

Ausarbeitung im Rahmen des Seminars:

„Innovative Verfahren für Verkehr und Logistik“

Thema:

Funktionsweise von Ameisensystemen (ACO) für
die Straßennavigation

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung	3
1.1 Ameisen in der Natur	3
1.2 Kommunikation der Ameisen	3
1.3 Probabilistische Entscheidungsfindung.....	3
1.4 Wegoptimierung	5
1.5 Verdampfung der Spurpheromone	6
2 Nutzen in der Verkehrsinformatik	6
2.1 Ant Colonisation Optimisation.....	7
2.1.1 Künstliche Ameisen	8
3 AntNet- Algorithmus	9
3.1 Algorithmische Abläufe	10
3.2 Struktur der Knoteninformationen	10
3.2.1 Pheromonmatrix	10
3.2.2 Lokales statistisches Modell.....	11
3.3 Wegentscheidung der Vorwärtsameisen	11
3.4 Aktualisierung der Knoteninformationen.....	11
3.4.1 Aktualisierung des lokalen statistischen Modells	12
3.4.2 Aktualisierung der Pheromonmatrix	12
4 Literaturverzeichnis	14

1. Einleitung

Ameisenalgorithmen werden zur Lösung von komplexen statischen sowie dynamischen Problemen verwendet. Der Ursprung der Vorgehensweise dieser Algorithmen ist in der Natur zu suchen. Natürliche Ameisen haben als soziale Insekten eine kollektive Intelligenz. Die einzelne Ameise hat ein begrenztes Maß an Intelligenz. Arbeitet sie aber im Kollektiv mit anderen Ameisen ihres Ameisenstaates zusammen, bildet sich eine als nicht zu unterschätzende Intelligenz.

Diese Eigenschaft, sich untereinander zu unterstützen und dadurch den Effekt zu erzielen, dass die Gemeinschaftsleistung größer ist als die Summe der Einzelleistungen, kann in der Verkehrsinformatik genutzt und über entsprechende Algorithmen umgesetzt werden.

1.1 Ameisen in der Natur

Besonders interessant für die Verkehrsinformatik zeigt sich die Eigenschaft der Wegoptimierung von Ameisenkolonien. Ameisen koordinieren Ihre Futtersuche und suchen den für sich schnellsten Weg zwischen Ameisenhügel und der Futterquelle. Bildet sich ein Hindernis zwischen dem Ameisenhügel und der Futterquelle wird sofort eine Alternativroute ermittelt und die Ameisenstrasse umgeleitet.

1.2 Kommunikation der Ameisen

Ameisen kommunizieren nicht direkt miteinander, um Routeninformationen zu verteilen. Viel mehr liegt hier eine indirekte Kommunikation über Spurpheromone vor. Spurpheromone werden von den Ameisen kontinuierlich auf Ihrer Route abgesondert. So können die anderen Ameisen die optimale Route zwischen Ameisenhügel und Futterquelle finden und nutzen. Diese Spurpheromone verflüchtigen mit der Zeit, so dass alte Markierungen weniger Relevanz tragen als neue. Kommt nun ein Hindernis in den Weg der Ameisen, bekommt durch die Verflüchtigung der alten Spurpheromone schnell die alte Ameisenstraße eine niedrigere Relevanz als die neue Ameisenstraße. Das Hindernis wird somit von den Ameisen umgangen.

1.3 Probabilistische Entscheidungsfindung

Nachdem die Kommunikation zwischen den Ameisen nun beschrieben ist, soll im Folgenden dargestellt werden, wie sich die Ameisen auf Grundlage einer Wahrscheinlichkeitsentscheidung für den einen oder anderen Weg entscheiden.

Mit Hilfe einer binären Brücke wurde von Deneubourg et. al. (1990) unter kontrollierten Bedingungen die Futtersuche der Ameisen untersucht.

