

Verteilte Systeme

1. Paradigmenwechsel für Softwarelösungen durch Verteilung

1.3 Pheromonbasierte Verkehrssteuerung als Beispiel für einen verteilten Ansatz

Sebastian Iwanowski
FH Wedel

*Die in dieser Vorlesung vorgestellte Präsentation stammt im Wesentlichen aus Präsentationen von **Thomas Walther**, M.Sc. der FH Wedel*

Die Natur als Vorbild

Ameisen als Verkehrsteilnehmer

Ameisen finden kürzeste Wege

- Koordination der Futtersuche
- Anpassung an Veränderungen der Umgebung

Wege in Verkehrsnetzen

- Kürzeste Route
- Schnellste Route
- Komfortabelste Route
- Dynamische Informationen nutzen

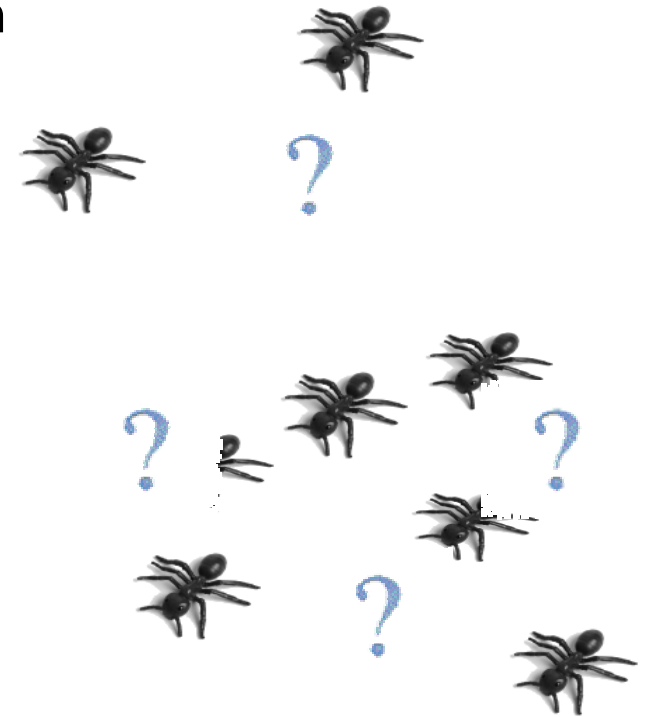


Die Natur als Vorbild

Grundprinzipien der Koordination

Wie können sich die Ameisen koordinieren?

- Indirekte Kommunikation mittels Pheromonen
- Probabilistische Entscheidungsfindung



Die Natur als Vorbild

Grundprinzipien der Koordination

- Jede Ameise setzt auf ihrem Weg regelmäßig Pheromone.
- Bei Verzweigungen ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Ameise für einen Weg entscheidet, proportional zur Pheromonkonzentration auf diesem Weg.
- Jede Ameise läuft denselben Weg zurück, den sie gekommen ist.

Die Natur als Vorbild

Kommunikationsmöglichkeiten von Ameisen

Pheromone als Informationsträger

- Chemische Substanz, die jede Ameise wahrnimmt mit der Unterscheidung zwischen Eigenpheromon und Fremdpheromon
- Permanente, konstante Ausschüttung
- Veränderung der lokalen Umgebung
- Grundlage für die eigene Wegentscheidung

Stigmergie als Kommunikationsprinzip

- Kommunikation grundsätzlich nur indirekt über Pheromone
- Pheromone nur lokal ablesbar
- Pheromone liefern nur lokale Information

Die Natur als Vorbild

Vorteile der probabilistischen Entscheidung: Beispiel

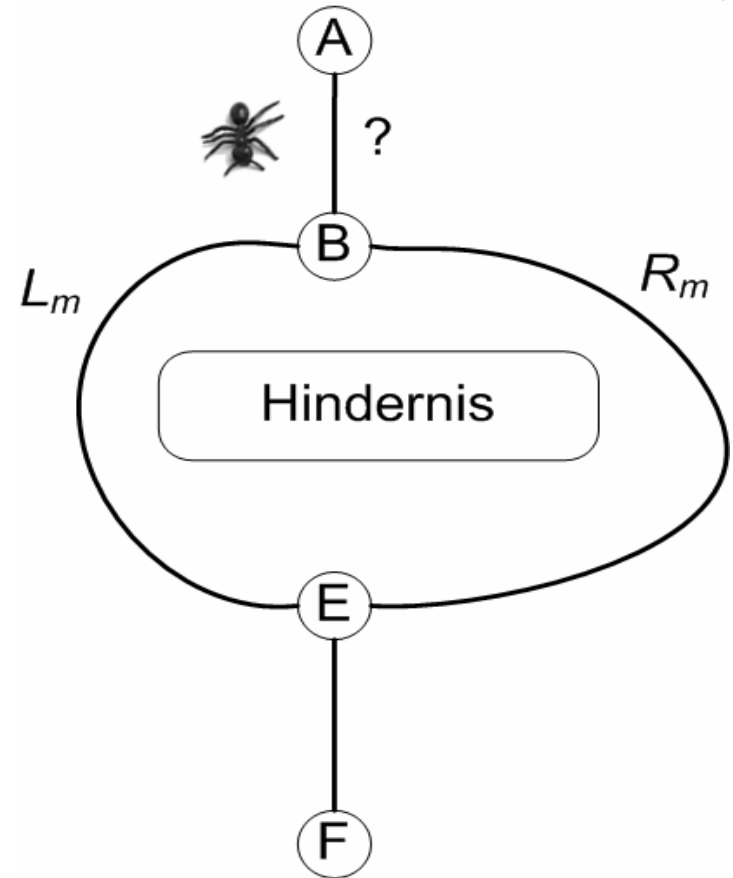
Einfaches Wegexperiment:

