

Zuverlässige Dynamische Zielführung

Ioannis Kaparias, Michael G.H. Bell, Heidrun Belzner,
Axel Leonhardt und Klaus Bogenberger

Verfasserschriften:

Dr. I. Kaparias,
ik00@imperial.ac.uk,
Univ.-Prof. Dr. M.G.H. Bell,
mghbell@imperial.ac.uk,
Centre for Transport Studies,
Imperial College London,
Skempton Building,
London SW7 2BU, GB;
Dr. H. Belzner,
Heidrun.Belzner@bmw.de,
Verkehrstechnik und
-management, BMW Group,
80788 München;
Dr. A. Leonhardt,
axel.leonhardt@vt.bv.tum.de,
Lehrstuhl für Verkehrstechnik,
Technische Universität
München, Arcisstraße 21,
80333 München;
Dr. K. Bogenberger,
Bogenberger@transver.de,
TRANSVER GmbH;
Maximilianstraße 45,
80538 München

Es wurde ein neues Zielführungsverfahren entwickelt, das bei der Alternativroutenermittlung nicht wie die bisher hauptsächlich eingesetzten Verfahren den kürzesten (zeitlich oder räumlich) Weg berechnet, sondern auch die Reisezeitzuverlässigkeit der Route bzw. der gewählten Straßenabschnitte berücksichtigt. Das Verfahren basiert auf einem zeitabhängigen A*-Algorithmus und auf einem neuen Konzept der Reisezeitzuverlässigkeit. Durch die systematische Beeinflussung der Routenberechnung mittels virtueller Reisezeiterhöhung einzelner Straßenabschnitte wird eine Vermeidung von evtl. gestauten Straßenabschnitten erreicht. Mittels der Einführung von nutzerorientierten Nebenbedingungen wird eine hohe Kundenakzeptanz der ermittelten Routen gewährleistet. Das Verfahren wurde in einem Simulationsexperiment auf das Münchener Straßennetz angewandt, die Ergebnisse werden ausführlich dargestellt und diskutiert.

A new route guidance method is developed in this paper, whose objective it is to consider travel time reliability when computing a set of alternative routes, as opposed to existing methods that only compute the shortest or the fastest route. The method is based on the time-dependent A* algorithm and on a new concept of reliability. The systematic control of the route computation procedure through the virtual increase of the travel time of specific road sections enables the avoidance of potentially congested roads, while the introduction of constraints ensures the user acceptance of the route guidance provided. The model is firstly described and subsequently adapted to the properties of real road networks. The method is then applied to part of Munich's road network through a simulation experiment and the results are reported and evaluated.

1 Einführung

Navigationsgeräte sind mittlerweile ein fast selbstverständlicher Teil des mobilen Lebens und stellen neben dem Verkehrsfunk die wichtigste Informationsquelle im Fahrzeug dar. Vor allem in den letzten Jahren sind neben den fest installierten Geräten auch mobile Navigationsgeräte zu günstigen Preisen am Markt erhältlich. Prognosen zeigen, dass in wenigen Jahren ein großer Teil der Fahrzeuge mit einem Navigationsgerät ausgestattet sein wird.

Ziel der reinen Zielführungsfunktion eines Navigationsgerätes ist es, vom aktuellen, meist durch Satellitenortung errechneten, Standpunkt des Fahrzeugs entweder die zeitlich schnellste oder räumlich kürzeste Route zum eingegebenen Bestimmungsort zu finden. Neben der reinen Zielführungsfunktion, die vor allem dem Fahrer in einer ihm unbekannteren oder unvertrauten Umgebung hilft, gewinnt die sogenannte „dynamische Zielführung“ immer mehr an Bedeutung. Dabei werden aktuelle Verkehrsinformationen, z. B. per TMC, bei der Routenberechnung berücksichtigt.

Durch die Hinzunahme der Reisezeitzuverlässigkeit als weiteres Optimierungskriterium, kann von „zuverlässiger dynamischer

Zielführung“ gesprochen werden. Diese könnte in zwei Formen angeboten werden: „fahrzeugautonome zuverlässige dynamische Zielführung“ und „zentralenbasierte zuverlässige dynamische Zielführung“. Bei der fahrzeugautonomen Variante wird eine Routenberechnung mittels vorgegebener Reisezeit-Schätzwerte einzelner Straßenabschnitte durchgeführt. Die geschätzten Reisezeiten werden durch Verkehrsinformationen über aktuelle Verkehrereignisse, die z. B. über RDS/TMC an das Fahrzeug gesendet werden, ergänzt. Vorgegebene Reisezeitprofile sind zusammen mit der Karte auf einer DVD-ROM oder auf einer Bordfestplatte gespeichert und die gesamte Routenberechnung findet im Bordgerät selbst statt. Im Gegensatz dazu findet beim zentralenbasierten Ansatz die Routenberechnung z. B. in einem Verkehrsinformationszentrum statt und die berechneten Routen werden an das Fahrzeug gesendet, z. B. mittels des „Wegepunktverfahrens“ aus den BMBF/BMWi-Forschungsprojekten INVENT und AKTIV (www.invent-online.de/ www.aktiv-online.org).

Nachfolgend wird der fahrzeugautonome Ansatz zur zuverlässigen dynamischen Zielführung vertieft, da dieser aktuell am Markt weiter verbreitet ist. Die Be-

rechungsgrundlage (Position im Netz, Verkehrssituation) ist ein dynamischer Prozess und zu lange Berechnungszeiten können zu einem enormen Verlust der Nutzerakzeptanz führen. Leider ist die Echtzeit-Routensuche ein rechenintensiver Vorgang und die Rechenleistung der Geräte häufig begrenzt. Zielführungsalgorithmen sollten deshalb möglichst effizient sein.

Nachfolgend wird ein neues effizientes Verfahren zur zuverlässigen dynamischen Zielführung, das auf dem A*-Algorithmus (Hart et al. 1968) und einem neuen Konzept der Reisezeitzuverlässigkeit (Kaparias et al. 2008) basiert, beschrieben. Vorberechnete Ergebnisse werden intelligent wiederverwendet, sodass dadurch die Berechnungszeit minimiert wird. Mittels ARIAdNE (Kaparias et al. 2007b), einer speziell entwickelten Software, wird ein Simulationsexperiment auf dem Münchener Straßennetz durchgeführt und die Ergebnisse werden anschließend ausführlich vorgestellt und bewertet.

2 Grundlagen

Der zeitabhängige A*-Algorithmus

Die Suche nach dem kürzesten Weg in einem Netz ist ein häufig auftretendes und

vielfach untersuchtes Problem in der Verkehrsplanung und der Verkehrstechnik. Da Straßennetze i. d. R. relativ groß sind, also viele Knoten und Kanten besitzen, muss der verwendete Algorithmus so effizient wie möglich sein.

Es sollte hier beachtet werden, dass sich der Begriff „kürzester Weg“ nicht unbedingt auf den geometrisch kürzesten Weg bezieht, sondern auf die Größe, die optimiert werden soll. Im Fall der Zielführung ist oft der zeitlich-schnellste Weg von größerer Bedeutung als der Entfernungskürzeste Weg. Die zu optimierende Größe ist in diesem Fall die Reisezeit.