Der Versuchsaufbau ist folgendermaßen zu beschreiben:

Es ist ein Ameisennest und eine Futterquelle vorhanden. Zwischen diesen ist die binäre Brücke aufgebaut. Beide möglichen Wege dieser binären Brücke stellen dieselbe Entfernung zwischen dem Ameisennest und der Futterquelle dar. Im Experiment werden nun im Ameisennest die Ameisen laufen gelassen und es stellt sich heraus, dass sich nach einer kurzen Phase der Wegfindung alle Ameisen für einen gemeinsamen Weg entscheiden.

Beschreiben lässt sich dieses Verhalten folgendermaßen:

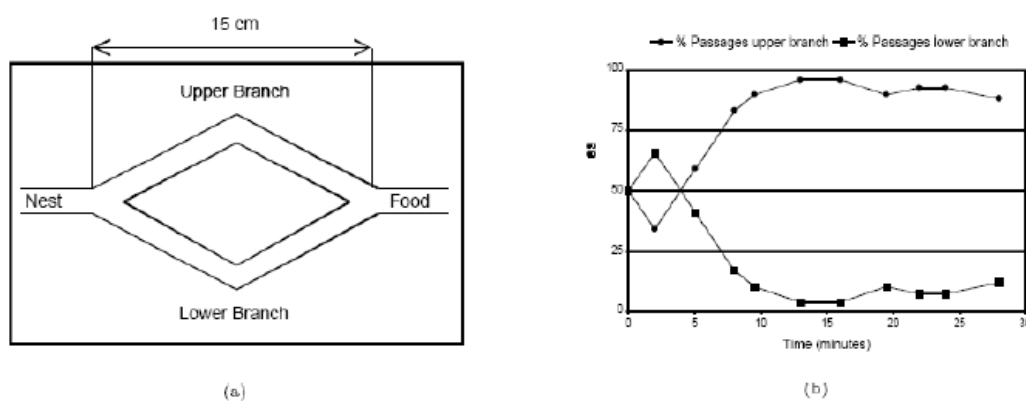


Abbildung 1.1 (a) Schematischer Versuchsaufbau der binären Brücke
(b) Typischer Verlauf des Experiments (nach Deneubourg et al. 1990)

Wir haben 2 Wege. P_O (oberer Weg) und P_U (unterer Weg). Zu Beginn des Experimentes gehen werden P_O und P_U gleichverteilt genutzt. Nach einiger Zeit steigt die Konzentration der Pheromone auf P_O , da zufällig ein paar mehr Ameisen den Weg P_O genutzt haben. Durch die stärkere Spurpheromonkonzentration auf P_O steigt die Wahrscheinlichkeit, dass neue Ameisen sich für den Weg P_O entscheiden. Dies erhöht wiederum die Pheromonkonzentration auf P_O .

Bei der Annahme, dass keine Verdunstung der Spurpheromone eintritt, kann man zur Entscheidungsfindung folgende Wahrscheinlichkeitsformel einsetzen:

$$P_O(m) = \frac{(O_m + k)^h}{(O_m + k)^h + (U_m + k)^h}$$

Variablendefinition:

m = Anzahl der Ameisen, die bereits die Brücke passiert haben

O_m = Anzahl der Ameisen, die den oberen Weg gewählt haben

U_m = Anzahl der Ameisen, die den unteren Weg gewählt haben

$h = 20$

$k = 2$

1.4 Wegoptimierung

Mit Hilfe der o.g. Formel wird nicht nur ein einheitlicher Weg für alle Ameisen gefunden, sondern auch der zeitoptimale. Dies kann man mit folgendem Beispiel belegen:

