Optimale Routenführung von Fahrzeugen

In den Stau geleitet?

Wenn Sie heute ein Auto kaufen würden, hätten Sie wahrscheinlich die Möglichkeit, ein sogenanntes Navigations- oder Route guidance-System gleich mit zu erwerben. Der Verkäufer schildert Ihnen sicher gerne die Fähigkeiten des Systems, das Sie nach Eingabe Ihres Ziels, etwa durch Straße und Hausnummer, mittels optischer und akustischer Anweisungen dorthin lotst. Eventuell stellt er auch heraus, daß das Gerät per Funk mit aktuellen Verkehrsinformationen versorgt wird, so daß es eine Route vorbei an Straßensperrungen und Staus berechnen kann. Er wird Ihnen nicht vorenthalten wollen, daß diese Technologie Ihre Fahrzeiten signifikant senken kann, womit das Straßennetz entlastet und die Umwelt geschont wird.

Was der Verkäufer nicht sagt, ist, daß diese positiven Effekte verloren gehen, sobald sehr viele Autofahrer in Ihrer Stadt solch ein Route guidance-System benutzen.

Das Problem

Route guidance, also die Routenempfehlung durch einen Rechner, wird allgemein als ein Mittel angesehen, Verkehr effizienter über das Straßennetz zu leiten. Es ist bekannt, daß Menschen durch ungünstige Routenwahl 6–19% zu lange Wege zurücklegen, wodurch das Straßennetz unnötig belastet wird. Man hofft daher, daß durch ein weit verbreitetes Route guidance-System die Straßenbelastung gesenkt wird, womit die vorhandenen Straßen effektiv mehr Verkehr aufnehmen können.

Allerdings zeigen verschiedene Simulationen, daß zwar mit der anfänglichen Verbreitung von Route guidance-Systemen die Straßenbelastung sinken kann, sie jedoch wieder ansteigen wird, wenn der prozentuale Anteil damit ausgestatteter Fahrzeuge einen bestimmten Wert überschritten hat. Auch ist es möglich, daß dann mit Route guidance ausgestattete Fahrzeuge sogar im Schnitt *länger* fahren als Fahrzeuge ohne ein solches System.

Fahrzeuge kennen ihre Position und haben Verbindung zum Zentralcomputer.

Dieses Phänomen ist wenig verwunderlich, da heutige Route guidance-Systeme jedes Fahrzeug individuell zu seinem Ziel leiten und dabei nicht die Auswirkungen ihrer eigenen Routenempfehlung auf die Straßenbelastung berücksichtigen. Durch diesen konzeptuellen Nachteil kann es vorkommen, daß – bei entsprechender Verbreitung eines solchen Systems – zu viele Fahrzeuge über eine bestimmte Straße geschickt werden und so einen Stau erst bewirken.

Um diesen negativen Effekt zu vermeiden, sollte ein Routingverfahren explizit über seine Zielfunktion auf eine Senkung der Straßenbelastung abzielen. Allerdings besteht bei einem naiven Ansatz die Gefahr, daß einzelne Autofahrer über sehr große Umwege geleitet werden, damit viele andere Fahrer einen günstigeren kurzen Weg nehmen können. Damit wäre jedoch die Akzeptanz eines solchen Systems stark gefährdet, da jeder Benutzer stets befürchten müßte, auf einen übermäßig langen Weg gelotst zu werden.

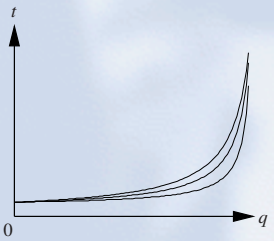
Es ist also ein System gesucht, das die Straßenbelastung möglich stark reduziert, ohne jedoch einzelne Fahrer auf übergroße Umwege zu schicken. Da viele Routenempfehlungen miteinander koordiniert werden müssen, ist es notwendig, die Routen durch eine Zentrale, etwa pro Ballungsraum, zu berechnen.

Wir haben einen Algorithmus entwickelt, mit dem sich in einem vereinfachten Modell Routen berechnen lassen, wobei die Straßenbelastung minimiert wird unter der Voraussetzung, daß kein Fahrzeug zu weit fahren darf.

Das Modell

In einem ersten Projekt mit der DaimlerChrysler AG haben wir ein Modell angewandt, bei dem der Verkehr in einer statischen Formulierung untersucht wird. Das bedeutet, daß statt einzelner Fahrzeuge abstrakte Flüsse von Fahrzeugen betrachtet werden. Eine solche Vereinfachung ist für Verkehrspitzenzeiten zulässig.

Das Straßennetz wird mathematisch als ein gerichteter Graph modelliert, bei dem Kanten Straßen(abschnitten) entsprechen, die mit Attributen wie Länge, Kapazität und Fahrzeit in Abhängigkeit von der Belastung versehen sind. Die Fahrtwünsche sind Paare von Knoten in diesem Graphen mit der gewünschten Flußmenge, d. h. Fahrzeuge pro Zeiteinheit, die von Start- zum Zielknoten geleitet werden soll.