Es existiert bereits eine große Anzahl von Kürzestwegverfahren zwischen zwei Punkten in einem Netz, eine ausführlich Darstellung und Bewertung beinhaltet z. B. Ahuja et al. (Ahuja et al. 1993). Der effizienteste Algorithmus zur Lösung des Problems ist der A*-Algorithmus (Hart et al. 1968). Der Vorteil des A*-Algorithmus, im Vergleich zu anderen Kürzestwegalgorithmen wie z. B. dem Algorithmus von Dijkstra (Dijkstra 1959), ist seine Recheneffizienz. Diese wird durch die Umformung der uninfor-

mierten Suche zu einer informierten Suche erreicht. Die Umformung geschieht mittels einer Heuristik, die die Rest-Entfernung eines beliebigen Knotens zum Zielknoten im Netz schätzt. Meist wird als Rest-Entfernung der euklidische Abstand als der minimal mögliche Abstand genutzt. Der kürzeste Weg wird immer dann gefunden, wenn die Heuristik die tatsächliche Entfernung nicht überschätzt. Die Anzahl der untersuchten Knoten wird durch die Heuristik im Vergleich zur uninformierten Suche in der Regel deutlich reduziert.

Mittels eines kantenbasierten Suchverfahrens anstatt der konventionellen knotenbasierten Methode wird es möglich, Routen auf realen Straßennetzen, die besondere Eigenschaften besitzen (z. B. Abbiegeverbote, Sackgassen und Einbahnstraßen), zu suchen. Ein effizientes Verfahren zur Behandlung von Straßennetzen wurde von Kaparias et al. (Kaparias et al. 2007a) entwickelt. Demnach sind Kanten in zwei Teile geteilt (Ein- und Ausfahrtsteil), die vom Algorithmus als einzelne Kanten behandelt werden. Die Kanten stehen durch sogenannte Knotenabbiegemanöver in Verbin-

dung, sodass die Ausfahrt einer Kante mit der Einfahrt jeder anschließenden Kante durch ein entsprechendes Knotenabbiegemanöver verkoppelt wird. Dieses Verfahren berücksichtigt auch die Zeitabhängigkeit der Reisezeit durch die Einführung einer modifizierten Version des sog. „Flow-Speed-Model“-Verfahrens, das von Sung et al. (Sung et al. 2000) entwickelt und von Chen et al. (Chen et al. 2006) angewandt wurde. Es ermöglicht eine zeitabhängige Reisezeitberechnung aufgrund vorhandener Zeitprofile der Kantengeschwindigkeit, nachfolgend wird dieses Verfahren verwendet.

Das Konzept der Zuverlässigkeit

Es ist bereits belegt worden, dass die Reisezeitvariabilität ein noch wichtigeres Routenwahlkriterium ist als die Reisezeit selbst. Reisende sind also vor allem an einer zuverlässigen Prognose interessiert, sodass die Reise planbar wird. Daher wird für zukünftige Navigationssysteme eine wichtige Funktionalität sein, die Reisezeitvariabilität zu schätzen, um eventuell unzuverlässige Straßen zu vermeiden.

In verschiedenen Literaturquellen werden

Erfahrung · Kompetenz · Flexibilität · Innovation

VR

Geprüfte Übergänge von Beton auf Stahl? Kein Problem!



Wir geben Sicherheit - weltweit!

Produkt: BeSiCONNECT EDSP

VOLKMANN & ROSSBACH GmbH Co. KG
 Hohe Straße 9-17 · D-56410 Montabaur
 Tel.: +49 (0) 2602 135-0 · Fax: -490
www.volkmann-rossbach.de

Stahlschutzwände von VR:

- MINI-GUARD®, Aufhaltestufe T1 bis T3
- VARIO-GUARD®, Aufhaltestufe T3 bis H2
- MAXI-WALL®, Aufhaltestufe H2
- SOLO-GUARD, Aufhaltestufe H1
- GuardVOX®, Aufhaltestufe T3, H1

Rückhaltesysteme von VR:

- Standardsysteme gemäß TL-SP / RAL
- SAFETY-RAIL®, Aufhaltestufe H2
- SUPER-RAIL®, Aufhaltestufe H2, H4b
- MAXI-RAIL®, Aufhaltestufe H4b
- BRIDGE-GUARD®, Aufhaltestufe H4b

Übergänge von VR:

- BeSiCONNECT EDSP, Aufhaltestufe H2
- BeSiCONNECT SR, Aufhaltestufe H2

Fahrbahnmarkierung von VR:

- Heißplastik
- Kaltplastik
- Kaltspritzmarkierungen
- Farbmarkierungen
- Kalt- und Heißplastikagglomerate
- Markierungsfolien
- Markierungsnägel

Weitere Produktbereiche von VR:

- Motorrad-Unterfahrerschutz
- Amphibienschutz
- Anpralldämpfer (VECU-STOP®)
- Industrieschutz
- Stahl-Tragkonstruktion für Solaranlagen

Bild 1: Die log-normale Verteilung der Reisezeiten

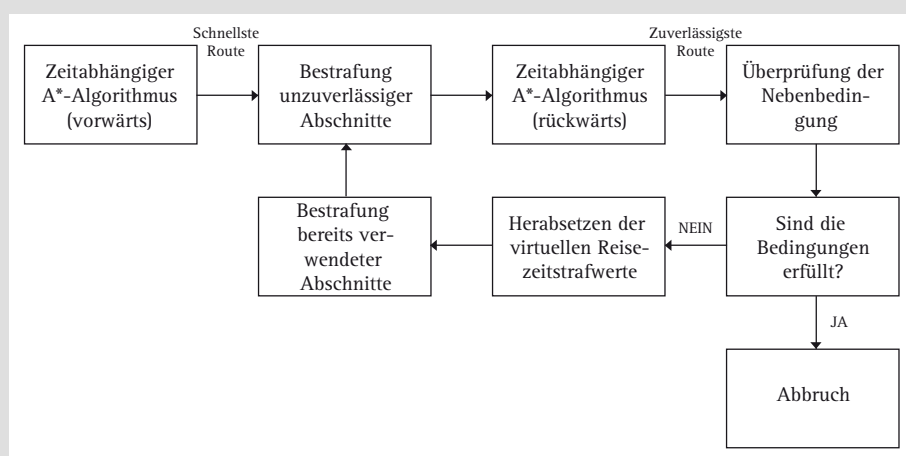
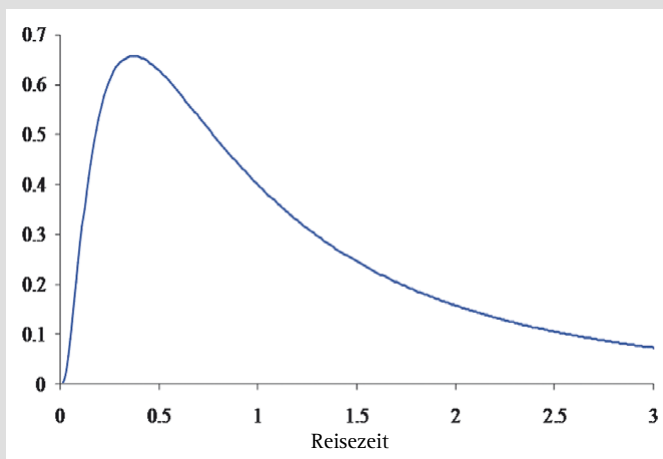


