dies geschah mit Hilfe der im Rahmen des Projektes entwickelten wissenschaftlichen 2D-Visualisierung und der von der Firma echtzeit GmbH entwickelten 3D-Visualisierung (siehe Abbildung **??**).

Die Visualisierungen konnten sich zu jeder Zeit während des Simulationslaufes mit Hilfe des Rückkanals an die Simulation an- und wieder abmelden. Um die weiteren Fähigkeiten des Rückkanals aufzuzeigen, wurde ein Szenario erstellt, in dem die Sperrung einer Straße vom Anwender innerhalb der Visualisierung durchgeführt werden kann. Die Verkehrsströme zwischen den Quellen und Senken werden hierfür in Form einer Start/Zielmatrix vorgegeben und die Fahrzeuge suchen sich in Abhängigkeit vom momentanen Verkehrszustand den kürzesten Weg. Sperrt man nun während des Simulationslaufes die gewählte Straße, so kann man die Auswirkungen dieser Maßnahme direkt mit Hilfe der angeschlossenen Visualisierungen analysieren.

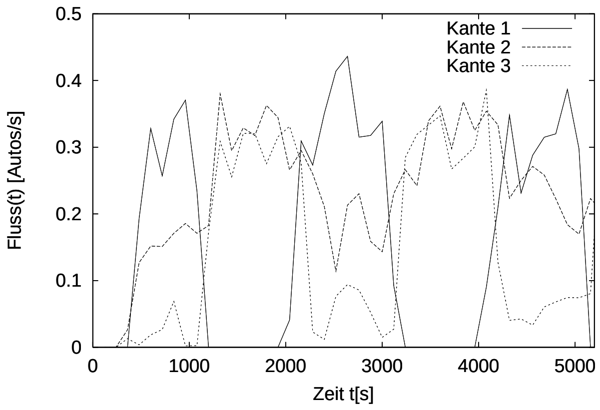

Abbildung 2.4: *Gemessener Fluss auf drei Kanten des Systems für das Beispielszenario „Straßensperrung“. Kante 1 wird zeitweise gesperrt, die anderen beiden stellen Ausweichstrecken dar.*

In einem Beispielszenario wurde eine Straße alle 1000 Zeitschritte für 500 Zeitschritte gesperrt. Abbildung **??** zeigt den zeitlichen Verlauf des Flusses auf drei Kanten des Systems. Kante 1 ist diejenige, die gesperrt wird. Die Kanten 2 und 3 liegen auf Alternativrouten der betrachteten Start/Ziel–Beziehung. Deutlich erkennt man den schnellen Abfall des Flusses während der Sperrzeiten, sowie die Verteilung des Verkehrs auf die Ausweichstrecken.

Es lassen sich leicht weitere Beispiele entwickeln, anhand deren man die Vorteile der Trennung zwischen Simulation und Visualisierung sowie des Rückkanals zeigen kann. Nicht zuletzt die Möglichkeit den Verlauf einer Simulation zwischendurch optisch kontrollieren zu können, ohne eine dauerhafte Visualisierung (welche die Simulationsgeschwindigkeit nur vermindern würde) zu betreiben, machen die im 3V-Projekt durchgeführten Arbeiten PLANSIM-T zu einem mächtigen Instrument zur Verkehrsflusssimulation.

Weitere Informationen über das Projekt 3V finden sich auch auf unseren Internetseiten.

Sonderforschungsbereich „Umweltprobleme eines industriellen Ballungsraumes“

Das ZAIK arbeitet im Sonderforschungsbereich 419 (SFB) mit dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln seit Anfang 1999 zusammen. Gegenstand der Untersuchungen in diesem Projekt sind die Entstehung, Ausbreitung und Transformation von Luftschadstoffen. Zusätzlich sollen hierbei auch klimatologische Fragestellungen berücksichtigt werden. Gesamtziel des SFB ist eine umfassende Untersuchung der Umweltproblematik – insbesondere der Verflechtungen zwischen den verschiedenen Problemkreisen Luft, Wasser, Boden. Auf der Basis von naturwissenschaftlichen und medizinischen Analysen, Simulationen und Prognosen unter Berücksichtigung von sozialen, ökonomischen und rechtlichen Aspekten soll diese zu Lösungsansätzen führen, Lebensqualität zu sichern, zu erhalten und zu verbessern. Mit den Untersuchungen zur Luftqualität trägt unser Projekt einen Teil zu dieser Gesamtsicht bei.