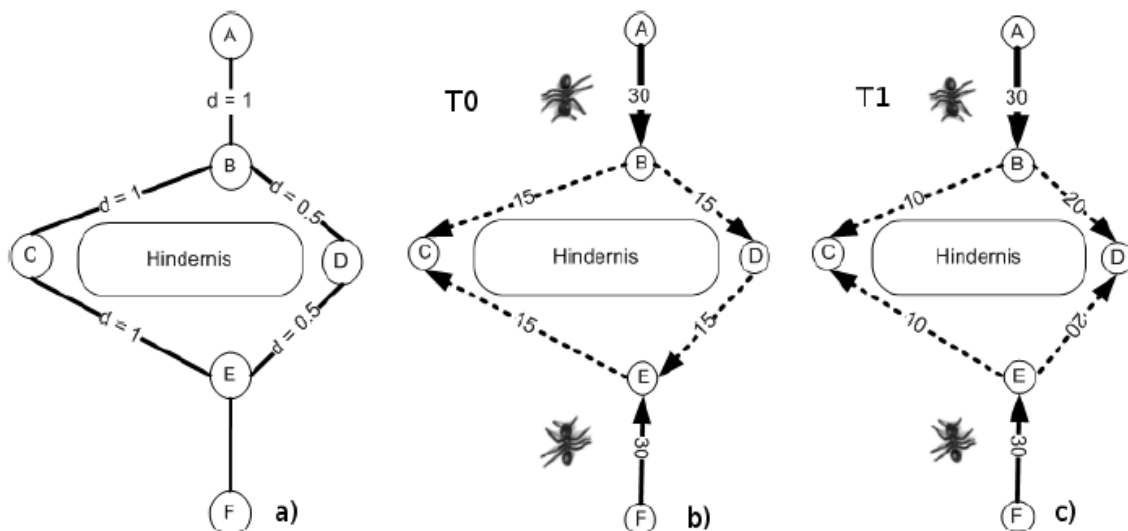


Abbildung 1.2 Pheromonspuren und Herausbildung des kürzesten Weges (vgl. Walther, 2006)

Es ist wiederum eine binäre Brücke als Ausgangsbasis vorhanden. Diesmal sind die möglichen Wege allerdings nicht gleichlang, sondern der Weg P_L (BCE) verursacht Kosten von 2 Zeiteinheiten, der Weg P_R (BDE) verursacht dagegen nur Kosten von einer Zeiteinheit. Als Ausgangsbasis gehen wir von einer pheromonfreien Umwelt aus.

Zum Zeitpunkt T_0 erreichen 30 Ameisen von F aus den Punkt E und von A aus den Punkt B. Zum Zeitpunkt T_1 beträgt die Pheromonkonzentration P_{BC} 15, die von den 15 Ameisen, die zufällig den Weg P_L gewählt haben und von B nach C gelaufen sind.

Zum selben Zeitpunkt beträgt die Pheromonkonzentration P_{BD} bereits 30, da sowohl die von A gestarteten Ameisen als auch die von F gestarteten Ameisen diesen Weg bereits mit ihren Pheromonen markiert haben. Dies führt dazu dass in Zukunft immer mehr Ameisen den kürzeren Weg nehmen und immer weniger Ameisen den langen Weg wählen.

1.5 Verdampfung der Spurpheromone

In den bisherigen Betrachtungen zur probabilistischen Entscheidungsfindung und zur Wegoptimierung der Ameisen wurde davon ausgegangen, dass die Konzentration der Pheromone ständig steigt. Dies würde allerdings dazu führen, dass historische Wege weiterhin eine große Bedeutung haben würden und dass es, je länger ein Weg existiert, desto länger dauern würde, bis sich beim Auftreten eines Hindernisses eine Alternativroute bewährt hat.

Aus diesem Grund wird die Konzentration der Pheromone durch Verdampfung reduziert. Dies hat zur Folge, dass alte Pheromonspuren nicht mehr die Relevanz haben wie es neuere haben. Um eine optimale Lösung zu finden ist es notwendig, einen Kompromiss zwischen der Verstärkung gefundener Lösungen und der Erforschung neuer Lösungswege zu finden.