Bild 2: Algorithmus zur zuverlässigen, dynamischen Zielführung

empirische sowie analytische Studien beschrieben, die die Bedeutung der Reisezeitunsicherheit nachweisen (Abdel-Aty et al. 1995, Bates et al. 2002, Jackson, Jucker 1981, Lam, Small 2001, Liu et al. 2004, Noland, Small 1995). Es existieren auch bereits Modelle zur Quantifizierung der Unsicherheit und eine Formulierung als „Unzuverlässigkeit“ (Bates et al. 2001, Noland, Polak 2002). Die Definition eines geeigneten Maßes zur Quantifizierung der Reisezeit-zuverlässigkeit ist ebenfalls der Forschungsschwerpunkt zahlreicher Arbeiten. Die meisten der bislang entwickelten Quantifizierungen verwenden das Merkmal der Reisezeitverteilung, wobei zwei unterschiedliche Typen unterschieden werden können: Erstens die Wahrscheinlichkeit, auf einem Straßenabschnitt einen Stau vorzufinden (Bell, Iida 1997), und zweitens die Verzögerung auf einem Straßenabschnitt (Lomax et al. 2003). Für das hier beschriebene Zielführungsverfahren wird ein neues Verfahren bzw. Quantifizierungsmaß (Kaparias et al. 2008) verwendet. Es besteht aus zwei Kennwerten („Verfrühung“ und „Verspä-

tung“), die mit Hilfe des Mittelwerts und der 5 %- und 95 %-Reisezeitfraktile unterschieden werden, unter der Annahme, dass die Reisezeit log-normal verteilt ist (Bild 1). So werden die „Verfrühungszuverlässigkeit“ (r_E) und die „Verspätungszuverlässigkeit“ (r_L) einer Kante l wie folgt berechnet:

$$r_E(l) = \exp[-1/2 \cdot T_{\log}(l) - z_{0,05} \cdot \sqrt{T_{\log}(l)}] \quad (1)$$

$$\text{und} \quad r_L(l) = \exp[1/2 \cdot T_{\log}(l) - z_{0,05} \cdot \sqrt{T_{\log}(l)}] \quad (2)$$

$$\text{mit} \quad T_{\log}(l) = \ln \left(1 + \frac{\text{var}[t(l)]}{[\bar{t}(l)]^2} \right). \quad (3)$$

$t(l)$ stellt die Reisezeit auf Kante l dar, die einer log-normalen Verteilung mit einem Mittelwert $\bar{t}(l)$ und Varianz $\text{var}[t(l)]$ folgt. $z_{0,05} = 1.65$ bei einem 90 %-Vertrauensniveau. Der Vorteil dieser Kennwerte ist ihre Verständlichkeit für die Fahrer und ihre Umwandelbarkeit in zu erwartende Zeitgewinn- und Verspätungswerte, aus denen die frühesten und spätesten zuverlässigen voraussichtlichen Ankunftszeiten berechnet werden können. Die verwendeten Zuverlässigkeitskennwerte können entweder aus Reisezeitmessungen oder direkt aus einer Geschwindigkeitsverteilung berech-

net werden. Mit diesem Ansatz kann die Reisezeitzuverlässigkeit einzelner Straßenabschnitte ermittelt werden. Bei der Ermittlung der Zuverlässigkeit einer kompletten Route, die aus verschiedenen einzelnen Abschnitten besteht, wird berücksichtigt, dass die gesamte Reisezeitvarianz einer Route von den Korrelationen zwischen den Reisezeitverteilungen einzelner Abschnitte abhängt. Als Korrelation wird das Auftreten von Stau auf einem Straßenabschnitt, das den Zustand anderer Abschnitte im Netz beeinflusst, bezeichnet (z. B. Ausweichverkehr, Rückstau) (Kaparias et al. 2008).

3 Algorithmus für eine zuverlässige, dynamische Zielführung

Vorgänger des neu entwickelten, zuverlässigen dynamischen Zielführungsalgorithmus ist das sogenannte „Verfahren von Chen“ (Chen et al. 2005b, 2005a, 2006). Ergänzend zu Chen wird das oben beschriebene neue Reisezeitzuverlässigkeitsmaß (Gleichungen (1) bis (3)) verwendet. Ziel des Algorithmus ist es, möglichst zuverlässige Routen zu finden, die auch bzgl. der erwarteten Reisezeit für den Kunden akzeptabel sind. Diese wird durch die Einführung folgender Nebenbedingungen erreicht:

- maximale Routenreisezeit,
- maximale Routenlänge und
- minimale Verfrühungs- und Verspätungszuverlässigkeit.

Kern des Verfahrens ist die Addition von virtuellen „Strafwerten“ auf die Reisezeiten der Straßenabschnitte und Mehrfachverwendung des A*-Algorithmus. Im ersten Rechenlauf wird die schnellste Route zwischen dem Abfahrtspunkt und dem Ziel gesucht. Dabei wird die Zuverlässigkeit der einzelnen Straßenabschnitte und der gesamten Route zunächst nicht berücksichtigt. Nachdem die schnellste Route berechnet wurde, werden alle unzuverlässigen Abschnitte (d. h. Abschnitte mit niedrigen Zuverlässigkeitskennwerten) mittels virtueller Erhöhung ihrer Reisezeiten „bestraft“. Dies stellt sicher, dass unzuverlässige Straßenabschnitte in anschließenden A*-Läufen vermieden werden. Weitere Läufe des A*-Algorithmus werden durchgeführt. Anschließend werden die Strafwerte wieder stufenweise herabgesetzt, sodass die unzuverlässigen Abschnitte, die vorher ausgeschlossen wurden, wieder in die Routensuche berücksichtigt werden, wenn vorher keine Route

die eingeführten Bedingungen erfüllen konnte.

Der Einsatz von virtuellen Reisezeitstrafwerten ermöglicht auch eine Berechnung alternativer Routen in einem Netz. Es ist bereits belegt worden, dass Zielführungsstrategien, die mehrere alternative Routen anstatt einer einzelnen Route vorschlagen, bessere Ergebnisse liefern (Lee 1994), da sie das Risiko einer sog. „Stau-Rückkopplung“ im Verkehrsnetz reduzieren. Eine „Stau-Rückkopplung“ entsteht, wenn eine große Anzahl von Fahrern derselben Routenempfehlung folgt und aufgrund der gestiegenen Nachfrage genau dort dann ein Stau entsteht. Um das Risiko der „Stau-Rückkopplung“ zu minimieren, sollten die berechneten und empfohlenen Routen maximal-disjunkt sein, also so wenige Straßenabschnitte wie möglich gemein haben. Dadurch wird auch vermieden, dass durch einen gestauten Abschnitt alle Routen von einem Stau betroffen sind. Dies wird sowohl durch eine zusätzliche Bestrafung der Abschnitte, die bereits in einer berechneten und akzeptierten Route verwendet werden, als auch durch die Einführung einer vierten Bedingung erreicht,

die sich auf die maximale Routenüberlappung bezieht, sodass jede neu berechnete Route nur dann akzeptiert wird, wenn sie mit allen anderen bisher berechneten Routen nur wenig überlappt. Für jeden Abschnitt l , der entweder einen niedrigen Verfrühungs- oder Verspätungszuverlässigkeitswert hat, oder der bereits in einer Route verwendet wird, wird folgender synthetischer Reisezeitstrafterm addiert:

$$\bar{r}_l(l) = \alpha^m (1 - r_E(l)) \cdot r_l(l)^q W_0 \quad (4)$$

wobei $0 < \alpha < 1$, m = Anzahl der Iterationen, $q = 0$ wenn $m = 0$, sonst $q = 1$, und konstanter Parameter W_0 .