Die beiden Arbeitsgruppen haben bereits erfolgreich im 1998 ausgelaufenen Forschungsverbund „Verkehrssimulation und Umweltwirkungen“ kooperiert. Die im Bereich der Verkehrssimulation zur Untersuchung der Fragestellung verwendeten Modelle und Softwaretools basieren auf Forschungsergebnissen, die im Rahmen des Forschungsverbundes erzielt wurden. Dabei handelt es sich um Modelle zur dynamischen Routenumlegung und der mikroskopischen Simulation von Straßenverkehr. Diese werden im Rahmen des SFB-Projektes methodisch erweitert und ausgebaut.

Grundlage der in Abbildung **??** dargestellten Modellkette zur Simulation von Luftschadstoffen sind neben Emissionskatastern für Haus- und Industriebrand zeitlich und

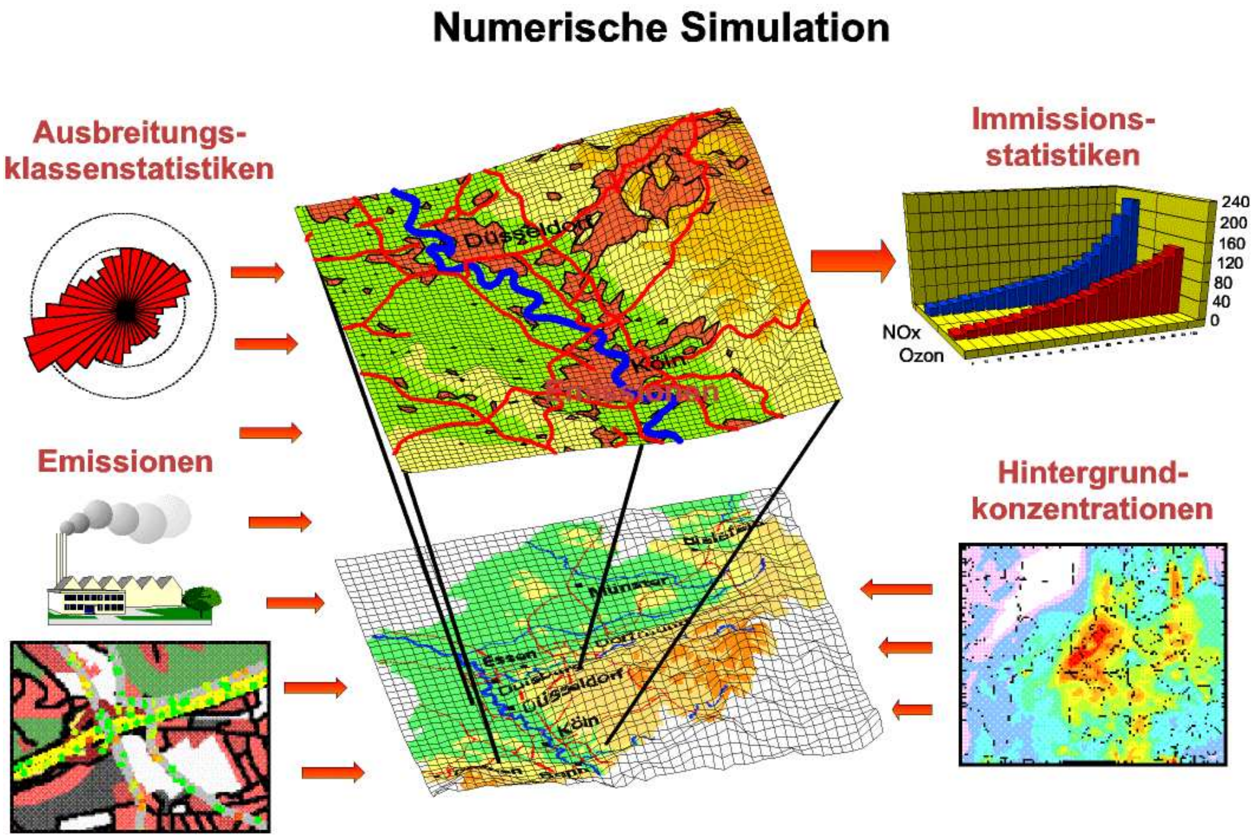

Abbildung 2.5: *Modellkette des SFB 419 - Teilprojekt B3. Auf der Basis von Emissionskatastern von Industrie und Verkehr wird mit Hilfe hochauflösender meteorologischer Modelle die Ausbreitung und chemische Transformation der Schadstoffe (Immission) berechnet.*

räumlich hochaufgelöste Kataster der Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs, die mit Hilfe der in unserer Arbeitsgruppe entwickelten Modelle berechnet werden. Neben der naheliegenden Feststellung, dass in der Regel eine Erhöhung der Auflösung die Qualität der Ergebnisse verbessert, ist eine hohe Auflösung der Dynamik des des Straßenverkehrs für die Berechnung der Emissionen von prinzipieller Bedeutung. Die in einem Bereich des Straßennetzes emittierten Schadstoffe hängen nicht allein von der mittleren Verkehrsbelastung, sondern vielmehr von deren zeitlichen Entwicklung bis hin zur Einzelfahrzeugdynamik ab (s.a. Abbildung **??