2 Nutzen in der Verkehrsinformatik

Ein Navigationsvorgang ist nichts anderes als die Suche nach Futter der Ameisen. Es gibt einen Ausgangspunkt (Ameisenhügel) und einen Zielpunkt (Futterquelle). Zwischen diesen 2 Objekten gibt es eine Menge an möglichen Verbindungen. Staus (Hindernis) machen die Suche nach einer Alternativroute notwendig.

Aktuelle Navigationssysteme nutzen hauptsächlich statische Informationen aus Kartenmaterial, welches sich auf dem Navigationsgerät befindet. Angereichert werden diese mit dynamischen Informationen über das TMC (Traffic Message Channel), welche allerdings nur zeitverzögert und ungenau sind. Es wird nur gemeldet, dass ein Stau vorhanden ist, dies führt dann u.U. zu einer Neuberechnung der Route unter Berücksichtigung der TMC-Meldung, auch wenn die Relevanz relativ niedrig ist, da es sich nur um einen „kleinen“ Stau handelt. Genau hier ist der Vorteil eines Ameisensystems zu sehen. Werden Ameisensysteme zur Berechnung der besten Routen eingesetzt, kann äußerst dynamisch auf Änderungen im Straßensystem reagiert werden.

In einem Systementwurf zu Ameisensystemen in der Verkehrsinformatik (ARIS= Ameisenbasiertes RoutenInformationsSystem) ist dargestellt, dass das Ameisensystem keinen direkten Zugriff der Verkehrsteilnehmer benötigt. In Abbildung 2.1 ist dieser Systementwurf skizziert. Die für die Gewichtung der Kanten benötigten Fahrtzeiten aus den verschiedenen Quellen (Kameras, Induktionsschleifen, Floating Car Data) werden in das Zeiterfassungssystem eingespeist und dort vorgehalten. Relevante Änderungen werden dann

dem Ameisensystem gemeldet, so dass die Gewichtung der Kanten (Wege) angepasst werden kann.

Das in dieser Ausarbeitung beschriebene Ameisensystem verarbeitet wie im Weiteren beschrieben die Daten und stellt alle möglichen Routen in das Routenanfragesystem. Hier können sich die Verkehrsteilnehmer die aktuell besten Routen abrufen.