Zu erwähnen ist, dass, obwohl der erste Rechenlauf des A*-Algorithmus in Fahrtrichtung verläuft, anschließende Rechenläufe rückwärts durchgeführt werden – also vom Ziel- zum Abfahrtsort. Der Vorteil ist, dass nach dem ersten A*-Lauf die berechnete Reisezeit vom Abfahrtsstraßenabschnitt zu jedem anderen Netzpunkt als genaue Schätzung in nachfolgenden A*-Rechenläufen verwendet werden kann. Die Anzahl der abzusuchenden Knoten wird dadurch deutlich reduziert und die Rechenzeit verringert (Bild 2).

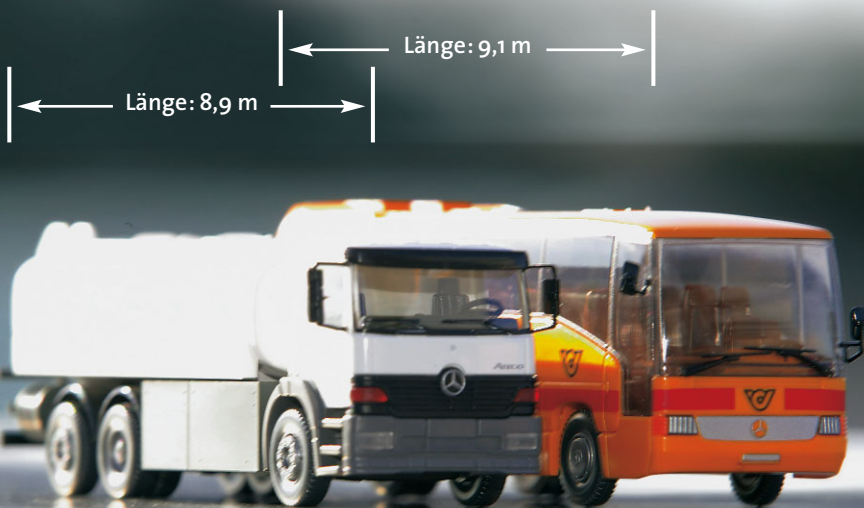
4 Nebenbedingungen für die Routenqualität und die Nutzerakzeptanz

Um die Qualität bzw. die Nutzerakzeptanz der ermittelten Routen zu erhöhen, werden einige Nebenbedingungen eingeführt.

Maximale Routenreisezeit

Die Bedingung der maximalen Routenreisezeit soll sicherstellen, dass die berechneten Routen nicht zu lang werden. Dementsprechend darf die Gesamtreisezeit $T(p_i)$ von Route p_i nicht länger als der Grenzwert T_{\max} sein. Der Grenzwert T_{\max} ergibt sich in Abhängigkeit der Reisezeit $T(p_0)$ der schnellsten Route p_0 , des ersten A*-Berechnungsschritts. Er ist mit $T(p_0)$ durch die sog. Reisezeitzulassungsparameter β verbunden, sodass $T_{\max} = \beta T(p_0)$. Der Wert hängt von der Reisezeit der schnellsten Route, also von der Größe des Netzes, und von der Toleranz des Fahrers gegenüber einer zusätzlichen Fahrzeit ab. Beispielsweise würde ein Wert von $\beta = 2$ bei $T(p_0) = 10$ Minuten bedeuten, dass eine Route, die zweimal so lang wie die schnellste Route (20 Minuten) ist, für den Nutzer gerade

Uns geht's nicht nur um die Länge,
wir hören ganz genau hin.



TOPO.plus

Präzise Fahrzeug-
Klassifizierung per
Seitenradar

- Messungen der Längen, Geschwindigkeiten und akustischen Ereignisse
- Zuverlässige Unterscheidung, z. B. von Bus und LKW

RTB

Bild 3: Das Straßennetz des Münchener Nordens (Quelle: www.openstreetmap.org)

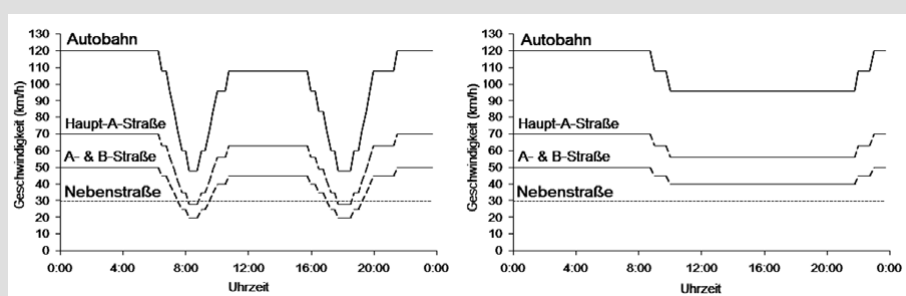
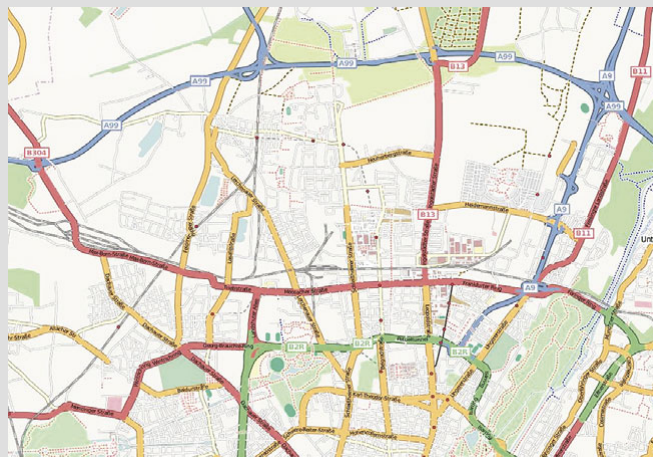


Bild 4: Geschwindigkeitsprofile von Straßenabschnitte für Wochentage (links) und Wochenende (rechts)

noch akzeptierbar wäre. Dies ist jedoch für längere Routen nicht realistisch. So wären bei einem Wert von $T(p_0) = 30$ Minuten Routen mit einer Reisezeit von 60 Minuten gerade noch akzeptierbar. In diesem Fall wird ein Wert von 1,1 oder 1,2 verwendet.

Maximale Routenlänge

Es ist möglich, dass, auch wenn eine Route hinsichtlich der Reisezeit für den Nutzer akzeptabel ist, diese in Hinblick auf die Länge unakzeptierbar ist. Beispielsweise würden nicht viele Fahrer akzeptieren, über einen langen Umweg geführt zu werden, nur um eine kleine Zeitersparnis auszunutzen. Deshalb wird die Bedingung der maximalen Routenlänge eingeführt. Dementsprechend darf die Gesamtlänge von Route p_i nicht größer als der Grenzwert $\Lambda_{\max} = \zeta \Lambda(p_0)$ sein, wobei ζ der sog. Längenzulassungsparameter und $\Lambda(p_0)$ der Länge der schnellsten Route p_0 entsprechen. Der Bereich von ζ ähnelt dem von β , d. h. er hängt von der Länge der schnellsten Route ab. Beispielsweise würde ein Wert von $\zeta = 2$ bei $\Lambda(p_0) = 5$ km bedeuten, dass eine 10 km lange Route akzeptierbar wäre. Allerdings, derselbe ζ Wert bei $\Lambda(p_0) = 30$ km würde bedeuten, dass eine 60 km lange Route auch akzeptierbar wäre, was nicht mehr realistisch ist. Ähnlich zu β , ein ζ Wert von 1,1 oder 1,2 sollte in diesem Fall verwendet werden.

