

ENTWICKLUNG EINER ZIELFUNKTION ZUR BEWERTUNG VON TOURENVORSCHLÄGEN FÜR WANDERER IN EINER ACO-METAHEURISTIK

Rita Cyganski

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Verkehrsforschung

Kurzfassung: *Bestehende Routenplanungssysteme und die ihnen zu Grunde liegenden Algorithmen leisten hervorragende Arbeit bei der Ermittlung des kostengünstigsten Weges. Sie bieten jedoch nur beschränkte Möglichkeit zur Generierung von Wandererouten, bei der die bestmögliche Berücksichtigung der Wegepräferenzen des Wanderers unter Einhaltung einer Zeitvorgabe im Vordergrund steht.*

Dieser Artikel stellt eine Zielfunktion vor, die im Rahmen der Ant-Colony-Optimization-Metaheuristik zur Bewertung der lokalen Elemente sowie der Gesamttour in Hinblick auf die relevanten Nutzerpräferenzen eingesetzt wird. Ein auf dieser Basis implementierter Prototyp ermöglicht die Erstellung von Tourenvorschlägen ohne anwenderseitige Kenntnis des Zielgebietes.

1 Einleitung

Bestehende Routingsysteme zeichnen sich durch ihre Ausrichtung auf den motorisierten Verkehr und eine Konzentration auf die Ermittlung kürzester - oder genereller kostengünstigster - Wege aus. Wanderer sind bisher bei der Planung ihrer Touren weitestgehend auf publizierte Tourenvorschläge angewiesen. Wenngleich bei diesen oftmals eine Klassifikation, z.B. nach Schwierigkeitsgrad, vorgenommen wird, erfolgt keine Berücksichtigung individueller Präferenzen hinsichtlich der Toureneigenschaften.

Vor allem im universitären Forschungsbereich finden sich verschiedene Ansätze der Berücksichtigung nutzerseitiger Interessen und Fähigkeiten bei der Generierung von Tourenvorschlägen. Während Lösungsansätze, die sich am Travelling-Salesman-Problem (TSP) orientieren, eine Tourenkonstruktion entlang oder zu vorgegebenen ‚Points of Interest‘ (POIs) vornehmen [1][2], beruhen alternative Ansätze auf der Nutzung Kürzester-Wege-Algorithmen mit einer abschließenden Bewertung der erstellten Touren [3][4].

Diese Arbeit stellt die Zielfunktion eines auf der Verwendung der Ant-Colony-Optimisation (ACO) beruhenden Ansatzes vor, bei dem vorgegebene Nutzerpräferenzen hinsichtlich der gewünschten Toureneigenschaften sowohl bei der Konstruktion der Tourenvorschläge als auch bei einer abschließenden Beurteilung Berücksichtigung finden.

2 Zentrale Anforderungen der Wanderroutenerstellung

Im Vergleich zu aktuellen Routingsystemen für Endnutzer im motorisierten Verkehr stellen sich die Ansprüche von Wanderern an eine geeignete Tour vielschichtig dar. Ziel einer Wanderung ist es, innerhalb einer vorgegebenen Zeit eine möglichst kurzweilige und den eigenen Fähigkeiten entsprechende Wanderstrecke zurückzulegen. Da auf Seiten des Wanderers in der Regel keine oder nur eine begrenzte Kenntnis des Zielgebietes vorliegt, wird nur selten eine Route anhand vorgegebener Start- und Zielorte oder die Passage bestimmter Lokalitäten geplant. Vielmehr handelt es sich hierbei um die Suche nach einer landschaftlich interessanten Wegstrecke, die in Bezug auf ihre Dauer und Wegeigenschaften bestmöglich die Präferenzen des Nutzers erfüllt.

Kriterien für die Bewertung einer Tour aus der Perspektive des Endnutzers lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: Als lokale Kriterien werden alle diejenigen Kriterien identifiziert, die für jeden Wegabschnitt geprüft werden können. Globale Kriterien hingegen können erst hinsichtlich vollständiger Touren evaluiert werden.