**). Eine hohe räumliche Auflösung der berechneten Schadstoffkataster ist darüber hinaus notwendig, um geeignete Datenbasen für weitere Arbeitsgruppen des SFB zur Verfügung stellen zu können.

Die bisher im Rahmen des SFB 419 durchgeführten Arbeiten unserer Arbeitsgruppe konzentrierten sich stark auf die Generierung der Verkehrsnachfrage und die Kopplung der drei Komponenten der Modellkette, sowie die Erstellung des zur Simulation notwendigen Verkehrsnetzes. Durch die Bereitstellung eines umfangreichen Datensatzes der GIS-Consult GmbH (Haltern) konnte das gesamte Straßennetz von NRW für die Simulation des Verkehrsgeschehens abgebildet werden. Die Detaillierung der Netzdaten reicht hierbei bist auf Kreisstraßenniveau. Aufgrund der momentan zur Verfügung stehenden Daten über die Verkehrsnachfrage und der großen Skala, auf der die Emissionen des Verkehrs berechnet werden sollen, stellt dies zunächst auch die anvisierte Auflösung der Verkehrsabläufe dar. Aus der Zusammenarbeit mit der GIS-Consult GmbH sind zwei Diplomarbeiten im Bereich der Geowissenschaften entstanden, die die Darstellung dynamischer Verkehrsdaten, wie sie z.B. aus Simulationsläufen stammen können, in einer auf Smallworld basierenden Applikation (NWSIB – Straßeninformationsdatenbank Nordrhein-Westfalen) ermöglichen.

Grundlage jeder Verkehrssimulation ist die Kenntnis über die Verkehrsnachfrage. Flächendeckende Informationen sind in der Regel nicht verfügbar und liegen meist – wenn überhaupt – in einer stark aggregierten Form vor. Um die