Minimale Zuverlässigkeit

Obwohl bei der Routensuche unzuverlässige Kanten soweit wie möglich vermieden werden, kann es vorkommen, dass keine akzeptierbare Route im Laufe der ersten Iterationen des Algorithmus gefunden wird. Dies führt zu einer weiteren schrittweisen Herabsetzung der Reisezeitstrafwerte, sodass vorher ausgeschlossene Kanten wieder in die Routensuche eingeschlossen werden. Es wird keine weitere Überprüfung der Routenzuverlässigkeit vorgenommen. Es kann also vorkommen, dass Routen mit relativ niedrigeren Zuverlässigkeitswerten errechnet werden. Da das Ziel des Algorithmus das Sicherstellen der Zuverlässigkeit der berechneten Routen ist, wird die weitere Bedingung der minimalen Verfrühungs- und Verspätungszuverlässigkeitsgrenzwerte, R_{Emin} und R_{Lmin} , eingeführt. Nämlich, jede akzeptierbare Route p_i sollte die Ungleichungen $R_E(p_i) > R_{Emin}$ und $R_L(p_i) > R_{Lmin}$ erfüllen. Es wird im Rahmen dieser Arbeit empfohlen, dass $0,4 < R_{Emin} < 0,6$ und $0,45 < R_{Lmin} < 0,65$, je nach Vertrauensniveau bei der Berechnung der Zuverlässigkeit.

Maximale Routenüberlappung

Der maximale Routenüberlappungsindex wird als weitere Nebenbedingung eingeführt. Er soll soweit wie möglich sicher-

stellen, dass die berechneten Routen maximal disjunkt sind. Prinzipiell können sich Routen ergeben, die bis auf einen Link identisch sind. Obwohl sie dennoch als teil-disjunkt bezeichnet werden können, haben sie keine der Vorteile dieser Eigenschaft. Um dies zu vermeiden, wird der Routenüberlappungsindex eingeführt. Für zwei Routen p_i und p_j mit Gesamtlängen $\Lambda(p_i)$ und $\Lambda(p_j)$, die Gesamtlänge der gemeinsamen Kanten ist $\Lambda(p_i \cap p_j)$, und die Längen der nicht-gemeinsamen Kanten für Route p_i und p_j sind $\Lambda'(p_i) = \Lambda(p_i) - \Lambda(p_i \cap p_j)$ und $\Lambda'(p_j) = \Lambda(p_j) - \Lambda(p_i \cap p_j)$. So wird der Routenüberlappungsindex wie folgend definiert:

$$\varepsilon(p_i, p_j) = \frac{\Lambda(p_i \cap p_j)}{\sqrt{\Lambda'(p_i) \cdot \Lambda'(p_j)}} \quad (5)$$

Der Überlappungsindex ist dimensionslos. Niedrige Werte (in der Nähe von 0) bedeuten eine geringe Überlappung zwischen den Routen und je größer ε wird, desto größer ist auch die Überlappung. Es gilt für völlig-disjunkte Routen $\varepsilon = 0$ und für völlig-überlappende Routen $\varepsilon = \infty$.

Die entsprechende Bedingung ist, dass jede neu berechnete Route mit jeder anderen bisher berechneten Route einen kleineren Überlappungsindex als einen Maximalgrenzwert ε_{\max} haben soll. Der Wert von ε_{\max} hängt von einem Maß ab, welches die Toleranz einer Routenüberlappung widerspiegelt. Grenzwerte von 2 bis 2,5 sind akzeptabel (d. h. die Überlappungslänge ist 2 bis 2,5 Mal länger als die Nicht-Überlappungslänge). Sind jedoch nur kleine Überlappungslängen erwünscht, werden kleinere Werte von ε_{\max} empfohlen.

Maximale Routenanzahl

Die maximale Anzahl der Alternativen sollte kleiner als der Grenzwert $N_{\max} = 3$ sein. Diese Bedingung ist auch eine Abbruchbedingung des Verfahrens, da die Berechnung von N_{\max} Routen bedeutet, dass die gewünschte Anzahl von zuverlässigen Routen ermittelt wurde und dass keine weitere Routen gesucht werden. Zu erwähnen ist außerdem, dass für die Beschreibung von Kanten als „zuverlässig“ oder „unzuverlässig“ Zuverlässigkeitsgrenzwerte verwendet werden. Eine Kante wird nur als „zuverlässig“ bezeichnet, wenn ihr Verfrühungszuverlässigkeitswert größer als der Grenzwert r_{Emin} und ihr Verspätungszuverlässigkeitswert größer als der Grenzwert r_{Lmin} sind. Die Bereiche von r_{Emin} und r_{Lmin} sind identisch zu R_{Emin} und R_{Lmin} , also $0,4 < r_{Emin} < 0,6$ und $0,45 < r_{Lmin} < 0,65$,

je nach Vertrauensniveau bei der Berechnung der Zuverlässigkeit.

5 Simulationsexperiment

Das neue Rechenverfahren wurde in einer Software namens ARIAdNE (Kaparias et al. 2007b) umgesetzt. Der Algorithmus wurde im Straßennetz des Münchener Nordens mittels eines Simulationsexperiments überprüft. Das Testnetz hat insgesamt 3.506 Knoten und 7.130 Abschnitte und dehnt sich über eine Fläche von ca. 10 km Länge und 7,5 km Breite aus (Bild 3).

Datengrundlage

Die für das Experiment benötigten Verkehrsdaten wurden vorab mittels einer Simulation ermittelt. Es handelt sich dabei um die mittleren Geschwindigkeiten der Straßenabschnitte (aus denen Reisezeiten gewonnen werden können), die mittleren Wartezeiten der Abbiegebewegungen an Knotenpunkten und die Zuverlässigkeitswerte der Straßenabschnitte und Abbiegebewegungen. Die Simulation der Geschwindigkeitswerte stützt sich auf insgesamt fünf Straßenkategorien (Autobahn, Haupt-A-Straße, A-Straße, B-Straße und Nebenstraße) und auf deren Geschwindigkeitsgrenzwerte. Unter der Annahme, dass in einem gewissen Zeitintervall die Fahrzeuge mit einer konstanten Geschwindigkeit fahren, deren maximaler Wert die Geschwindigkeitsgrenze der jeweiligen Straßenkategorie ist, können Geschwindigkeitsprofile für jeden Straßentyp erzeugt werden. Geschwindigkeitswerte werden so für 15-Minuten Intervalle und für Wochentage und Wochenenden simuliert. Die Geschwindigkeitsprofile sind beispielhaft im Bild 4 dargestellt.

Die Wartezeiten für Abbiegebewegungen an Knotenpunkten werden aufgrund des Typs der Abbiegebewegung (rechts, links oder geradeaus) in der Simulation erzeugt. Rechtsabbiegebewegungen wird ein Wartezeitwert von „0“ zugeordnet, da sich Rechtsabbieger i. d. R. mit anderen Verkehrsströmen nicht kreuzen. Linksabbiegebewegungen werden Wartezeitwerte zugeordnet, die von den Typen der Anfangs- und Endkanten der Bewegung abhängig sind, während Geradeausbewegungen von den Typen der sich kreuzenden Kanten am Knotenpunkt abhängige Wartezeitwerte erhalten. Wartezeitprofile werden ebenfalls für 15-Minuten-Intervalle simuliert, unter der Berücksichtigung von Haupt- und Nebenverkehrszeiten. Die

ermittelten Wartezeitwerte reichen von 0 bis 45 Sekunden. Als Beispiel sind die Wartezeitprofile von Linksabbiegebewegungen im Bild 5 dargestellt.