Bei der Beurteilung eines Wandervorschlages seitens der Nutzer lassen sich folgende globale Kriterien identifizieren [4][5][6]:

- Gesamtdauer der Tour
- Höhenmeter, die im Verlauf der Tour überwunden werden müssen
- Passage ausgewählter POIs
- Unterscheidung von Stichwegen oder Rundtouren
- Anreiseart des Wanderers (PKW / ÖV)
- Topologie der Tour, z.B. die Vermeidung von Zick-Zack-Routen

Zu den relevanten Kriterien einer lokalen Bewertung zählen vor allem:

- Landschaftliche Schönheit
- Beschaffenheit des Weges (Wegtyp)
- Markierung des Weges für die Orientierung des Endnutzers
- Steigung von Wegen (auch Wegneigung)

Ein Routingsystem für Wanderer sollte es ermöglichen, Nutzerpräferenzen hinsichtlich ihrer Ausprägung und ihrer Relevanz abzufragen und passende Tourenvorschläge abzuleiten.

3 Adaption einer ACO-Metaheuristik für die Anforderungen einer Wanderroutengenerierung

Auf der Basis der skizzierten Anforderungen kann die Generierung einer optimalen Wandertour als nichtlineares, mehrkriterielles, globales Optimierungsproblem eingeordnet werden. Ein Ansatz zur Lösung derartiger Probleme ist die den populationsbasierten Verfahren zuzuordnende Ant-Colony-Optimization (ACO)-Metaheuristik.

3.1 Funktionsweise der ACO-Metaheuristik

Die ACO-Metaheuristik ist ein Designparadigma, das durch das Verhalten von Ameisenkolonien bei der Futtersuche inspiriert wurde. Ameisen sondern bei der Fortbewegung den Duftstoff Pheromon ab. Dieser fungiert als eine Art kollektives Gedächtnis, indem oft begangene Wege durch diese Duftspuren markiert und von nachfolgenden Ameisen präferiert genutzt werden. ACO-Algorithmen sind Konstruktionsalgorithmen, die bei der Generierung eines Wegvorschlages sowohl die Stärke einer künstlichen Pheromonspur als auch heuristische Informationen zur Güte eines Wegabschnittes berücksichtigen.

Gesteuert durch eine virtuelle Kolonie erstellen die einzelnen Populationsmitglieder iterativ Tourenvorschläge, die anschließend zentral bewertet werden. Auf den Kanten der iterationsbesten Tour erfolgt sodann eine Pheromonablage in Abhängigkeit von der Güte der Tour. Die Berücksichtigung der Informationen zur Güte und Pheromonstärke bei der Auswahlwahrscheinlichkeit eines Wegabschnittes ruft eine Verbesserung der Tourenvorschläge im Verlauf der Suche hervor [7].

3.2 Anpassung der ACO-Metaheuristik zur Generierung von Wandertouren

ACO-Metaheuristiken werden in der Regel zum Auffinden kürzester Wege beim TSP genutzt. Ihr Einsatz zur Generierung von Wandervorschlägen setzt verschiedene Anpassungen voraus. Der Ablauf der Routengenerierung beim nachfolgend vorgestellten Prototyp ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

Der Prototyp unterstützt die Erstellung von Wandervorschlägen mit vorgegebenem Start- und Zielort sowie Touren, bei denen nur die Zugangsart (PKW / ÖV) vorgegeben ist. Im ersten Fall können sowohl Rund- als auch Stichtouren erstellt werden; im zweiten Fall erfolgt zur Reduzierung der Berechnungskomplexität eine Beschränkung auf Rundtouren ausgehend von entsprechenden POIs.

Eine weitere Anpassung betrifft die Selektion von Kanten und Knoten während der Tourkonstruktion. Der Selektionsmechanismus wurde zusätzlich zu der pheromon- und präferenzbasierten Auswahl des nächsten Knotens um eine zieldauerbasierte und eine explorationsorientierte Auswahl ergänzt. Diese Maßnahmen ermöglichen zum einen die

Konstruktion von Touren nahe der vorgegebenen Dauer und tragen zum anderen zu einer Optimierung der Tourenkandidaten auch in lichten Graphen sowie zu einer Verringerung der Stagnationswahrscheinlichkeit in lokalen Minima bei.