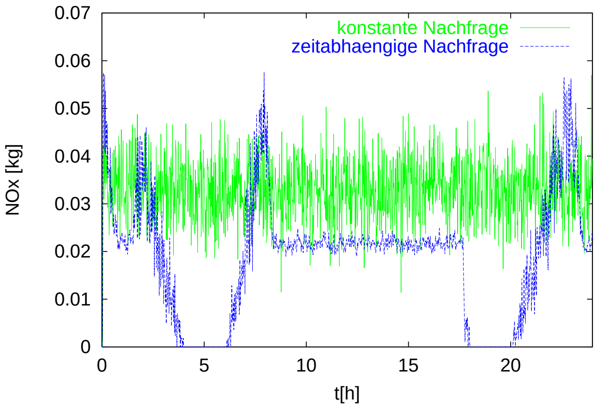

Abbildung 2.6: *Vergleich der NO_x Emission auf einer Straßenkante für konstante und zeitabhängige (zwei rush-hour Peaks) Nachfrage. Nicht nur die zeitliche Verteilung des Schadstoffs unterscheidet sich, sondern auch die Gesamtemission ist im Falle konstanter Nachfrage ca. doppelt so hoch wie bei der zeitabhängigen (trotz gleicher Anzahl von Emittenden).*

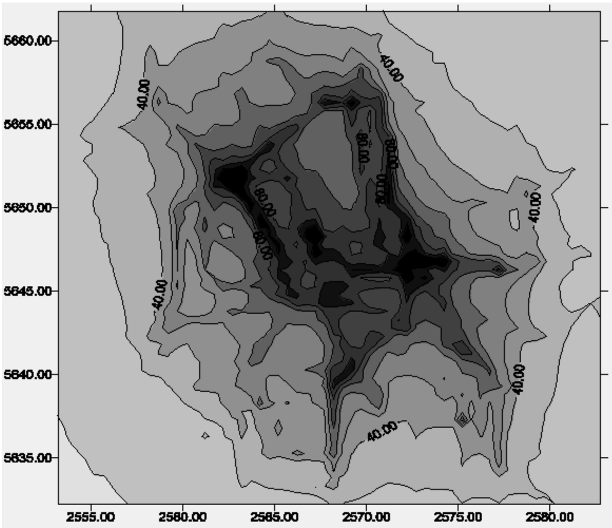

Abbildung 2.7: *Mittlere NO_x Immission für die Umgebung von Köln. Simulation des Instituts für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln aus Emissionsdaten basierend auf der im Text beschriebenen vereinfachten Nachfrageberechnung.*

Modellkette innerhalb der Verkehrssimulation, d.h. dynamische Routenumlegung und Simulation der Einzelfahrzeugdynamik, weiterentwickeln zu können und möglichst schnell ein zeitlich hochaufgelöstes Emissionskataster für die Modelle der Meteorologen zur Verfügung zu stellen, wurde in einem ersten Schritt allein aufgrund der Bevölkerungszahlen der Gemeinden eine Verkehrsnachfrage um Köln abgeschätzt. In dem gewählten Ansatz fließen neben den Einwohnerzahlen die durch die Infrastruktur vorgegebenen Erreichbarkeiten zwischen den Gemeinden mit in die Verteilung der Fahrten ein. Basierend auf dieser Nachfrage wurde die in Abbildung **??** dargestellte NO_x Immission für Köln und Umgebung berechnet.

Nachdem eine Großzahl der technischen Probleme zur Umsetzung der Modellkette, wie die Kopplung der einzelnen Komponenten, inzwischen gelöst wurden, sind die Arbeiten momentan auf die Modellierung der Verkehrsnachfrage als Grundlage einer wirklichkeitsnahen Berechnung der Emissionen ausgerichtet. Als Datenbasis dienen hierbei die Verkehrsströme zwischen Landkreisen. In den vorliegenden Daten sind diese differenziert nach sechs Fahrtzwecken, wie Arbeit, Ausbildung oder Freizeit, enthalten. Mittels eines Gravitationsansatzes werden die Fahrten über ein iteratives proportionales Fitting auf Gemeinden verteilt, wobei deren Einwohnerzahl und die Verteilung der Reisezeiten zwischen den Gemeinden mitberücksichtigt werden. Die Dynamisierung der Fahrten geschieht anhand von Verteilungen der Abfahrtszeiten, die aus Vorarbeiten eines anderen Projekts unserer Arbeitsgruppe gewonnen werden konnten. Das Verfahren wird zur Zeit für Fahrten des Berufsverkehrs getestet und soll anhand von Werten des durchschnittlichen Tagesverkehrs aus Studien des Umweltamtes der Stadt Köln validiert werden.