Für die meisten Kanten des Netzes ergaben sich relativ hohe Zuverlässigkeitswerte (Verfrühungskennwerte zwischen 0,55 und 0,7). Zuverlässigkeitsprofile wurden ebenfalls ermittelt (Bild 6). Allerdings wurden anschließend bestimmten Abschnitten in Abhängigkeit von deren Stauanfälligkeit und deren Abbiegebewegungen manuell niedrigere Zuverlässigkeitswerte zugeordnet. Die Basis für diese Zuordnung war sog. „vor-Ort Expertenwissen“, d. h. Erfahrungen von Einzelpersonen, die sich häufig im Testfeld bewegen. Im Testnetz des Münchner Nordens wurden Teile der B 13 (Ingolstädter Straße) während der Abendspitze als „unzuverlässig“ gekennzeichnet (Bild 7). Die Verfrühungs- und Verspätungskennwerte von 15 Kanten entlang

der Ingolstädter Straße wurden deshalb zwischen 17:00 Uhr und 19:00 Uhr auf 0,2 und 0,37 herab gesetzt (Bild 8).

Allgemeine Beschreibung des Experiments

Ziel des Experiments ist es, in der gegebenen Verkehrssituation eine bestimmte Anzahl von maximal-disjunkten realistischen Alternativrouten zu ermitteln. Als Startort wird der Firmensitz von BMW (gekennzeichnet mit „BMW NL“) und als Ziel die BAB A 92 Autobahn in nördlicher Richtung, die München mit dem Flughafen verbindet, festgelegt. Das Experiment findet während der Abendspitze eines Wochentages statt und die Abfahrtszeit von BMW NL ist 18:15 Uhr.

Folgende Simulationsparameter wurden verwendet: α , des Straferts = 0,7, γ , = 1,9. Der Reisezeitzulassungsparameter β = 1,4, der Längenzulassungsparameter ζ = 2. Die Zuverlässigkeitsgrenzwerte r_{Emin} und r_{Lmin} ,

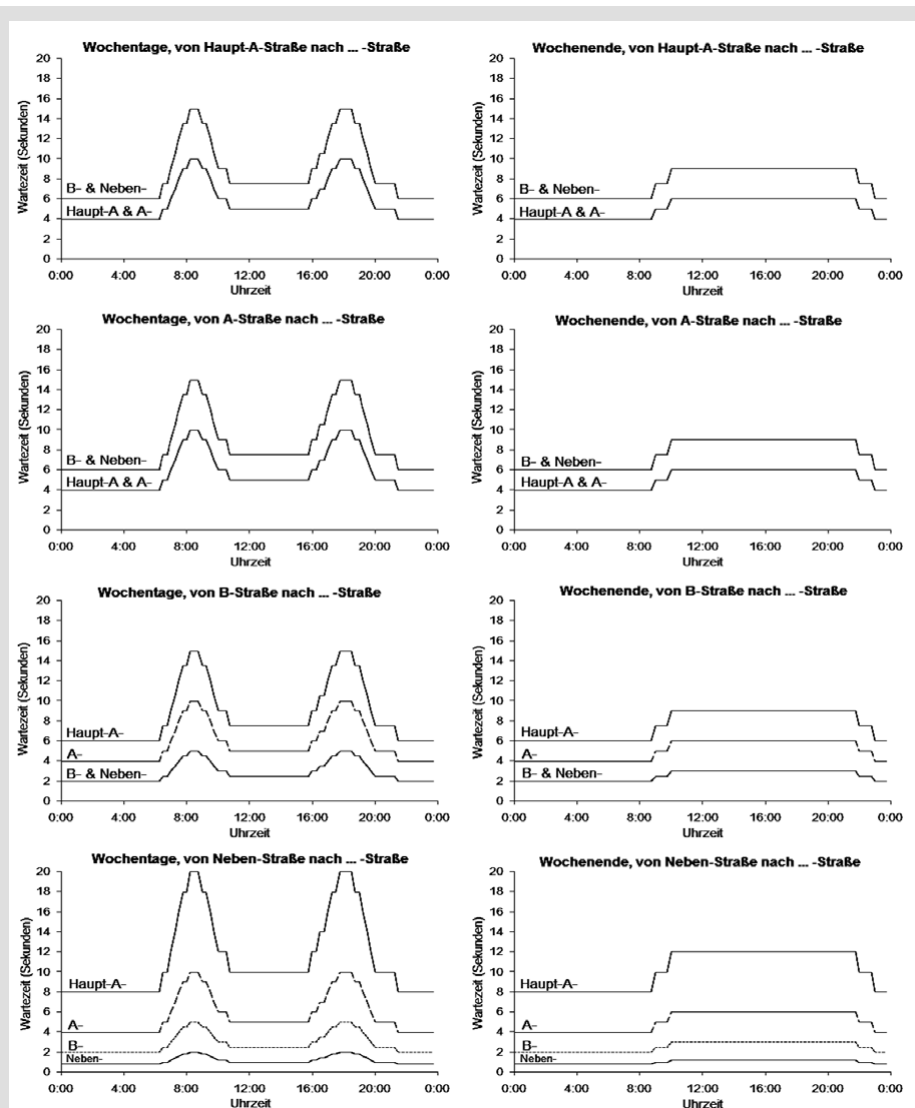


Bild 5: Wartezeitprofile für Linksabbiegebewegungen für Wochentage (links) und Wochenende (rechts)

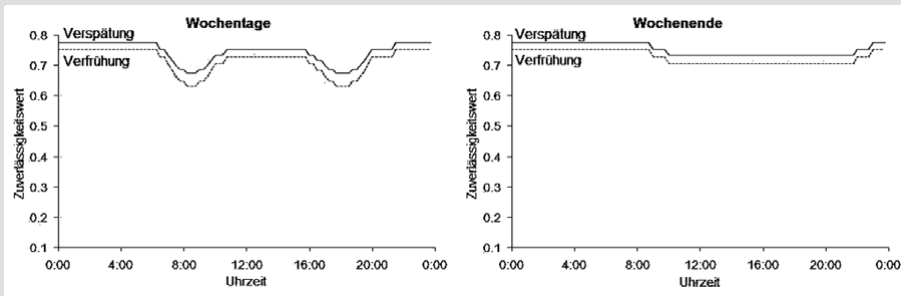
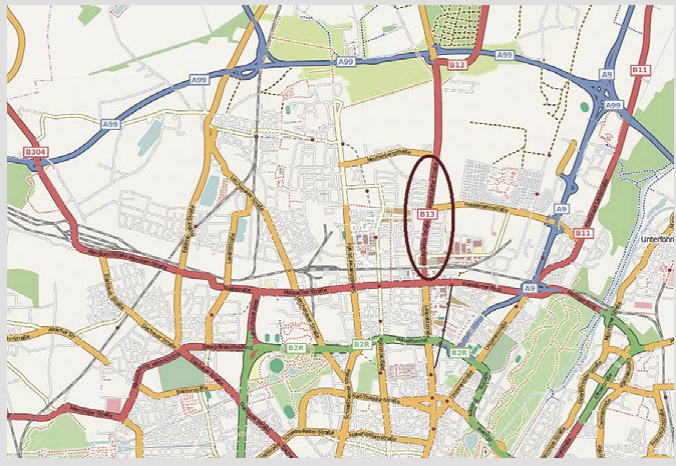


Bild 6: Simulierte Zuverlässigkeitsprofile für zuverlässige Kanten

Bild 7: Der unzuverlässige Abschnitt der B 13 an Wochentagabendspitzen (Quelle: www.openstreetmap.org)



die die Abschnitte als zuverlässig oder unzuverlässig kennzeichnen, sind gleich 0,5 und 0,56; für Routen sind die entsprechenden Grenzwerte R_{Emin} und R_{Lmin} gleich 0,5 und 0,59. Der Wert des maximalen Routenüberlappungsindex $\epsilon_{max} = 2$ und die maximale erlaubte Anzahl von berechneten Routen $N_{max} = 3$.