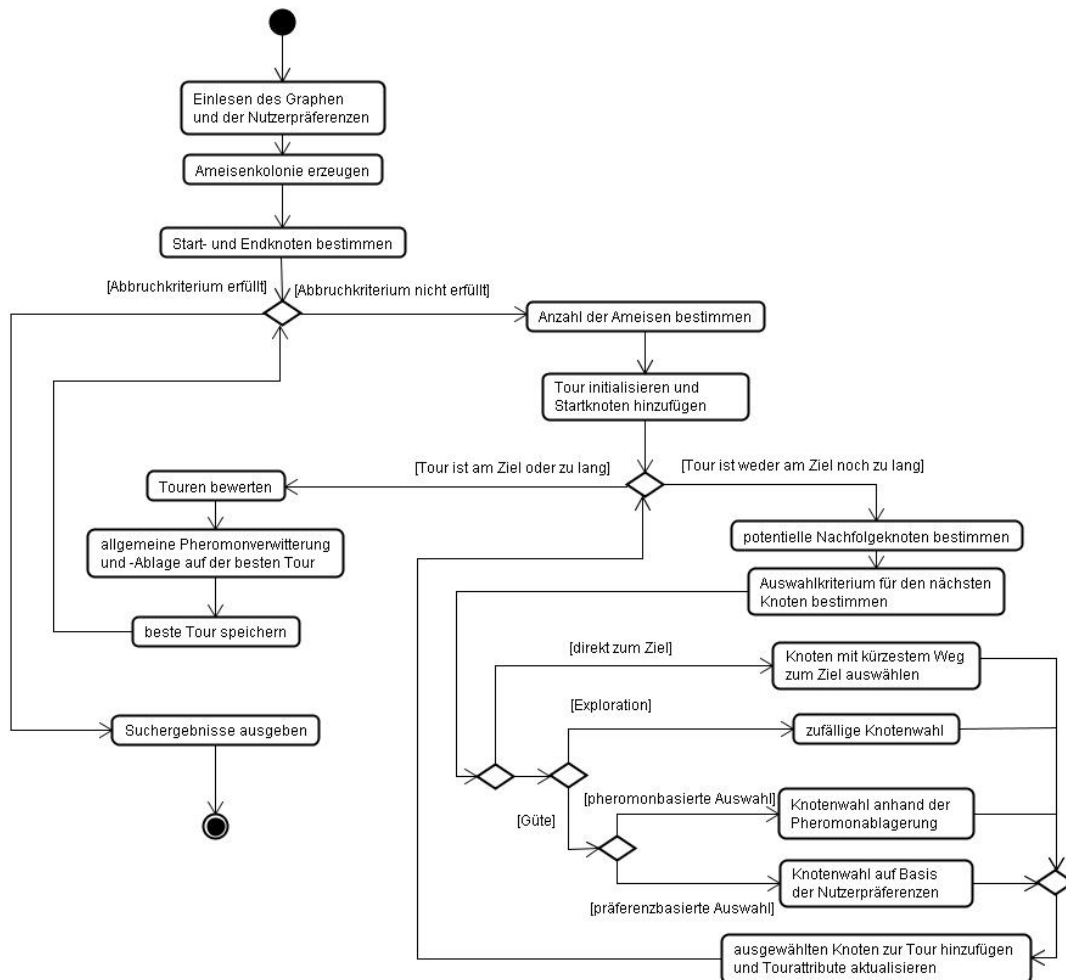


Abbildung 1: Ablauf der Routengenerierung

4 Zielfunktion zur Bewertung der Tourenkandidaten

Die Zielfunktion für eine Bewertung der möglichen Touren, also der Tourenkandidaten, ermittelt eine Maßzahl, auf deren Basis die Kandidaten hinsichtlich ihrer nutzerseitigen Eignung geordnet werden können. Die Eingabeparameter der Zielfunktion sind dabei ein Tourkandidat inklusive der Eigenschaften der Tourelemente sowie die nutzerseitig definierten Präferenzen hinsichtlich der Bewertungskriterien einer Tour.

Die Toureigenschaften werden den nachfolgend vorgestellten Attributen des Wegnetzgraphen entnommen. Als Testgebiet wurden exemplarisch die Ketten des *Wettersteingebirges* sowie des *Mieminger Gebirges* ausgewählt.