SimVV – Mobilität verstehen und lenken

In Zusammenarbeit mit dem ISB Aachen, dem DLR und dem Wuppertal Institut startete im Januar 2000 das vom Ministerium für Schule, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MSWF) geförderte Projekt SimVV, welches bis zum Ende des Jahres 2001 läuft. In diesem Projekt soll eine Modellkette entwickelt werden, die es ermöglicht, die Einwohner einer Stadt, sowie den Entwurf und die Durchführung der Tagespläne einzelner Personen zu simulieren. Die Notwendigkeit eines solchen Ansatzes liegt in der Tatsache begründet, dass bei der Berechnung der Verkehrsnachfrage bisher weitgehend auf die Modellierung der mobilitätsbestimmenden Faktoren und deren Wechselwirkungen verzichtet wurde. Aus diesem Grund lassen sich viele Fragen nach dem Verkehrsaufkommen und Möglichkeiten dieses zu beeinflussen nicht oder nur unzureichend beantworten. Um die Ursachen von Mobilität zu erforschen und quantitative Schlussfolgerungen und Prognosen zu ermöglichen, müssten deshalb idealerweise die Entscheidungsprozesse von Einzelpersonen modelliert werden. In dem Projekt SimVV soll ein erster Schritt in diese Richtung unternommen werden.

Hierzu werden zunächst schon vorhandene Modelle zur Verkehrsnachfrageberechnung, der Aktivitätenmodellierung und Modelle der mikroskopischen Verkehrsfluss–Simulation verfeinert und in ein Gesamtwerkzeug integriert. Mit diesem soll die Machbarkeit, Mobilitätsursachen durch ein solches Vorgehen modellieren zu können, an einem konkreten Beispiel geprüft werden.

Die konzeptionellen Arbeiten an der Methodik zum Ablauf der Simulation sind inzwischen weitestgehend abgeschlossen, so dass jetzt mit der software–technischen Umsetzung begonnen wird. Im Folgenden wird das bisher erarbeitete Schema des Simulationsablaufes vorgestellt, s.a. Abbildung **??**.

In einem ersten Schritt wird aus soziodemographischen Daten eine synthetische Bevölkerung generiert. Jede Person dieser Bevölkerung bekommt eine Auswahl von Aktivitäten mit Prioritäten, Dauer, möglichen Zeiten und Orten, sowie weitere Informationen zugewiesen. Im Rahmen des Modellierungsansatzes wählt der Akteur seine Handlungen aus den gegebenen Möglichkeiten aus und stellt aus diesen Aktivitäten einen Tagesplan zusammen. Hierbei werden persönliche und haushaltsspezifische Rahmenbedingungen wie verfügbares Geld, nutzbare Verkehrsmittel und Vorlieben in der Verkehrsmittelwahl berücksichtigt.