Ergebnisse

Die maximal-disjunkten Alternativrouten, die im Rahmen des Experiments berechnet wurden, sind im Bild 9 dargestellt. Zuerst berechnet der Algorithmus, ohne Rücksicht auf die Zuverlässigkeit und Nutzerakzeptanz, die schnellste Route (a) p_0 , die eine Reisezeit von $T(p_0) = 19$ Minuten, eine Länge von $\Lambda(p_0) = 14,7$ km, und Zuverlässigkeitwerte von $R_E(p_0) = 0,44$ und $R_L(p_0) = 0,54$ hat. Die voraussichtliche Ankunftszeit ist dadurch 18:34 Uhr, mit einer Zeitspanne von $-10,6/+16,5$ Minuten. Da die Zuverlässigkeit der Abschnitte in diesem ersten Schritt nicht berücksichtigt wird, verläuft die Route jedoch durch die unzuverlässige B 13 (Ingolstädter Straße), was die Nichterfüllung der Bedingung der minimalen Routenzuverlässigkeit zur Folge hat ($R_E(p_0) < R_{Emin}$ und $R_L(p_0) < R_{Lmin}$). Deshalb wird p_0 nicht akzeptiert.

Bei der Berechnung der ersten Alternativroute (b) wird nun die Zuverlässigkeit

berücksichtigt, indem die unzuverlässigen Abschnitte mit B 13 bestraft und dadurch völlig vermieden werden. Die berechnete Alternativroute p_1 verläuft entlang der Autobahnen A 9 und der A 99. Sie hat eine Reisezeit von $T(p_1) = 19,4$ Minuten, eine Länge von $\Lambda(p_1) = 21,6$ km und Zuverlässigkeitwerte von $R_E(p_1) = 0,61$ und $R_L(p_1) = 0,66$. Obwohl diese Route hinsichtlich der Entfernung etwas länger als p_0 ist, ist sie sehr viel zuverlässiger. Denn für die selbe voraussichtliche Ankunftszeit (18:34 Uhr) ergibt sich eine kleinere Zeitspanne ($-7,5/+10$ Minuten). Da die Nutzerakzeptanzbedingungen, einschließlich der Zuverlässigkeit, erfüllt sind, wird die Route akzeptiert und dem Fahrer empfohlen.

Im nächsten Schritt wird eine Alternative zu p_1 gesucht, diesmal aber sollten nicht nur unzuverlässige Kanten, sondern auch die in p_1 bereits verwendeten Abschnitte vermieden werden. Die berechnete zweite Alternativroute p_2 (c) ist hinsichtlich der Reisezeit länger als p_1 ($T(p_2) = 21,5$ Minuten) aber kürzer hinsichtlich der Entfernung ($\Lambda(p_2) = 17$ km) und hat Zuverlässigkeitwerte von $R_E(p_2) = 0,63$ und $R_L(p_2) = 0,68$. So ist die voraussichtliche Ankunftszeit 18:37 Uhr mit einer Zeitspanne von $-7,9/+10,3$ Minuten. Die wichtigste Eigenschaft von p_2 ist aber die völlige Vermeidung nicht nur der unzuverlässigen Abschnitte der B 13, sondern auch

der Kanten von p_1 . p_2 nutzt die B 304 (Max-Born Straße/Dachauer Straße) um auf die BAB A 99 zu gelangen und verläuft anschließend in Richtung Westen bis zur BAB A 92.

Bei der Berechnung der dritten Alternativroute sind die zu vermeidenden Abschnitte noch zahlreicher, da die unzuverlässigen Kanten der B 13 und die bereits in p_1 und p_2 beinhalteten Kanten, d. h. die A 9, die B 304 und die A 99, vermieden werden sollten. Da es nicht möglich ist, die letztere völlig zu vermeiden, weil sie die einzige Anfahrt zur A 92 ist, versucht der Algorithmus die A 99 so wenig wie möglich zu benutzen. Die berechnete Alternativroute (d) p_3 hat eine Reisezeit von $T(p_3) = 23,7$ Minuten, eine Länge von $\Lambda(p_3) = 15,5$ km und Zuverlässigkeitwerte von $R_E(p_3) = 0,64$ und $R_L(p_3) = 0,68$. Die voraussichtliche Ankunftszeit ist 18:39 Uhr, mit einer Zeitspanne von $-8,5/+11$ Minuten. Diese Route vermeidet die unzuverlässigen Abschnitte der B 13, sowie die Mehrheit der Kanten von p_1 und p_2 (mit Ausnahme des A 99 Abschnitts von p_1), und ist dadurch hinsichtlich der Reisezeit länger als die anderen zwei Alternativrouten, bleibt aber akzeptabel, da sie die Nutzerakzeptanzbedingungen erfüllt.

Beurteilung der Ergebnisse

Um die Qualität der Ergebnisse zu bewerten, wurde eine Umfrage durchgeführt. Es wurde eine Gruppe von fünf „Experten“, bestehend aus Mitarbeitern der BMW AG, gebildet, die im Testfeld entweder wohnen oder es täglich befahren. Zuerst wurde ihnen das Szenario des Experiments präsentiert, und sie wurden daraufhin aufgefordert, eine Route vom Abfahrtsort zum Ziel zu planen. Es zeigte sich, dass vier die Route p_1 und einer die Route p_3 vorschlugen. Es wurde festgestellt, dass keiner der Experten die Route p_0 empfiehlt, obwohl sie theoretisch die schnellste Route ist. Den Experten wurden dann die vom Algorithmus berechneten Routen präsentiert und sie wurden gebeten, die drei Routen zu beurteilen. Alle fünf Experten waren der Meinung, dass die berechneten Routen plausibel sind, dass sie diese bereits hin und wieder genutzt hätten und dass sie sie bei ihrer Routenplanung berücksichtigen würden, falls sie während der Zeit des Experiments abfahren.

Letztlich wurden die Experten aufgefordert, eine Bemerkung über die berechneten Reise- und Ankunftszeiten zu machen. Sie gaben an, dass die berechneten Reisezeiten von ihnen erwarteten Reisezeiten in

der gegebenen Situation entsprechen. Aus diesen Gründen wird für die Auswertung der Ergebnisse davon ausgegangen, dass die vom Algorithmus berechneten Routen und Reisezeiten plausibel sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein neuer zuverlässiger, dynamischer Zielführungsalgorithmus vorgestellt. Das Verfahren basiert auf dem zeitabhängigen A*-Algorithmus und einem neuen Maß der Reisezeitzuverlässigkeit. Außerdem wird ein Verfahren der virtuellen, abschnittswisen Reisezeiterhöhung verwendet. Nebenbedingungen, deren Ziel die Sicherstellung der Nutzerakzeptanz des Endergebnisses ist, ergänzen das neue Verfahren, indem sie gewährleisten, dass die berechneten Routen nicht zu lang und angemessen zuverlässig sind. Die Berücksichtigung der Zuverlässigkeit einzelner Straßenabschnitte und die Berücksichtigung der Routenüberlappung sorgen dafür, dass der Fahrer unterschiedliche Routen mit unterschiedlicher Länge und Reisezeit, aber ähnlicher Zuverlässigkeit, angeboten bekommt. Er selbst kann anschließend seine Route frei wählen. Dies soll insgesamt für eine Reduzierung der „Stau-Rückkopplung“ sorgen, da nicht alle Nutzer die gleichen Alternativrouten wählen werden.