4.1 Attributierung des Graphen

Die Bereitstellung eines Wegenetzgraphen erfolgte anhand einer manuellen Digitalisierung auf Basis des Kartenmaterials des Deutschen Alpenvereins. Der erstellte Graph umfasst 2.767 Kanten und 1.936 Knoten. Unter den Knoten befinden sich 259 POIs, bei denen es sich in 60 Fällen um ÖPNV-Haltestellen sowie um 34 Startpunkte einer Wanderung bei PKW-Anreise handelt. Die anderen Fälle umfassen Hütten und Restaurants, Gipfel sowie sonstige markante Punkte. Ihre Kennzeichnung erfolgte anhand des Kartenmaterials. Auf gleiche Weise wurden Informationen zur Beschaffenheit der Wege und etwaiger Wegmarkierungen erhoben. Die Konstruktion eines digitalen Geländemodells auf Basis der SRTM-Daten des U.S. Geologischen Survey und der NASA ermöglichte die Ableitung von Informationen zur Höhe eines Knotens sowie der Neigung des Geländes an einem Kantenabschnitt. Eine heuristische Ableitung eines landschaftlichen Schönheitswertes der Kanten erfolgte anhand einer GIS-basierten Analyse, bei der die Entfernung von Lärmquellen wie Ortschaften und Straßen, besondere landschaftliche Höhepunkte sowie die anzunehmende Fernsicht Berücksichtigung fanden [8].

4.2 Bewertung von Tourenelementen hinsichtlich lokaler Kriterien

Die lokale Bewertung von Tourenelementen beruht auf der Betrachtung der Kantenattribute des Graphen. Dabei werden für jede Kante i der Wegtyp p_i und die Wegmarkierung s_i als qualitative Kriterien sowie die landschaftliche Schönheit b_i und die Neigung n_i des Streckenabschnittes als quantitative Kriterien untersucht.

Den Ausprägungen der qualitativen Attribute werden durch den Nutzer Akzeptanzwerte a zugeordnet, welche Bevorzugung, Indifferenz und Abneigung gegenüber einer Streckeneigenschaft repräsentieren. Durch Multiplikation mit einem Gewichtungsfaktor w_p bzw. w_s wird die Teilgüte einer Kante hinsichtlich des Wegtyps und der Wegmarkierung ermittelt. Die Gewichtungsfaktoren werden dabei derart aus den nutzerseitigen Vorgaben berechnet, dass die Gesamtgewichtung der Teilgütesummanden inklusive der landschaftlichen Schönheit auf den Wert 1 normiert ist.

Für die Bewertung der Neigung n einer Kante wird ein Strafterm eingeführt. Im Fall einer Überschreitung der nutzerseitig definierten Maximalneigung n_a wird die aus den anderen Kriterien ermittelte Güte der Kante reduziert. Der Strafterm wächst dabei exponentiell mit der Abweichung von n_a . Basis des Strafterms ist der nutzerseitig belegte Gewichtungsfaktor w_n . Durch seine Konstruktion nimmt dieser Term nur Werte größer oder gleich 1 an.

Die Güte g_i einer Kante wird durch die Addition der Teilgüte für jedes Kriterium mit Ausnahme der Neigung ermittelt und mithilfe einer Division durch den auf der Abweichung der Kantenneigung von den Nutzervorgaben basierenden Strafterm korrigiert. Die Güte einer Kante nimmt damit nur Werte zwischen 0 und 1 an (vgl. Formel 1). Der derart ermittelte Gütewert findet sowohl beim präferenzbasierten Selektionsmechanismus

als auch bei der Gesamtbeurteilung eines Tourenvorschlags Verwendung.

$$g_i = \frac{w_b \times b_i + w_p \times a(p_i) + w_s \times a(s_i)}{w_n^{\Delta n_i}}$$

$$\text{mit } \Delta n_i = \begin{cases} 1 & \text{wenn } n_i \leq n_a \\ \frac{n_i}{n_a - 1} & \text{wenn } n_i > n_a \end{cases} \quad (1)$$

$$a(p_i), a(s_i) \in \{0; 0.5; 1\}$$

4.3 Gesamtbewertung eines Tourenvorschlages

Die Güte eines Tourkandidaten ermittelt sich aus der Güte ihrer Kanten sowie der Verstöße gegen die Nutzerpräferenzen hinsichtlich der globalen Kriterien. Dazu werden die Gütewerte der Kanten mit ihrer Gehzeit gewichtet summiert und durch die Dauer der Gesamttour dividiert ¹. Auf diese Weise ermittelt die Zielfunktion eine Güte eines Tourenvorschlags pro Gehminute, die aufgrund der Eigenschaften der Gütewerte der Kanten zwischen 0 und 1 normiert ist und einen Vergleich der Tourenvorschläge ermöglicht.