Typische Kurven der Abhängigkeit der Fahrzeit vom Fluß auf einer Kante.

Damit kein Fahrzeug zu weit fahren muß, wird für jeden Fahrtwunsch eine maximale geographische Weglänge vorgegeben, die noch für den Benutzer „akzeptabel“ ist.

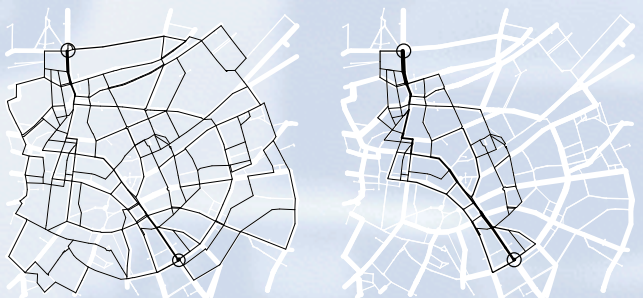
Die Ziele

Es ist die Gesamtbelastung des Straßennetzes zu minimieren, jedoch unter der Einschränkung, daß kein Fahrzeug zu weit fahren darf.

Mathematisch bedeutet das: Gesucht sind für jeden Fahrtwunsch ein oder mehrere Wege, über die der geforderte Fluß geleitet werden kann, so daß

- die Summe aller Fahrzeiten gewichtet mit dem jeweiligen Fluß (ein Maß für die Netzbelastung) minimal ist,
- keine Straßenkapazität überschritten wird und
- keine Längenbeschränkung verletzt ist.

Wegen der Abhängigkeiten der Fahrzeit von Fluß liegt ein nichtlineares Minimierungsproblem vor. Es läßt sich zeigen, daß dieses Problem zu der Klasse sogenannten NP-schweren Probleme gehört.



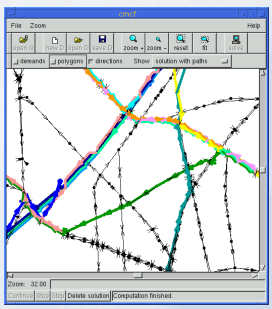
Fluß mit minimalen Gesamtkosten zwischen zwei Knoten (markiert) ohne Beschränkung der geographischen Länge (links) und mit Beschränkung (rechts).

Die Methoden

Instanzen dieses Routingproblems lassen sich durch geschickte Verknüpfung angepaßter Algorithmen aus der nichtlinearen, linearen und kombinatorischen Optimierung lösen.

Für das eigentliche nichtlineare Problem verwenden wir den Convex Combinations-Algorithmus aus der Klasse der Abstiegsverfahren. Die verwendete Problemformulierung sieht für jeden möglichen Weg jedes Fahrwunschs eine Variable vor. Wegen der sehr großen Anzahl Wege in einem Graphen werden jedoch nicht alle Variablen gleichzeitig im Speicher gehalten, sondern nur eine kleine Teilmenge. Durch Column Generation erzeugen wir neue Variablen erst dann, wenn sie betrachtet werden müssen.

In jeder Iteration wird bei diesem Verfahren zum Bestimmen der zulässigen Richtung eine Variante des Routingproblems gelöst, bei der alle Kantenfahrzeiten *konstant* sind. Dieses vereinfachte Problem – es ist weiterhin NP-schwer – hat eine große Ähnlichkeit mit einem Lineares Programm, versehen jedoch mit der zusätzlichen Längenbeschränkung an die befahrenen Wege. Zu seiner Lösung verwenden wir den Simplexalgorithmus mit Column Generation, bei dem zum Bestimmen der sogenannten reduzierten Kosten ein weiteres Unterproblem auftritt: das Constrained Shortest Path Problem. Bei diesem wird in einem Graphen ein kürzester Weg unter einer Längenbeschränkung bezüglich einer zweiten Kantenbewertung gesucht. Für dieses Problem setzen wir einen schnellen Labelling-Algorithmus ein.



Unser algorithmischer Ansatz ist modular, da er durch Austausch von Routinen leicht an andere Bedingungen an die zu berechnenden Wege angepaßt werden kann. So ist es z. B. denkbar, die Anzahl der Abbiegevorgänge zu beschränken oder bestimmte Straßenklassen zu bevorzugen.

Weitere Forschung wird das Modell der statischen Flüsse verlassen und den völlig dynamischen Fall betrachten.

Kooperationspartner und Mitarbeiter

Das Projekt wird gefördert durch die DaimlerChrysler AG, Berlin.

Die beteiligten Wissenschaftler und studentischen Mitarbeiter an der TU Berlin sind:

Olaf Jahn
Rolf H. Möhring
Andreas S. Schulz

Weitere Informationen unter:
`http://www.math.tu-berlin.de/coga/research/route_guidance/`