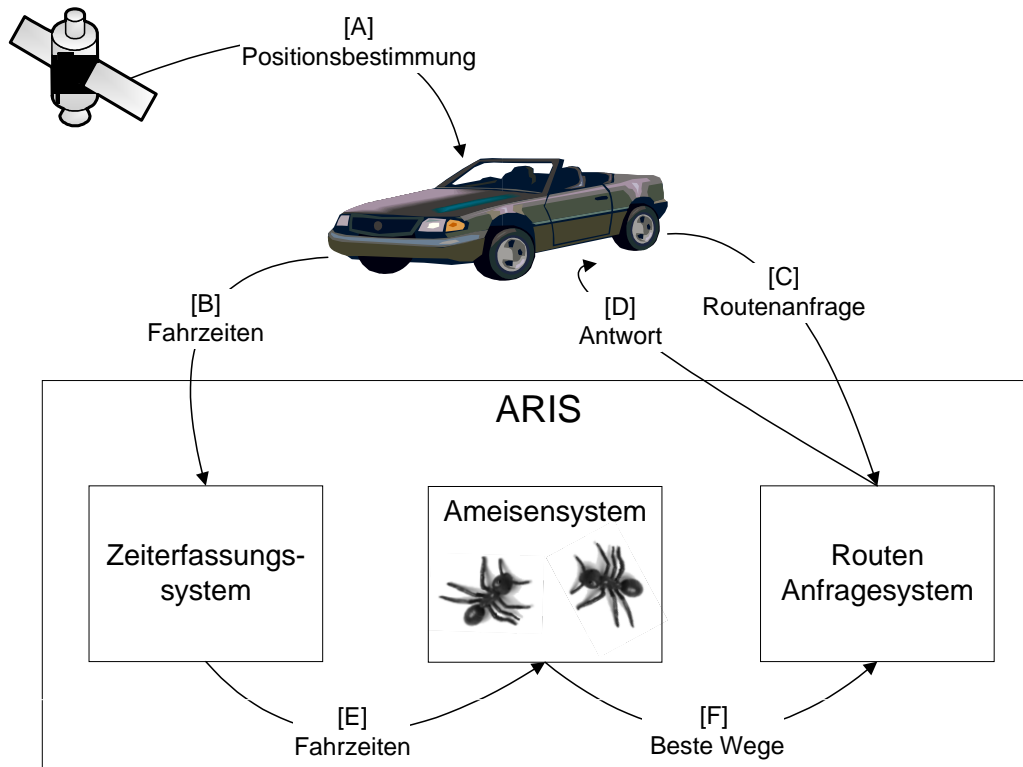


Abbildung 2.1 ARIS-Systementwurf (Walther, 2006)

Das Zeiterfassungssystem und Routenanfragesystem sind kein Teil dieser Ausarbeitung.

2.1 Ant Colonisation Optimisation

Die Bezeichnung Ant Colonisation Optimisation fasst algorithmische Strukturen zusammen, die zur Optimierung künstliche Ameisen verwendet. Viele Eigenschaften der künstlichen Ameisen sind analog zu denen echter Ameisen, es werden allerdings auch Eigenschaften zu den künstlichen Ameisen hinzuaddiert, die für die Lösung einer konkreten Aufgabenstellung notwendig sind.

Im Allgemeinen besteht die Aufgabe von diesen Algorithmen darin, innerhalb eines Graphen $G=(N,E)$, der ein Problem beschreibt, einen Lösungsweg L zu finden, der bezüglich der Kosten optimal ist. G wird durch die Menge N (Knoten) und die E (Kanten) beschrieben. Einer Kante $e_{ij} \in E$ wird ein Gewicht w_{ij} zugeordnet. Dieses Gewicht beschreibt die Kosten

für den Übergang von $n_i \in N$ nach $n_j \in N$. Die Kanten können je nach Optimierungskriterium gewichtet werden.

2.1.1 Künstliche Ameisen

2.1.1.1 Vorwärts- und Rückwärtsameisen

In ACO Systemen werden nach Dorigo u. Stützle (2004) sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtsameisen eingesetzt. Dies ist notwendig, da eine direkte Umsetzung des realen Verhaltens der Ameisen nicht möglich ist bzw. zu schlechten Lösungen des Optimierungsproblems führen würde. Wichtigster Punkt ist die Zyklenbildung, die durch die Unterscheidung von Vorwärts- und Rückwärtsameisen verhindert wird.

Die Vorwärtsameisen suchen die Lösung für ein gestelltes Problem. Hierbei durchlaufen Sie den Graphen vom Quellknoten zum Zielknoten. Die Wegwahl basiert an jedem Knoten auf einer Wahrscheinlichkeitsentscheidung. Eine Gewichtung der Entscheidung wird mit Hilfe der Spurpheromone auf den Knoten erzielt. Die Vorwärtsameise speichert jeden Knoten, den sie bisher besucht hat. Des Weiteren schüttet eine Vorwärtsameise keine Pheromone aus, da dies die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Zyklen erhöhen würde.

Die Rückwärtsameise wird gestartet, sobald die Vorwärtsameise ihren Zielknoten erreicht hat. Nachdem die Zyklen aus dem Weg der Vorwärtsameise eliminiert wurden, folgt die Rückwärtsameise dem Weg der Vorwärtsameise und markiert diesen mit Spurpheromonen.

2.1.1.2 Gemeinsamkeiten zu realen Ameisen

Künstlichen und realen Ameisen haben die Gemeinsamkeit, dass sie aus einer Kolonie von kooperierender Individuen bestehen und Pheromone zur Kommunikation einsetzen (keine direkte Kommunikation zwischen den einzelnen Individuen möglich). Durch kontinuierliche Bewegungen finden beide Gruppen schnellste Wege mit Hilfe von stochastischen Entscheidungsfaktoren, die nur auf lokale Informationen ausgelegt sind.