Die gewünschten globalen Eigenschaften der Gesamttour können als Nebenbedingungen der Optimierung angesehen werden [9]. Ihre Einhaltung wird in Analogie zur Behandlung der Neigungsabweichung bei der Kantenbetrachtung mittels eines Penalty-Verfahrens gewährleistet. Der Wert der einzelnen Strafterme wächst dabei mit der Stärke des Verstoßes gegen die Nutzervorgaben und der Bedeutung, die der Einhaltung der Vorgaben seitens der Nutzer beigemessen wird. Die Berechnung des Strafterms mittels einer Potenzfunktion mit einem experimentell ermittelten Wert ermöglicht es, geringfügige Abweichungen von den Vorgaben explizit zu gewähren.

Beispielhaft zeigt die Formel (2) die Ermittlung des Strafterms p_{Time} für die Über- oder Unterschreitung der nutzerdefinierten Zielzeit.

$$p_{Time} = \left(1 + \frac{|t_a - t_{Tour}|}{t_a}\right)^{4+2 \times w_t} \quad (2)$$

$$\text{mit } w_t \in \{0; 0.5; 1\}$$

Eine Überprüfung der nutzerseitigen Vorgaben erfolgt ebenfalls hinsichtlich des Gesamthöhenunterschiedes der Tour (p_{Elev}), der Inklusion gewünschter POI-Typen in der Menge der besuchten Knoten (p_{Poi}) sowie einer etwaig vorgegebenen Vermeidung von Seilbahnen (p_{Cable}). Des Weiteren erfolgt eine einfache topologische Überprüfung der Tour, bei der der entsprechende Strafterm p_{Top} in Abhängigkeit vom zeitlichen Anteil der mehrfach besuchten Kanten an der Gesamtgehzeit sowie des Anteils der mehrfach

¹Die Ermittlung der Gehdauer erfolgt hierbei anhand der Modifikation der nutzerseitig vorgegebenen Grundgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kantenlänge.

besuchten Knoten an der Gesamtknotenzahl der Tour steigt. Für die Bestimmung der Güte eines Tourenkandidaten ergibt sich somit die folgende Zielfunktion (3):

$$g_{Tour} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \times t_i}{t_{Tour}} \times p_{Time} \times p_{Elev} \times p_{Poi} \times p_{cable} \times p_{Top} \quad (3)$$

5 Anwendung des entwickelten Verfahrens

5.1 Demonstration des Verfahrens anhand beispielhafter Nutzeranfragen

Zur Überprüfung des vorgestellten Ansatzes erfolgte die Implementierung eines Prototyps in Java. Der Algorithmus wurde anhand verschiedener Szenarien getestet. Beispielhaft wird die Suche nach einer frei zu ermittelnden Rundtour aufgezeigt, bei der die Anreise per ÖPNV erfolgen soll. Das Szenario beinhaltet die Ermittlung einer Wanderung von etwa 240 Minuten Dauer und einer absoluten Höhendifferenz von rund 700 Metern, bei der Straßen gemieden werden sollten. Weitere Vorgaben betreffen die Vermeidung von Steigungen über 10 Prozent sowie den gewünschten Besuch eines Gipfels, einer Hütte oder eines anderer POIs. Bei der Bewertung der Tourenkandidaten wurde der Einhaltung der Vorgaben hinsichtlich der Höhendifferenz, des Wegtyps sowie der Steigung besondere Bedeutung zugewiesen. Die Suche wurde mit je 4 Ameisen pro Startknoten über 50 Iterationen ausgeführt.

Abb. 2 zeigt eine Darstellung der besten ermittelten Tour als Routen-Event in ArcMap. Bei ihrer Analyse lässt sich feststellen, dass die in der 20. Iteration erstellte Tour bezüglich der Dauer (246 min) und Höhenmeter (648 m) als gelungen gelten kann. Der zunächst unplausibel erscheinende Abstecher erklärt sich durch den dadurch möglichen Besuch der Seilbahnstation, die als Hüttenäquivalent gilt. Die Lage von ÖPNV-Haltestellen erschwert die Vermeidung von Straßen bei der Routengenerierung. Es ist jedoch gut erkennbar, dass diese weitestgehend gemieden werden. Im südlichen Verlauf der Tour ist die Benutzung der Straße der hohen Neigung der Alternativwege geschuldet. Insgesamt kann die erstellte Tour als plausibel eingestuft werden und demonstriert exemplarisch die Funktionsfähigkeit des Ansatzes.