- Annahme: keine Verdunstung
- m ... Anzahl der Ameisen
- L_m ... Ameisen auf linken Weg
- R_m ... Ameisen auf rechten Weg

$$P_L(m) = \frac{(L_m + k)^h}{(L_m + k)^h + (R_m + k)^h}$$

$$P_R(m) = 1 - P_L(m)$$

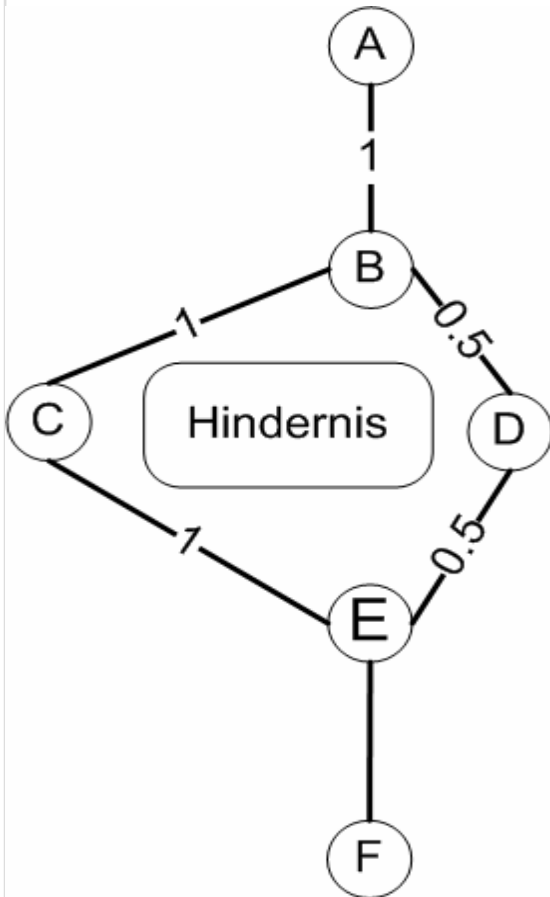
$$k = 20; h = 2$$



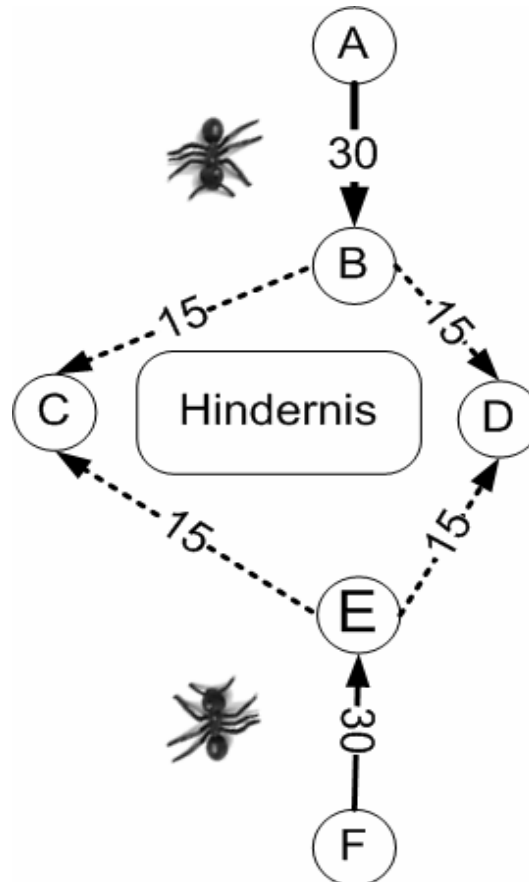
Die Natur als Vorbild

Vorteile der probabilistischen Entscheidung: Beispiel

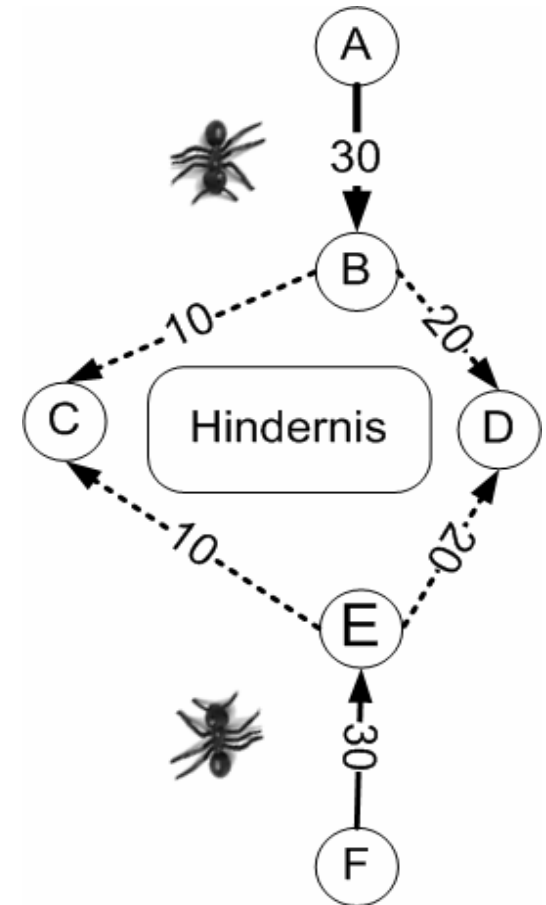
Entfernungen



T=1 30 Pionierameisen



T=2 30 neue Ameisen



Die Natur als Vorbild

Vorteile der probabilistischen Entscheidung: Zusammenfassung

Autokatalyse

- Positives Feedback durch Pheromone
- Je höher die Pheromonkonzentration ist, desto mehr Ameisen werden diesen Weg wählen.

Implizite Problemlösung

- Je kürzer ein Weg ist, desto mehr Ameisen durchlaufen diesen in gleicher Zeit, desto schneller steigt die Pheromonkonzentration

Kombination dieser beiden Eigenschaften

- Je kürzer ein Weg ist, desto mehr Ameisen werden diesen Weg gehen.

Die Natur als Vorbild

Vorteile der natürlichen Verdunstung

Problem: Stagnation

- Gute Lösungswege wirken anziehend
- Gefahr: schlechte Ameisen finden durchschnittliche Lösung
- Algorithmus konvergiert vorschnell
- Allmähliche Verschlechterung des Wegs wird nicht bemerkt

Lösung: Pheromonverdampfung

- Differenz der Pheromonkonzentration wird begrenzt
- Neue Informationen zählen mehr als alte
- Kompromiss zwischen Verstärkung und Erforschung

Künstliche Ameisenverfahren

Reale Ameisen und Künstliche Ameisen

Gemeinsamkeiten

- Kolonie von kooperierenden Individuen
- Pheromonspur und Stigmergie
- Kürzeste Wege – Kostenminimierung
- Kontinuierliche Bewegungen
- Stochastische und „kurzsichtige“ Entscheidungsfaktoren