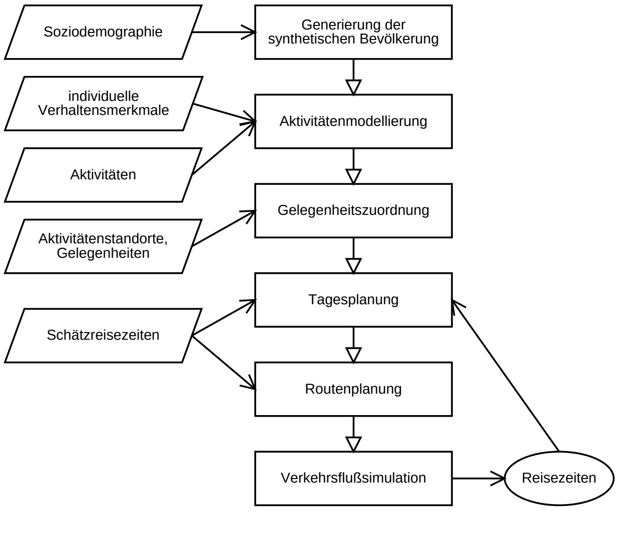

Abbildung 2.8: *Gesamtkonzept SimVV*

Ganz wesentlich für die Planung sind insbesondere die von den Akteuren für die Durchführung der Aktivitäten erwarteten Reisezeiten zwischen den einzelnen Gelegenheitsstandorten. Nachdem jeder Akteur seinen individuellen Tagesablauf geplant hat, werden die Pläne aller Akteure simultan im Verkehrsnetz durchgeführt. Hierbei wird das in der Arbeitsgruppe entwickelte Modell zur dynamischen Verkehrsumlegung eingesetzt. Die in der Simulation ermittelten Reisezeiten stellen eine wesentliche Information innerhalb der Modellkette dar, die im Rahmen der Modellierung allen Akteuren zugänglich ist. Diese Erfahrungen über die Reisezeiten im Verkehrsnetz nutzen diese dazu, die Tagespäne anhand ihrer Erfüllbarkeit zu bewerten und neue Pläne zu generieren. Dieser Iterationsprozess wird solange fortgesetzt, bis das System in einen Gleichgewichtszustand läuft. Hinter diesem Vorgehen steht die Annahme, dass die beobachteten Mobilitätsmuster das Ergebnis solcher individuellen Lernprozesse sind.

Neuartig an dem hier skizzierten Modellablauf ist die Verknüpfung der aktivitätenbasierten, einzelpersonenbezogenen Verkehrsnachfrageberechnung mit der dynamischen Simulation der Bewegungsmuster von Menschen. So entsteht ein Instrumentarium, das zu quantitativen Aussagen über die Wirkungen und Wirksamkeit von mobilitätslenkenden Maßnahmen befähigt.

Ausgehend von der Arbeiten und Erfahrungen aus diesem Projekt sind eine Reihe von weitreichenden Erweiterungen unserer Modelle geplant. Insbesondere soll in der Zukunft intermodales Verhalten, d.h. die Benutzung mehrerer Verkehrsmittel, in den Modellen abgebildet werden. Die zum Individualverkehr alternativen Verkehrsmittel wie Bus und Bahn, Taxen, Mitfahrgelegenheiten spielen eine wichtige Rolle bei der Untersuchung des Mobilitätsverhaltens von Personen. Desweiteren gilt es einen Weg zu finden, wie Personenwirtschafts–, Durchgangs– und Fernverkehre mit in die Modellierung einfließen können, da diese nicht als Akteure in der Tagesplangenerierung auftauchen.

2.3 Simulation von Bahnanlagen

Ausbaumaßnahmen innnerhalb von bestehenden Bahnanlagen stellen ein komplexes Planungsproblem dar. So sollte in einem gemeinsamen Projekt mit dem Ingenieurbüro K+V GmbH (Greven) die Frage untersucht werden, inwieweit die Errichtung einer Instandsetzungs- und Wartungsanlage den bisherigen Zugbetrieb innerhalb eines Bahnhofes beeinträchtigt, bzw. inwiefern die Betriebsabläufe trotz der damit verbundenen Kapazitätsverringerung der verfügbaren Gleise durch einfache Modifikationen aufrechterhalten werden könnten. Wichtig ist diese Fragestellung zum einen, da der betrachtete Bahnhof aufgrund hoher Verkehrsnachfrage insbesondere zu Ferienzeiten stark ausgelastet ist. Zum anderen müssen die im laufenden Betrieb ständig anfallenden Instandhaltungsmaßnahmen ausserhalb der Anlage durchgeführt werden, was zu zusätzlichen Fahrten und damit Kosten führt. Die Errichtung einer solchen Anlage innerhalb des Bahnhofsbereiches kann daher wesentliche Vorteile mit sich bringen.