5.2 Auswirkungen konkurrierender Optimierungsziele

Eine Untersuchung der berechneten Touren zeigt, dass ihre Güte stark von den gesetzten Vorgaben abhängt. Dies lässt sich sowohl auf die Eigenschaften des Graphen als auch auf die mathematische Problemstellung und ihre Umsetzung im Algorithmus zurückführen. Ziel der Wegsuche ist die Identifikation pareto-optimaler Wege und somit die Minimierung der anhand der Nutzervorgaben gewichteten Abweichung von den gewünschten

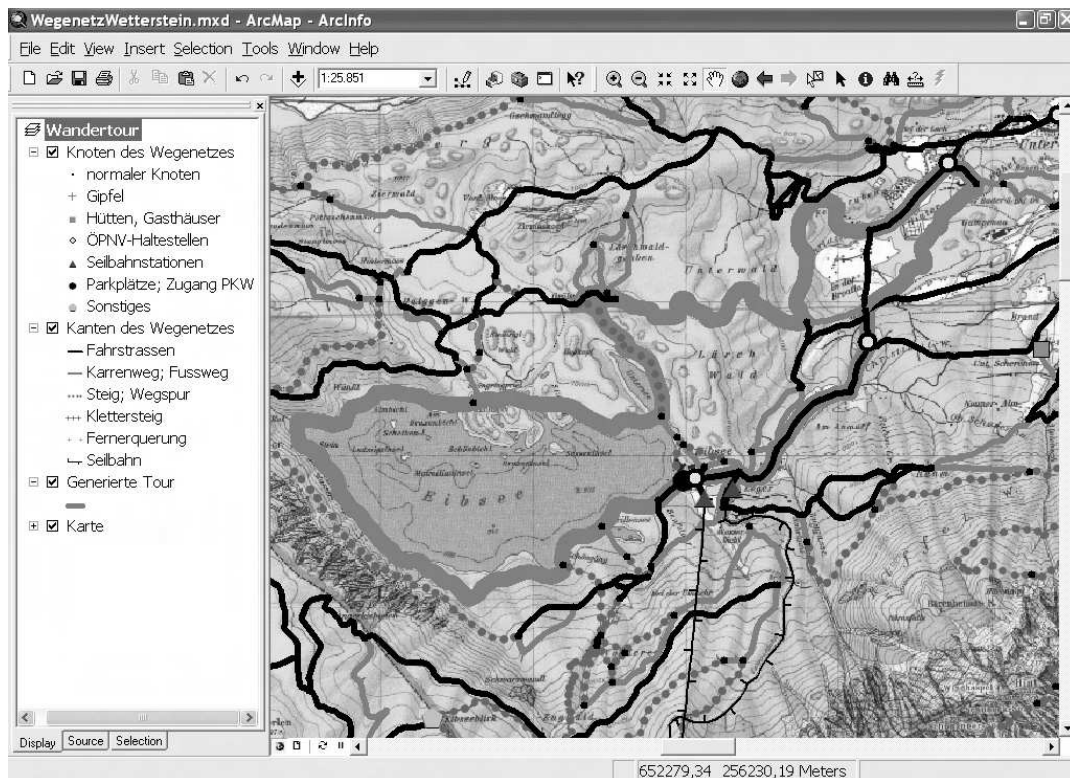


Abbildung 2: Anzeige eines generierten Tourenvorschlages in ArcMap. Der Tourenverlauf ist mittels der breiten Signatur eingezeichnet; Straßen sind schwarz dargestellt.

Tourattributen. Bei der Beurteilung eines Wegvorschlages ist somit die Gesamtheit der einzelnen Verstöße ausschlaggebend, da kein einzelnes Kriterium als maßgebend für die Bewertung angesehen werden kann. Der Gewichtung der einzelnen Kriterien in der Bewertungsfunktion kommt damit eine starke Bedeutung für die Eignung der Tourenvorschläge zu. Besondere Relevanz erhält sie, wenn die Nutzervorgaben derart gestaltet sind, dass der Graph keine Einhaltung aller Kriterien ermöglicht.

Die Auswirkungen dieser Kriterienkonkurrenz werden nachfolgend exemplarisch am Beispiel einer Rundwegsuche dargestellt, bei der ausschließlich die Beachtung der Vorgaben hinsichtlich der gewünschten Dauer und Höhenunterschiede zur Tourbewertung herangezogen werden. Als Ausgangspunkt der Tour wurde eine Bushaltestelle gewählt, die sich in einem Bereich des Wegenetzes mit starken Neigungsunterschieden befindet. Die gewünschte Tourdauer wurde mit 420 Minuten, die erstrebenswerte Höhendifferenz mit 750 m angegeben. Die Suche wurde mit 100 Ameisen über 100 Iterationen durchgeführt.