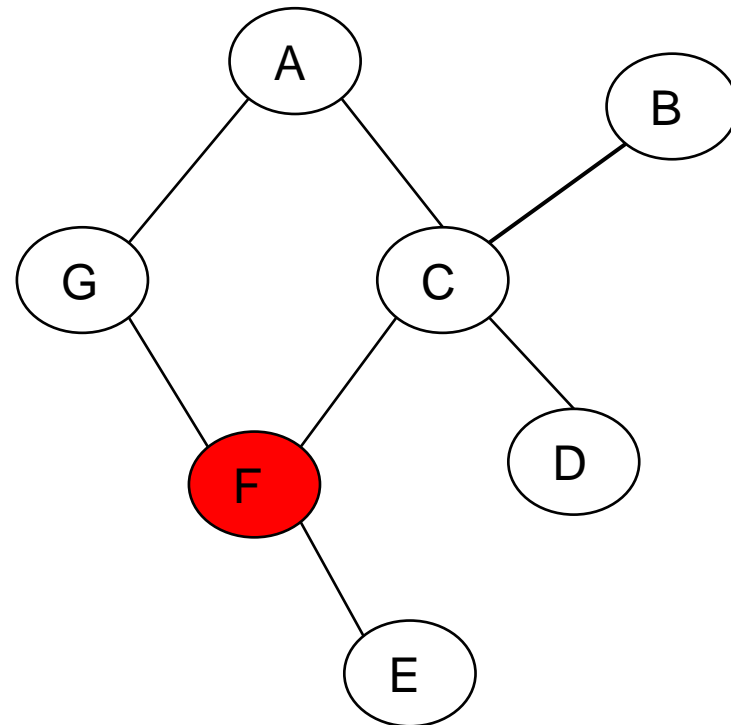
Unterschiede

- Diskrete Welt, diskrete Zustandsübergänge
- Zustandsvariable, Gedächtnis
- Pheromonausschüttung korreliert mit Lösungsgüte
- Oftmals verzögerte Pheromonausschüttung
- Problemspezifische Fähigkeiten

Künstliche Ameisenverfahren

Routentabelle basierend auf Wahrscheinlichkeiten

Tabelle F			
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	0.05	0.05	0.9
G	0.6	0.35	0.05



Künstliche Ameisenverfahren

Algorithmischer Ablauf

Vorwärts- und Rückwärtsameisen

Kontinuierliche Generation von Vorwärtsameisen

Vorwärtsameisen bewegen sich zu einem Zielknoten

- Wahrscheinlichkeitsgesteuerte Wegwahl
- Sammeln von Weginformationen
- Starten einer Rückwärtsameise am Ziel

Rückwärtsameisen

- Rückverfolgung des Wegs der Vorwärtsameise
- Aktualisieren der Knoteninformation

Künstliche Ameisenverfahren

Entwicklungen verschiedener Forschergruppen

AntNet

Dorigo M., G. Di Caro & L. M. Gambardella (1999). Ant Algorithms for Discrete Optimization. *Artificial Life*, 5(2):137-172.

<http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/ACO.html>

Gianni Di Caro, An Introduction to Swarm Intelligence and Metaheuristics for Combinatorial Optimization: lecture slides http://www.idsia.ch/~gianni/my_lectures.html

Ant Based Control (ABC)

Kroon R., *Dynamic vehicle routing using Ant Based Control*, Master's thesis, Delft University of Technology, 2002.

R. Schoonderwoerd, O. Holland, and J. Bruten. Ant-like agents for load balancing in telecommunications networks. In *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents*, pages 209–216. ACM Press, 1997.

Funktionsweise eines Ameisenverfahrens (ABC)

Erhöhung der Pheromonkonzentration

$$P_{d,f} = \frac{P_{d,f} + \Delta P}{1 + \Delta P}$$

d ... Zielknoten der Vorwärtsameise
f ... Knoten über den die Rückwärtsameise den
aktuellen Knoten erreicht hat

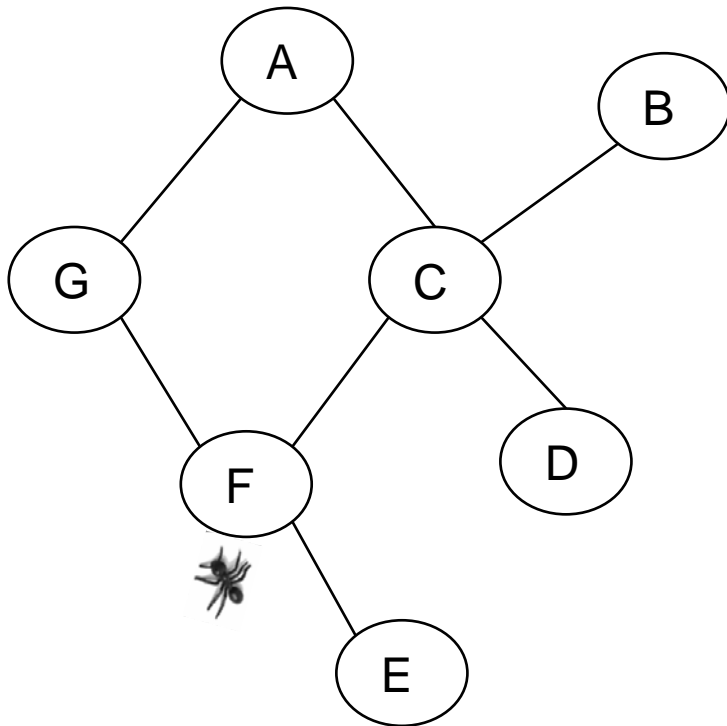
Verdampfung der Pheromone

$$P_{d,i} = \frac{P_{d,i}}{1 + \Delta P} \quad \forall i \neq f$$

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	0.05	0.05	0.9
G	0.6	0.35	0.05

Funktionsweise eines Ameisenverfahrens (ABC)

Verhalten der Vorwärtsameise



Gedächtnis

$\{s,d\} = \{F,B\}$

$\{k,t_k\} = \{F,0.5\} \quad \{C,1.5\}$

Tabelle F (verkürzt)

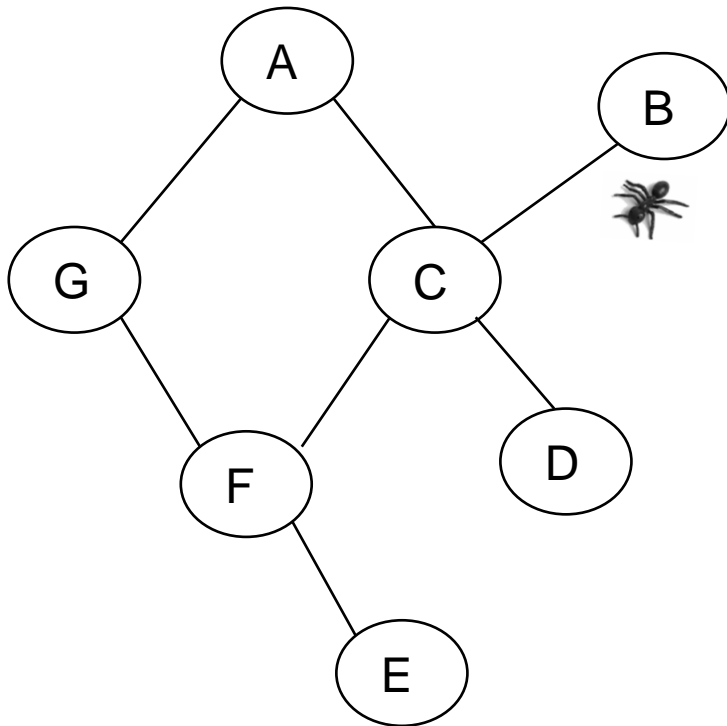
Next \ Dest	C	G	E
B	0.5	0.35	0.15

Tabelle C (verkürzt)