2.1.1.3 Unterschiede zu realen Ameisen

Im Gegensatz zu natürlichen Ameisen bewegen sich die künstlichen Ameisen in einer diskreten Welt und haben ein Gedächtnis, in dem beliebige Informationen gespeichert werden können. Die Pheromonausschüttung kann hierdurch abhängig von der Lösungsgüte dosiert

werden. Des Weiteren gibt oftmals keine direkte Pheromonausschüttung, sondern verzögert (erst auf dem Rückweg).

3 AntNet- Algorithmus

Im Folgenden wird mit dem AntNet-Algorithmus ein ACO-Algorithmus näher vorgestellt, der in der Verkehrsinformatik genutzt werden kann.

a. Pheromontabellen

Next \ Dest	C	G	E
A	0.3	0.65	0.05
B	0.6	0.35	0.05
C	0.9	0.05	0.05
D	0.9	0.05	0.05
E	0.9	0.05	0.05
G	0.6	0.35	0.05

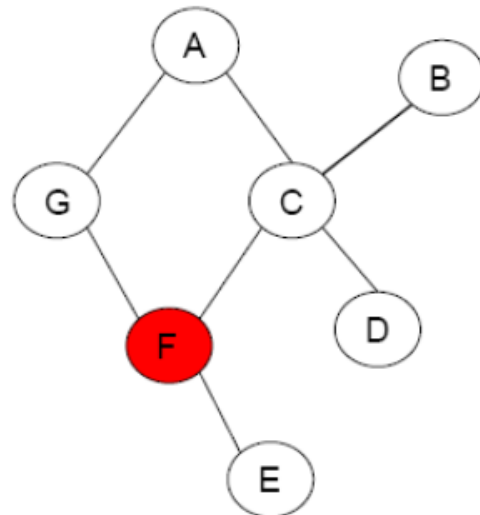


Abbildung 3.1 Pheromontabelle des Knotens F

Wie bereits bei Punkt 2.1 wird das Netz, durch das navigiert werden soll durch einen Graphen $G(N,E)$ beschrieben. N stellt wiederum die Menge der Knoten dar, E die Menge der Verbindungen zwischen den Knoten. Zur Wegwahl sind an jedem Knoten Pheromontabellen vorhanden. In diesen Tabellen ist die Wahrscheinlichkeiten hinterlegt, welche Route zum Erreichen des Ziels genutzt wird. Die Erstellung und Pflege dieser Pheromontabellen ist das Problem, welches mit Hilfe der Ameisenalgorithmen optimiert werden soll.

In Kommunikationsnetzen laufen die Vorwärtsameisen parallel zu den Datenpaketen in den Kommunikationsnetzen. Hier ist ein entscheidender Unterschied zwischen den Kommunikationsnetzen und den Verkehrsnetzen, da sich die Ameisen bei den Verkehrsnetzen in einem virtuellen Netz bewegen und so Informationen über die den Zustand sammeln.

Die Pheromontabellen beinhalten für jeden benachbarten Knoten eine Spalte, für jedes mögliche Ziel eine Zeile. So kann man mit Hilfe dieser Pheromontabellen an jedem beliebigen Knoten den günstigsten Folgepunkt für ein beliebiges Ziel ermitteln. Die Spurpheromonausschüttung und Spurpheromonverdampfung wird durch eine Aktualisierung der Pheromontabellen mit Hilfe von Rückwärtsameisen realisiert.