Dauer und Höhendifferenz sowie die Bewertung der ermittelten iterationsbesten Touren sind in Abb. 3 dargestellt. Auffällig ist die Anzahl der Touren, die hinsichtlich eines der Kriterien nahe am vorgegebenen Optimum liegen und eine unterdurchschnittliche Bewertung aufweisen. Besonders die Touren, deren Höhendifferenz beinahe genau den Vorgaben entspricht, liegen bezüglich der Tourdauer weit hinter den Vorgaben zurück und erhalten dadurch eine starke Minderbewertung. Des Weiteren lassen sich die Aus-

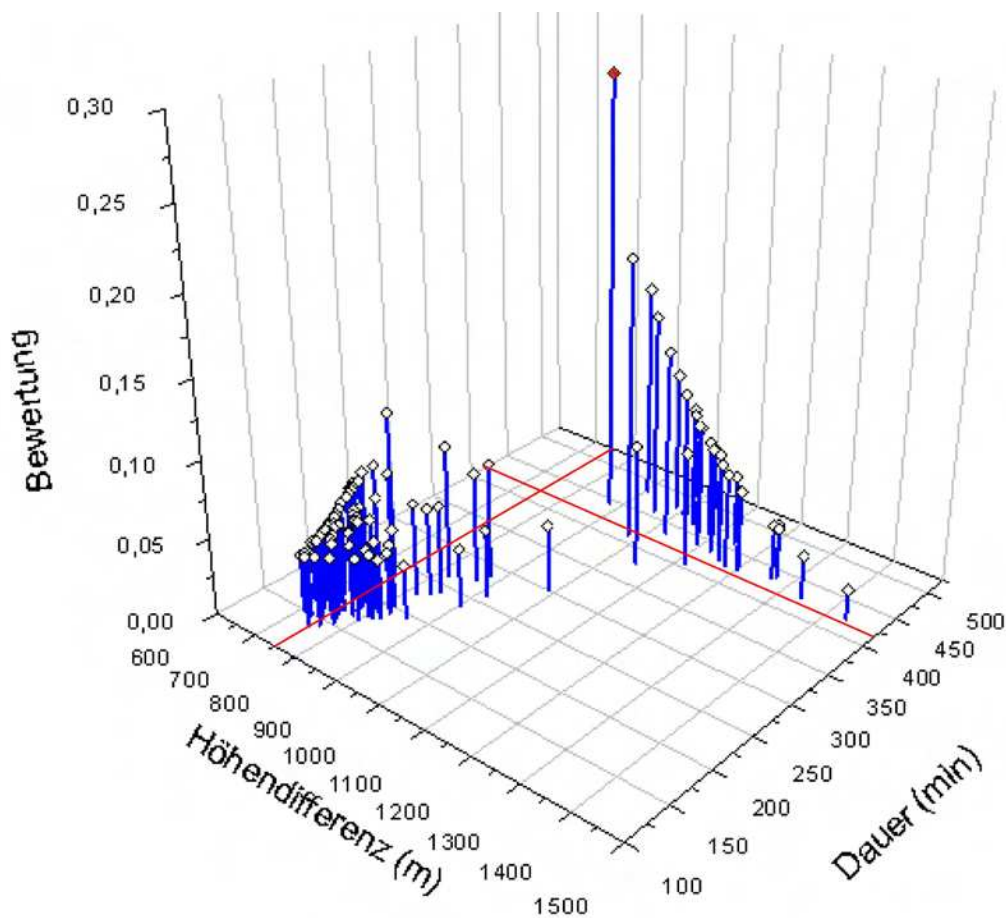


Abbildung 3: Tourenbewertungen bei konkurrierenden Optimierungszielen. Die Vorgaben bezüglich Tourdauer und Höhendifferenz sind auf den Achsen abgetragen.

wirkungen der Multiplikation der Strafterme bei jenen Tourkandidaten erkennen, deren Eigenschaften deutlich gegen beide Vorgaben verstoßen. Die bestbewertete Tour weist eine Dauer von 424 Minuten und einen Höhenunterschied von 876 Metern auf. Während andere Touren hinsichtlich eines der Kriterien näher an den Vorgaben liegen, liegt diese Tour in der gemeinsamen Betrachtung der Eigenschaften am nächsten am Pareto-Optimum.