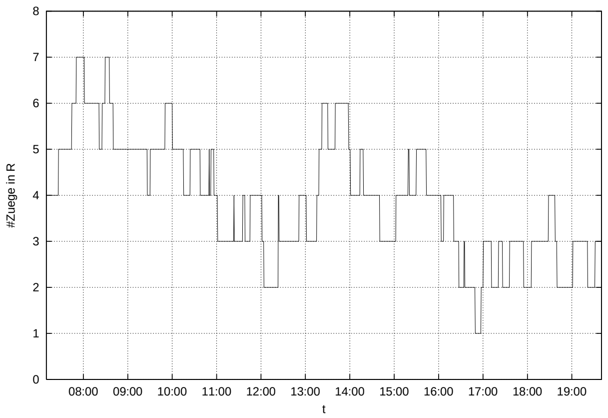

Abbildung 2.9: *Zeitabhängige Auslastung eines Moduls mit maximaler Kapazität 8.*

Zur Beantwortung dieser Frage wurde ein Simulator erstellt. In dem hierfür entwickelten Modell wird die Gleisanlage in Abschnitte, Module, zerlegt, die im wesentlichen durch ihre Kapazitäten charakterisiert werden. Die Züge werden anhand ihrer vorgegebenen Fahrpläne durch diese Module bewegt. Dabei agieren die Module über einen Satz von Regeln miteinander, die steuern, ob Züge das jeweilige Modul verlassen dürfen oder nicht. Sie garantieren damit zum einen, dass die Kapazitäten der Module nicht überschritten werden. Zum anderen werden so Kollisionen zwischen Zügen und artifizielle Blockadesitutionen ausgeschlossen. Desweiteren ist es innerhalb des Modells möglich, wichtige Betriebsabläufe wie Blockabstände, Freimeldezeiten sowie das Koppeln und Entkoppeln von Zügen abzubilden.

Neben der Modularisierung der Anlage mit ihrem Regelwerk bildet der aktuelle Fahrplan die Basis der Simulation. Er stellt eine fahrbare, da bereits praktizierte Lösung in der Ausgangssituation dar und soll durch die Kapazitätsveränderung möglichst wenig beeinträchtigt werden, da der Fahrplan in überregionalem Zusammenhang gesehen werden muß. Der Fahrplan ist im Modell allerdings nicht starr vorgegeben, sondern es werden lediglich Ankunfts- und Abfahrtzeit an den Bahnsteigen fest kodiert. Für die weitere Bewegung durch die Anlage sind Mindestverweildauern und frühstmögliche Abfahrtszeiten festlegbar, die notwendige Fahrtzeiten und Servicezeiten garantieren. Unter Berücksichtigung der Vorgaben werden die Züge innerhalb des Modells durch die Anlage bewegt und notwendige Verschiebungen in den Plänen vorgenommen.

Die Ausgabe des Modells besteht aus den realisierten Umläufen der Züge durch die modularisierte Anlage sowie der Belegung der einzelnen Bereiche im Verlauf der Simulation (Abbildung **??**). Die realisierten Umläufe werden tabellarisch den ursprünglichen Fahrplänen gegenübergestellt und aufgetretene Abweichungen kenntlich gemacht. So ist es zum einen für jeden Zeitpunkt möglich, ein aktuelles Bild der gesamten Anlage zu erhalten. Zum anderen ist unmittelbar ersichtlich, inwieweit die vorgegebenen Fahrpläne eingehalten werden können und an welchen Stellen Veränderungen im Betriebsablauf notwendig sind. Insofern Kapazitätsrestriktionen keine umfassende Umgestaltung der Betriebsabläufe notwendig machen, stellt der realisierte Fahrplan eine mögliche Lösung dar, die nahe am ursprünglichen Umlaufplan der Züge liegt. Durch die flexible Gestaltung der Eingabe können ohne großen Aufwand verschiedene Szenarien durchgespielt werden, um geplante Maßnahmen zu bewerten.

Mit Hilfe des Modells und des entwickelten Softwaretools konnte in dem gemeinsamen Projekt mit der K+V GmbH gezeigt werden, dass bei den vorliegenden betrieblichen Abläufen innerhalb des untersuchten Bahnhofs, die Errichtung der vorgesehenen Wartungsanlage nicht realisierbar ist. Die hierfür entwickelte Methode ist gut auf andere Fragestellungen dieser Art übertragbar und kann als Grundlage für weitere Optimierungsansätze dienen.

Kontakt: `traffic@zpr.uni-koeln.de`