3.1 Algorithmische Abläufe

Der Ablauf des AntNet-Algorithmus wird in den folgenden Punkten beschrieben:

- An allen Knoten des Netzes werden in definierten Zeitabständen Ameisen asynchron gestartet. Den Ameisen wird zufällig ein Zielknoten aus dem Netz zugeordnet.
- Es gibt keine Kommunikation zwischen den Ameisen, lediglich die indirekte Kommunikation über die Pheromontabellen, die in den Knoten abgelegt sind.
- Jede Ameise bewegt sich von Knoten zu Knoten im Netz. An jedem Knoten wird anhand der Pheromontabelle im Knoten und dem Gedächtnis der Ameise eine Wahrscheinlichkeitsentscheidung getroffen, welcher Knoten als nächstes besucht wird.
- Jede Ameise sammelt Informationen über den zurückgelegten Weg, die besuchten Knoten und Kanten sowie weitere Informationen (z.B. Maß für die Verstopfung der genutzten Kanten) über den Weg und speichert diese ab.
- Sobald die Ameise den Zielknoten erreicht hat, bewegt sie sich denselben Weg wieder zurück bis zum Startknoten. Auf diesem Weg werden die Knoten aktualisiert. Anhand der Informationen, die die Ameise auf Ihrem Hinweg gesammelt hat, wird die Pheromonausschüttung dosiert.
- Hat die Ameise ihren Startknoten wieder erreicht, wird sie aus dem System entfernt.

3.2 Struktur der Knoteninformationen

3.2.1 Pheromonmatrix

AntNet gehört zu den ACO-Algorithmen und verwendet somit die für diese Algorithmen typischen Pheromonspuren zur Optimierung der Lösungen.

In jedem Knoten wird eine zweidimensionale Pheromonmatrix gespeichert. Diese beinhaltet für jede Kante eine Spalte und für jeden möglichen Zielknoten außer dem aktuellen eine

Zeile. Ein Pheromonwert gibt die Anziehung der Kante für den jeweiligen Zielknoten an. Die Pheromonmatrix ist zeilenweise normalisiert, so dass gilt:

$$\sum_{j \in N_i} \tau_{jd} = 1,$$

wobei N_i die Menge aller Nachbarn des betrachteten Knoten ist.

3.2.2 Lokales statistisches Modell

Zusätzlich zur Pheromonmatrix beinhaltet jeder Knoten ein lokales statistisches Modell. Hier werden für jeden Möglichen Zielknoten des Graphen der Mittelwert und die Varianz aller erfassten Fahrzeiten gespeichert. Des Weiteren wird ein gleitendes Beobachtungsfenster definiert, um die beste Zeit in einem definierten Zeitfenster zu erfassen.

3.3 Wegentscheidung der Vorwärtsameisen

Die Aufgabe der Vorwärtsameise ist es, einen Weg vom Startknoten n_s zum Zielknoten n_d zu suchen und Informationen über diesen Weg zu speichern. Um Zyklen nicht zu begünstigen, werden bereits besuchte Knoten bei der Wegwahl nicht berücksichtigt. Nur wenn alle Nachbarknoten bereits besucht wurden, werden diese für die Wegwahl wieder freigegeben. Mit Hilfe der Pheromonkonzentration wird die Wahrscheinlichkeit P_{ijd} , dass eine Ameise im Knoten n_i mit dem Ziel n_d als nächsten Knoten n_j wählt, ermittelt.

$$P_{ijd} = \frac{\tau_{ijd} + \alpha \cdot \eta_{ij}}{1 + \alpha(|N_i| - 1)}$$

mit

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{q_{ij}}{\sum_{k=1}^{|N_i|} q_{ik}}$$

Hierbei gibt q_{ij} das Maß der Verbindung zwischen n_i und n_j an.

3.4 Aktualisierung der Knoteninformationen

Hat eine Vorwärtsameise Ihr Ziel erreicht, wird eine Rückwärtsameise erzeugt, die die gesammelten Daten der Vorwärtsameise bekommt. Diese aktualisiert nun mit Hilfe dieser

Daten alle besuchten Knoten. Es wird das jeweilige lokale statistische Modell und die Pheromonmatrix an den einzelnen Knoten aktualisiert.