6 Bewertung und Ausblick

Mit Hilfe der vorgestellten Anpassungen der ACO-Metaheuristik konnte die Generierung nutzerangepasster Wandervorschläge für zwei Arten von Wandertouren realisiert werden: die Erstellung von Rundtouren, bei denen ein geeigneter Startpunkt der Wanderung anhand der gewünschten Zugangsart ermittelt wird, sowie die Generierung von Wandervorschlägen mit vorgegebenem Start- und Endpunkt.

Die vorgestellte Zielfunktion führt zur Auswahl von Tourenvorschlägen, die den vorgegebenen Wegepräferenzen weitgehend entsprechen, eine starke Übereinstimmung mit den zeitlichen Vorgaben sowie einen überwiegend überzeugenden Verlauf aufweisen. Die Gewichtung der zahlreichen Kriterien, die bei der Bewertung der Tourenvorschläge berücksichtigt werden, erfolgte dabei weitgehend experimentell.

Auf Grundlage der bisherigen Testläufe muss konstatiert werden, dass weitere systematische Untersuchungen zum Feintuning der Parameter vorgenommen werden sollten. Dies betrifft vor allem jene Suchanfragen, bei denen es auf Grund der Eigenschaften des Wegenetzes zu einer Kriterienkonkurrenz hinsichtlich der Nutzervorgaben kommt. Des Weiteren kann eine Bereinigung der Touren um unplausible Mehrfachbegehungen und Stichwege sowie die explizite Unterstützung der Konstruktion konvexer Touren zu einer Verbesserung der Wegetopologie beitragen. Schließlich sollte eine die Stabilisierung der Tourenqualität identischer Suchanfragen unter anderem durch die Optimierung der Pheromonablage als Wissensbasis für eine globale Optimierung vorgenommen werden.

Der realisierte Prototyp demonstriert jedoch, dass die Anwendung einer ACO-Metaheuristik erfolgreich zur Erstellung plausibler und individueller Wandervorschläge eingesetzt werden kann. Die zahlreichen Konfigurationsmöglichkeiten und die skizzierten Erweiterungsmöglichkeiten zeigen zudem die große Flexibilität des Ansatzes.

Literatur

- [1] M. Joest, W. Stille: A User-Aware Tour Proposal Framework using a Hybrid Optimization Approach. In Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, 8.-9. Nov., Virginia, USA, S. 81-87. McLean, 2002.
- [2] F. Sayda, W. Reinhardt, E. Wittmann: Aufbau eines positionsbezogenen GI Service für Bergsteiger. Proceedings GIS /SIT 20.-21. März, Zürich, 2002.
- [3] L. Koppers, S. Schäfer: Touren-Routing mit GIS - Ein neuer Ansatz: das Seilanpassungsverfahren. In GIS, 12(4), S. 19-23. 1999.
- [4] A. Cziferszky: Automatisches Generieren von Wanderrouen. Diplomarbeit, Institut für Geoinformation, Technische Universität Wien, unveröffentlicht, 2002.
- [5] A. Zipf, S. Röther: Tourenvorschläge für Stadttouristen mit dem ArcView Network Analyst. In W. Liebig (Hrsg.), ArcView Arbeitsbuch, S. 135-160. Hüthig Verlag, Heidelberg, 2000.
- [6] Deutscher Wanderverband & Deutscher Tourismusverband e.V.: Wanderbares Deutschland. Qualitätsoffensive Wandern. Empfohlene Gütekriterien für Wanderwege, wanderfreundliche Gastgeber und Wanderprospekte. Kassel, 2003.
- [7] M. Dorigo, T. Stützle: The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications and Advances. Technischer Report IRIDIA-2000-32, FB Informatik, TU Darmstadt, 2000.
- [8] R. Cyganski: Generierung nutzerangepasster Wandertouren - Erstellung eines ACO-basierten Prototyps zur Tourenberechnung. Diplomarbeit, Institut für Geographie, Humboldt-Universität zu Berlin, unveröffentlicht, 2006.
- [9] H.-J. Zimmermann: Operations Research. Methoden und Modelle. Für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte und Informatiker. Vieweg, Wiesbaden, 2005.

Kontakt

Rita Cyganski

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

in der Helmholtz Gemeinschaft

Institut für Verkehrsforschung

Rutherfordstr. 2

D 12468 Berlin

e-mail: Rita.Cyganski@dlr.de