Next \ Dest	A	B	D	F
B	0.05	0.85	0.05	0.05

Funktionsweise eines Ameisenverfahrens (ABC)

Verhalten der Rückwärtsameise



Gedächtnis

$$\{s,d\} = \{F,B\}$$

$$\{k,t_k\} = \{F,0.5\} \quad \{C,1.5\}$$

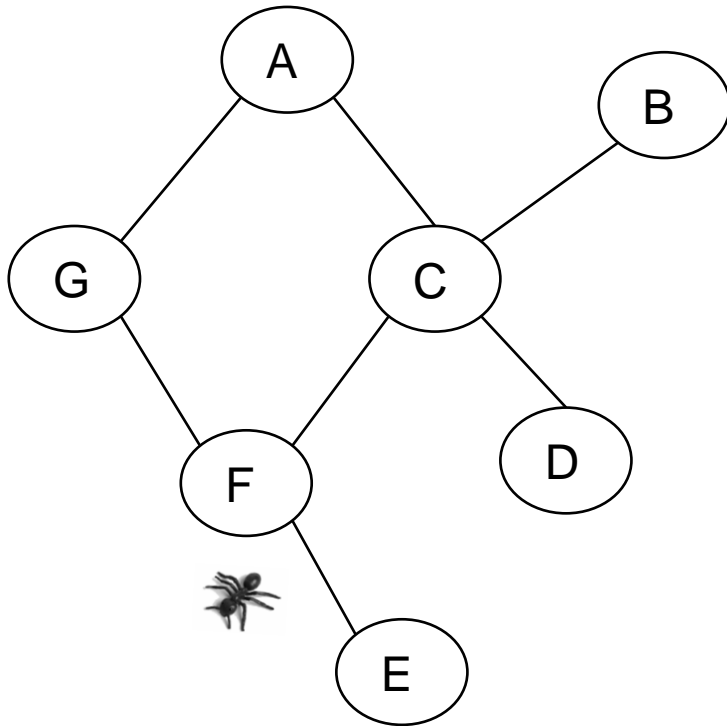
Tabelle C (verkürzt)

Next \ Dest	A	B	D	F
B	0.05	0.85	0.05	0.05

Pheromonaktualisierung verändert die Tabelle des Knotens C nicht, da als minimaler Wert für jeden Eintrag 0.05 erhalten bleiben soll.

Funktionsweise eines Ameisenverfahrens (ABC)

Verhalten der Rückwärtsameise



Gedächtnis

$$\{s,d\} = \{F,B\}$$

$$\{k,t_k\} = \{F,0.5\} \{C,1.5\}$$

Alte Tabelle F (verkürzt)				
Next \ Dest	C	G	E	
B	0.5	0.35	0.15	

Neue Tabelle F (verkürzt)				
Next \ Dest	C	G	E	
B	0.83	0.12	0.05	

$$\Delta P = \frac{2}{2} + 1$$

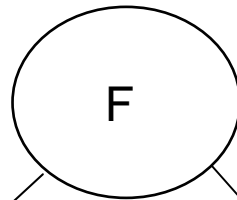
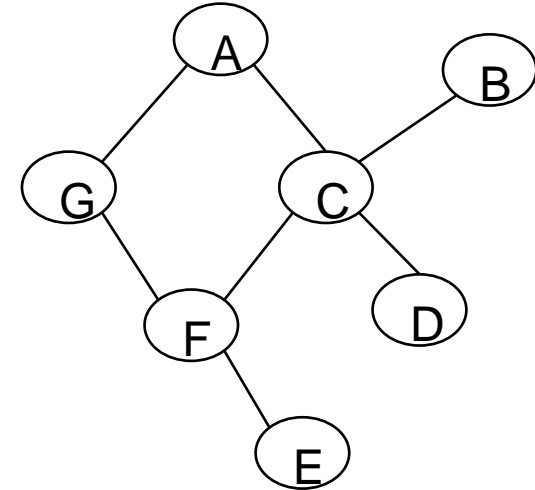
$$P_{\text{new},C} = \frac{0.5 + 2}{1 + 2} = 0,83$$

$$P_{\text{new},G} = \frac{0.35}{1 + 2} = 0,12$$

$$P_{\text{new},E} = \frac{0.15}{1 + 2} = 0,05$$

Verbesserungen in AntNet

Erweiterte Pheromoninformation:



Pheromonmatrix

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	0.05	0.05	0.9
G	0.6	0.35	0.05

Verkehrsaufkommensstatistik

M_{FA}	M_{FB}	M_{FC}	M_{FD}	M_{FE}	M_{FF}	M_{FG}
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

$$M_{id} = (\mu_{id}, \sigma_{id}^2, W_{id})$$

$$\mu_{id} \leftarrow \mu_{id} + \varsigma (t_{i,d} - \mu_{id})$$

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

Verbesserungen in AntNet

Erweiterte Pheromonauswertung der Vorwärtsameise:

Wahrscheinlichkeit einer Wegwahl von Knoten i nach j mit Ziel d:

$$P_{ijd} = \frac{\tau_{ijd} + \alpha \eta_{ij}}{1 + \alpha (|N_i| - 1)} \quad \alpha \in [0,1]$$

Heuristische Größe η_{ij} aus q_{ij} , der Fahrtdauer im statischen Fall:

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{q_{ij}}{\sum_{l=1}^{|N_i|} q_{il}}$$

Variante:

Statt q_{ij} kann auch ein dynamischer Wert für die Fahrtdauer gewählt werden, z.B. μ_{ij} aus der Verkehrsaufkommenstatistik

Verbesserungen in AntNet

Aktualisierung der Knoteninformation durch Rückwärtsameise:

Pheromonmatrix

Dest \ Next	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	0.05	0.05	0.9
G	0.6	0.35	0.05

Pheromonerhöhung

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

Pheromonverdampfung

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

Hierbei sei r ein „günstiger“ Aktualisierungsfaktor

Verbesserungen in AntNet

Aktualisierung der Knoteninformation durch Rückwärtsameise:

Verkehrsaufkommensstatistik

$$M_{id} = (\mu_{id}, \sigma_{id}^2, W_{id})$$

$$\mu_{id} \leftarrow \mu_{id} + \varsigma (t_{i,d} - \mu_{id})$$

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

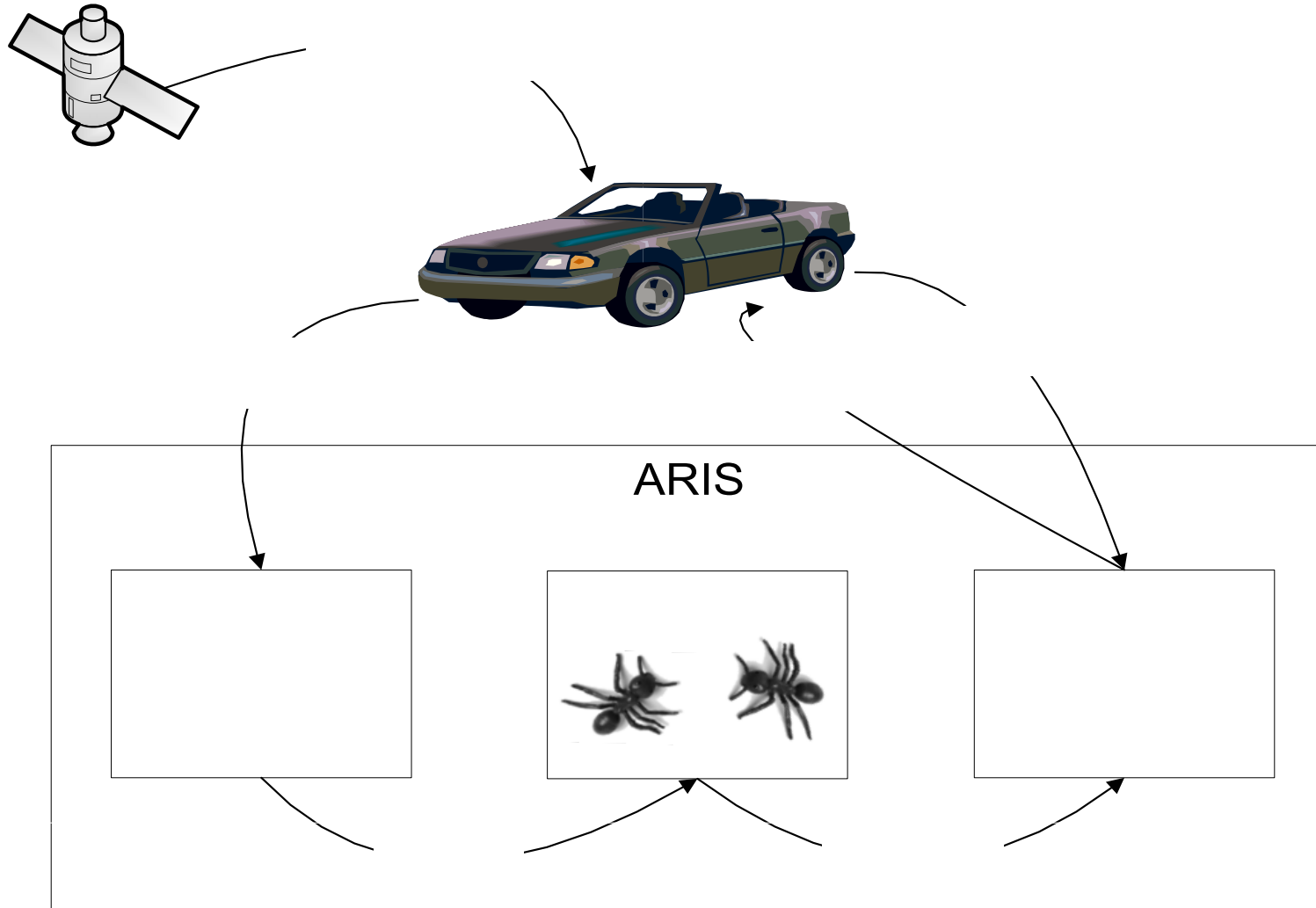
„günstiger“ Aktualisierungsfaktor r für die Pheromonmatrix:

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

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

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

Systemdesign: Systemkomponenten



ARIS = Ameisenbasiertes RoutenInformationssystem

Systemdesign: Systemkomponenten

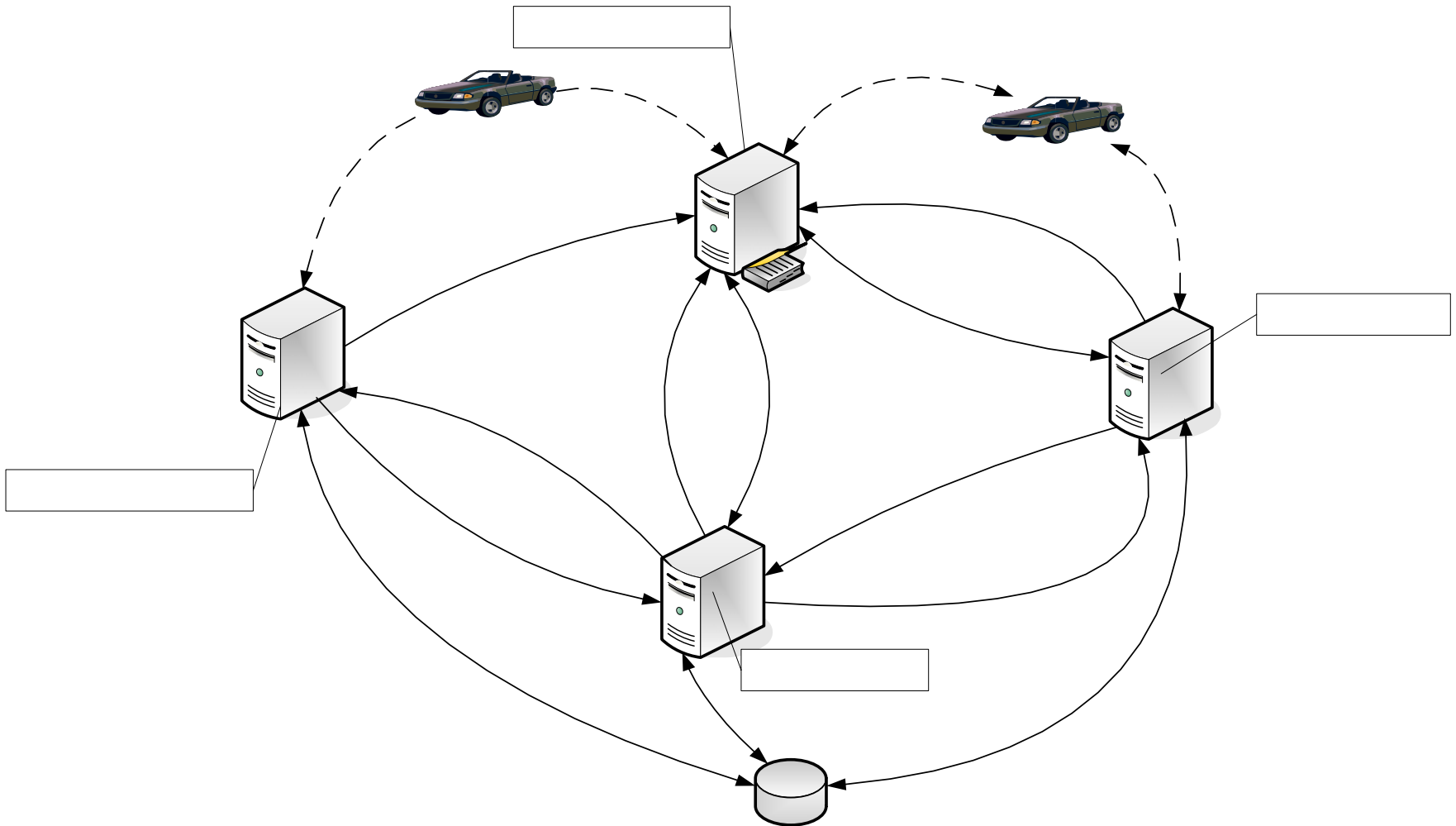
Zeiterfassungssystem

- Abbildung der Verkehrslage für die einzelnen Wegstrecken
- Verschiedene Datenquellen: Induktionsschleifen, Kameras, Fahrzeuge, ...

Fahrzeuge als Datenquelle

- Komplexe Erfassung notwendig
- Problematik geringer Informationsdichten
- Abgelegt werden die gemittelten Fahrzeiten (über ein Zeitfenster)

Systemdesign: Verteilung der Systemkomponenten



Systemdesign: Verteilung des Ameisensystems

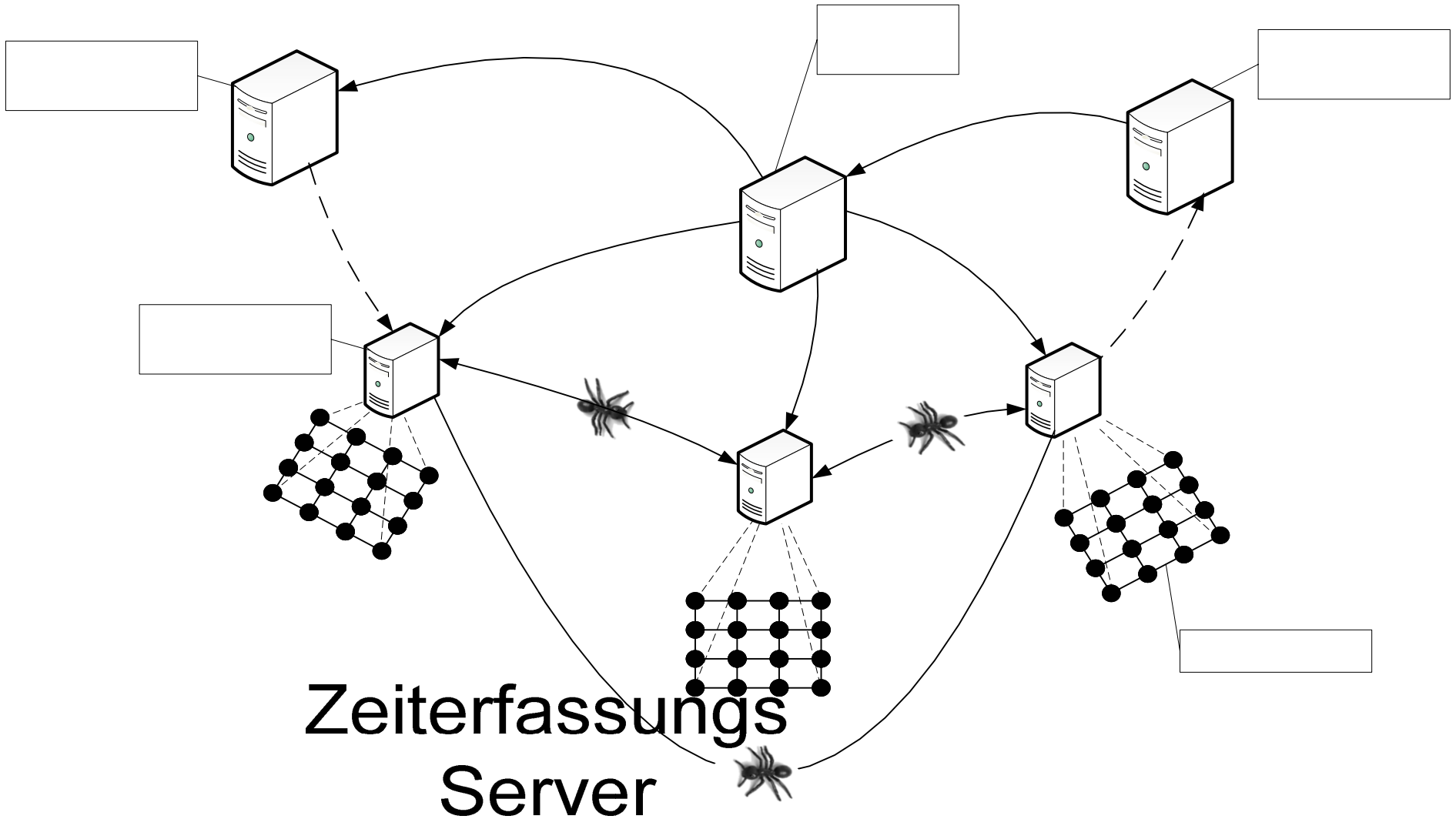
Große Netze sind problematisch:

- Je größer das Netz desto mehr Ameisen benötigt
- Je mehr Ameisen desto größer ist die Rechenlast

Lösung:

- Verteilung der Rechenlast auf gleichartige Dienste
- Begünstigt durch indirekte und lokale Kommunikation