3.4.1 Aktualisierung des lokalen statistischen Modells

Zur Aktualisierung der Informationen wird das folgende exponentielle Modell genutzt:

$$\mu_{id} \leftarrow \mu_{id} + c \cdot (t_{id} - \mu_{id})$$

$$\sigma_{id}^2 \leftarrow \sigma_{id}^2 + c \cdot ((t_{id} - \mu_{id})^2 - \sigma_{id}^2)$$

Hierbei bildet t_{id} die aktuelle Zeit, die eine Ameise von i nach d benötigt hat, c bestimmt die Anzahl der Messungen, die den Mittelwert beeinflussen.

3.4.2 Aktualisierung der Pheromonmatrix

Eine weitere Aufgabe liegt in der Aktualisierung der Pheromonmatrix T_i . Die Pheromonkonzentration wird erhöht, der der Knoten f auf dem aktuellen Pfad liegt. Die Ausschüttung der Pheromone ist abhängig von der Lösungsgüte und wird durch den Faktor r gesteuert, so dass sich folgende Gleichungen für die Aktualisierung ergeben:

$$\tau_{fd} \leftarrow \tau_{fd} + r \cdot (1 - \tau_{fd})$$

$$\tau_{jd} \leftarrow \tau_{jd} - r \cdot \tau_{jd}$$

Die Konzentration der Pheromonausschüttung wird ausschließlich über den Parameter r beeinflusst. r ist so zu wählen, dass gute Lösungen (also kurze Wege) zu einer stärkere Erhöhung führen, schlechte Lösungen sollten nur zu eine schwachen Erhöhung der Pheromonkonzentration führen. Hierfür wurde folgende Funktion entwickelt, die die aktuelle Reisezeit (t_{id}) und die Parameter aus dem lokalen statistischen Modell verwendet.

$$r = c_1 \left(\frac{T_{id_{best}}}{t_{id}} \right) + c_2 \left(\frac{I_{sup} - I_{inf}}{(I_{sup} - I_{inf}) + (t_{id} - I_{inf})} \right)$$

$$I_{sup} = \mu_{id} + z \left(\frac{\sigma_{id}}{\sqrt{w}} \right)$$

$$I_{inf} = T_{id_{best}}$$

Über die Parameter c_1 und c_2 können die einzelnen Bestandteile gewichtet werden.

Mit dem Parameter c_1 wird das Verhältnis zwischen bester Fahrtzeit und aktueller Fahrtzeit gewichtet, mit dem Parameter c_2 wird die Vertrauenswürdigkeit der Fahrtzeit bewertet.

4 Fazit

Ameisenalgorithmen können in der heutigen Zeit die Navigation optimieren und somit für eine qualitative Verbesserung der Routen sorgen. Insbesondere die hohe Dynamik ist hier positiv zu erwähnen.

Allerdings ist es zusätzlich zu dem ARIS-Konzept noch notwendig, dass Hierarchien eingeführt werden, da sonst zu viele Knoten in einem deutschlandweiten, europaweiten oder sogar weltweiten System für den Algorithmus vorhanden wären und die Rechenlast ohne die Hierarchien zu hoch wäre, um ein dynamisches System bereitzustellen.

5 Literaturverzeichnis

Marco Dorigo / Thomas Stützle

Ant Colony Optimization, MIT Press 2004, ISBN 0-262-04219-3

Sebastian Iwanowski, Thomas Walther

Dynamic Road Navigation with Ant Algorithms (Perprint), FH-Wedel

Thomas Walther

Dynamische Fahrzeugnavigation auf Basis von Ameisenkolonien, Masterarbeit, WS
2005/2006

Wikipedia

<http://de.wikipedia.org/wiki/Ameisen>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Ameisen-Algorithmus>

Universität Hamburg (Prof. Dr. Karl-Werner Hansmann, Dr. Nils Boysen)

<http://www.ameisenalgorithmus.de/>

Sebastian Iwanowski

Vorlesungsfolien Vorlesung KI Abschnitt 7