Der Algorithmus wurde mit Hilfe des neu entwickelten Programms ARIAdNE für ein Simulationsexperiment auf einem Teil des Münchener Straßennetzes implementiert und erfolgreich getestet. Die Ergebnisse wurden mittels einer „Experten“-Umfrage bewertet. Diese ergab, dass der Algorithmus plausible Routen berechnet.

Der Fahrer kann somit in Zukunft nicht mehr nur zwischen einer „schnellen“ und „kurzen“ Routenberechnung wählen, er kann auch „zuverlässige Routen“ im Fahrzeug berechnen lassen. Natürlich können auch auf „zuverlässigen Routen“ weiterhin zufällige, unvorhersehbare Ereignisse, wie z. B. Unfälle, auftreten und die Reisezeit für den Nutzer schlagartig erhöhen.

Literaturverzeichnis

Abdel-Aty, A.; Kitamura, R.; Jovanis, P.P. (1995): Investigating the effect of travel time variability on route choice using repeated measurement stated preference data. *Transportation Research Record*, 1493, 39–45.

Ahuja, R.K.; Magnanti, T.L.; Orlin, J.B. (1993): *Network flows: Theory, Algorithms and Applications*. Prentice Hall.

Bates, J.; Black, I.; Fearon, J.; Gilliam, C.; Porter, S. (2002): Supply models for use in modelling the variability of journey times on the

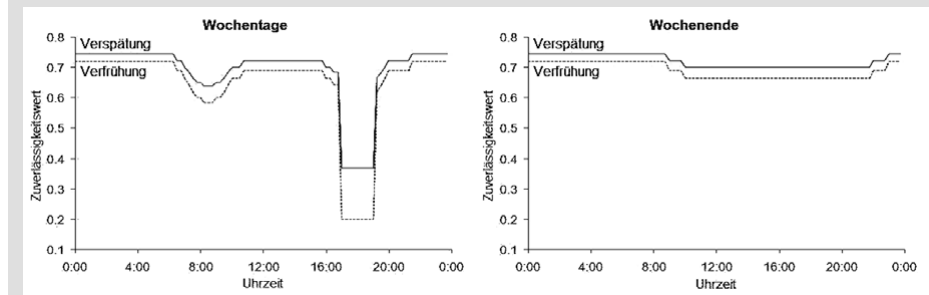


Bild 8: Zuverlässigkeitsprofile für unzuverlässige Kanten der B13

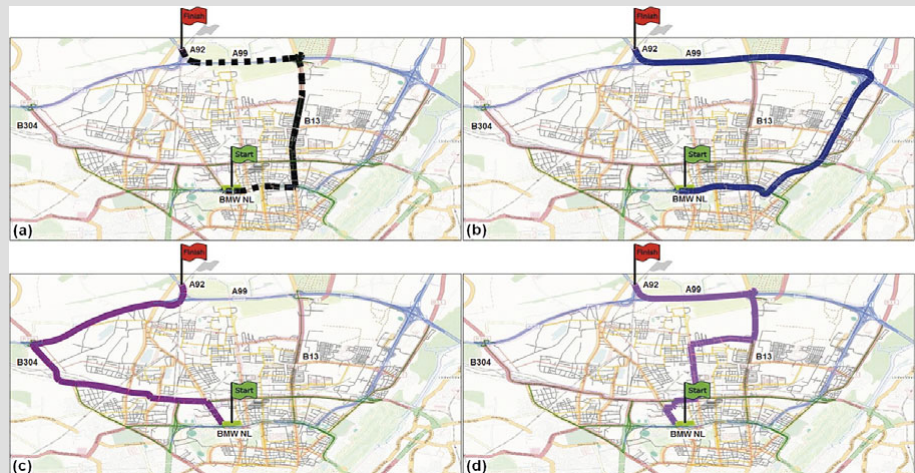


Bild 9: Ergebnisse des Simulationsexperiments

highway network. AET – Proceedings of the European Transport Conference 2002, Cambridge, UK.

Bates, J.; Polak, J.W.; Jones, P.; Cook, A. (2001): The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research E*, 37, 191–229.

Bell, M.G.H.; Iida, Y. (1997): Network reliability. In: *Transportation network analysis*, Wiley and Sons, Chichester, 179–192.

Chen, Y.; Bell, M.G.H.; Bogenberger, K. (2005a): Reliable pre-trip multi-path planning and dynamic adaptation for a centralized road navigation system. *ITSC 2005 – 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Vienna, Austria.

Chen, Y.; Bell, M.G.H.; Wang, D.; Bogenberger, K. (2006): Risk-averse time-dependent route guidance by constrained dynamic A* search in decentralized system architecture. *Transportation Research Record*, 1944, 51–57.

Chen, Y.; Kaparias, I.; Bell, M.G.H.; Bogenberger, K. (2005b): Reliable autonomous route guidance by a constrained A* search considering intersection delays. *The Reliability of Traveling and the Robustness of Transport Systems*, TRAIL Research School, Delft, The Netherlands, 69–92.

Dijkstra, E.W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.

Hart, P.E.; Nilsson, N.J.; Raphael, B. (1968): A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems, Science and Cybernetics*, 4, 2, 100–107.

Jackson, W.B.; Jucker, J.V. (1981): An empirical study of travel time variability and travel choice behaviour. *Transportation Science*, 16, 4, 460–475.

Kaparias, I.; Bell, M.G.H.; Belzner, H. (2008): A new measure of travel time reliability for in-vehicle navigation systems. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 12, 4, 202–211.

Kaparias, I.; Bell, M.G.H.; Bogenberger, K.; Chen, Y. (2007a): An approach to time-dependence and reliability in dynamic route guidance. *Transportation Research Record*, 2039, 32–41.

Kaparias, I.; Bell, M.G.H.; Chen, Y.; Bogenberger, K. (2007b): ICNavS: A tool of reliable dynamic route guidance. *Intelligent Transport Systems*, 1, 4, 225–233.

Lam, T.C.; Small, K.A. (2001): The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment. *Transportation Research E*, 37, 231–251.

Lee, C.-K. (1994): A multiple-path routing strategy for vehicle route guidance systems. *Transportation Research C*, 2, 3, 185–195.

Liu, H.X.; Recker, W.; Chen, A. (2004): Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time loop data. *Transportation Research A*, 38, 435–453.

Lomax, T.; Schrank, D.; Turner, S.; Margiotta, R. (2003): "Selecting travel reliability measures", (2003), 474360-1.

Noland, R.B.; Polak, J.W. (2002): Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues. *Transport Reviews*, 22, 1, 39–54.

Noland, R.B.; Small, K.A. (1995): Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes. *Transportation Research Record*, 1493, 150–158.

Rakha, H.; El-Shawarby, I.; Arafeh, M.; Dion, F. (2006): Estimating path travel-time reliability. *ITSC 2006 – 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Toronto, Canada, 236–241.

Sung, K.; Bell, M.G.H.; Seong, M.; Park, S. (2000): Shortest paths in a network with time-dependent flow speeds. *European Journal of Operational Research*, 121, 32–39.

Die Autoren bedanken sich bei der BMW AG für die Unterstützung dieser Forschungsarbeit.