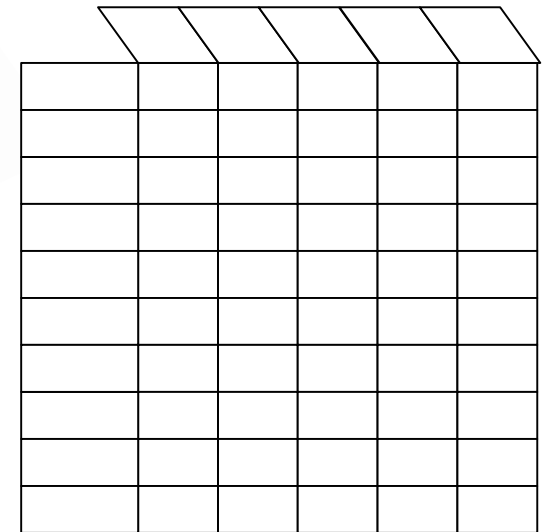
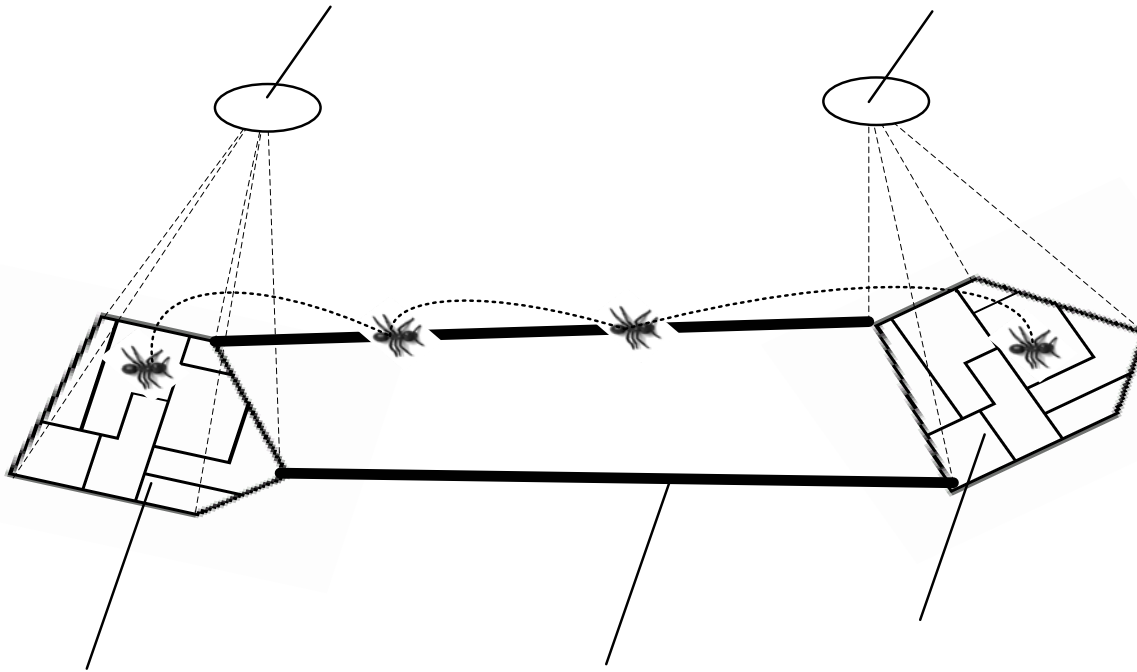
Systemdesign: Verteilung des Ameisensystems



Verteiltes Ameisensystem: Hierarchische Verfahren

Gleichmäßiger top-down-Ansatz*

- Sektor-Level-Knoten
- Grenzknoten
- Top-Level-Knoten

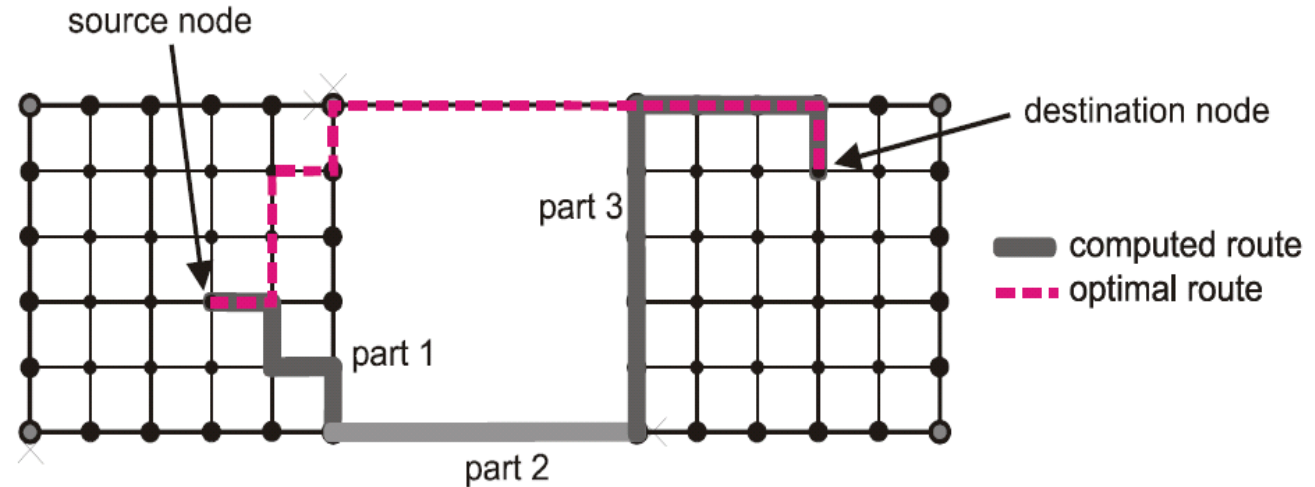


*Henrik Dibowski: Hierarchical routing system using ant based control, TU Delft (NL) / TU Dresden, Diplomarbeit, 2003

Verteiltes Ameisensystem: Hierarchische Verfahren

Gleichmäßiger top-down-Ansatz: Details

Problem:



Verbesserungen:

- 1) Erweiterung der Routentabelle: Explizite Erwähnung der entfernten Sektor-Level-Knoten
- 2) Verwendung von entfernten Zuordnungen Grenzknoten – Sektor-Level-Knoten

Verteiltes Ameisensystem: Hierarchische Verfahren

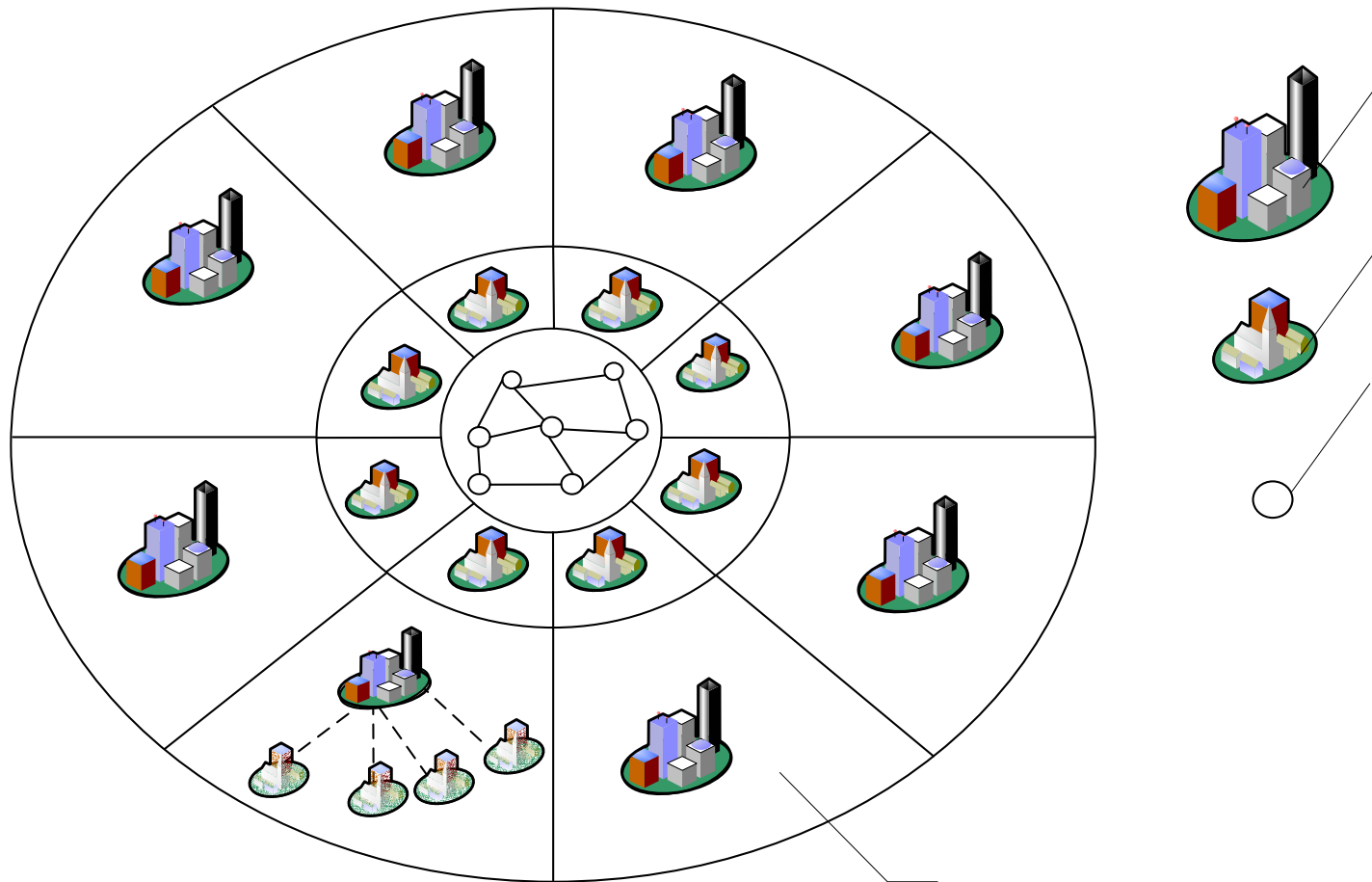
Unscharfes Routen

Konzeptionelle Idee:

- *Genaue* Wegwahl für nahe Ziele
- *Unscharfe* Wegwahl für entfernte Ziele
- Definition von Orientierungspunkten
- Knotenspezifische Sektordefinitionen
- Keine Wegwahleinschränkung

Verteiltes Ameisensystem: Hierarchische Verfahren

Unscharfes Routen



Verteiltes Ameisensystem: Hierarchische Verfahren

Unscharfes Routen

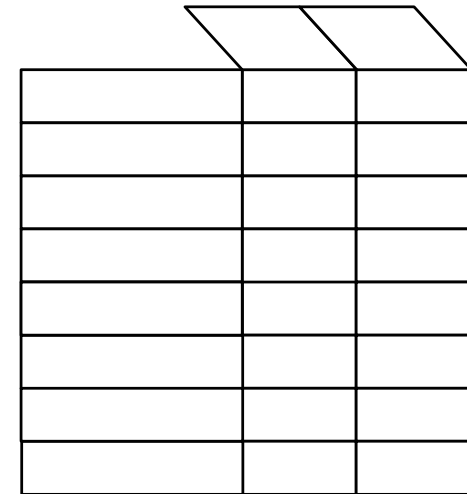
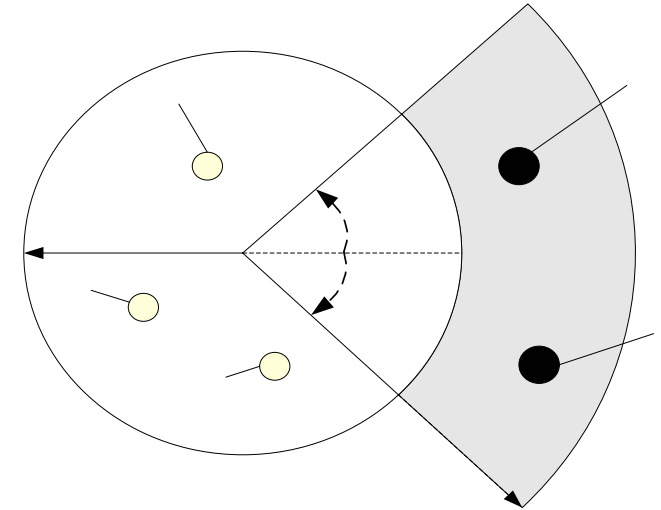
Wegwahl der Ameisen bleibt für nahe Ziele unverändert

Wegwahl für entfernte Sektoren

- Zielknoten ist ein Orientierungspunkt
- An jedem Knoten ändert sich die Sicht
- Sektordefinitionen ändern sich

Einschränkung der möglichen Ziele

Ein bester Weg zu einem Sektor gilt für alle Knoten des Sektors



φ, φ

Zusammenfassung der Masterarbeit

Ameisenalgorithmen

- Einzelne Individuen sind sehr einfach
- Kollektives Verhalten ermöglicht die Lösung komplexer Probleme

Konzeptionelle Verbesserungen der Masterarbeit

- Beschränkung der Zielknoten und Wege
- Erweiterung der hierarchischen Verfahren

Praktische Ergebnisse der Masterarbeit

- Implementierung eines Verkehrssimulators
- Implementierung des AntNet – Algorithmus
- Prototyp für ein Routeninformationssystem als verteiltes System
- Funktionsdemonstration mit zeilenbasierter Interaktion

Aufgaben für zukünftige Arbeiten

Konzeptionelle Arbeiten

- Ausgestaltung des Konzepts „Unscharfes Routen“
- Fahrzeiterfassung
- Personalisierte Verkehrsinformation:
 - Fahrzeugklassen berücksichtigen
 - Integration/Kombination verschiedener Optimierungsziele
 - Integration von historischen Daten

Praktische Arbeiten

- Verwendung eines besseren Verkehrssimulators (bessere Bedienungsfläche)
- Implementierung hierarchischer Verfahren
- Anbindung einer realen Fahrzeiterfassung