

Intelligente Systeme

Computational Intelligence

Prof. Dr. R. Kruse C. Braune

{kruse,cbraune}@iws.cs.uni-magdeburg.de

Institut für Wissens- und Sprachverarbeitung

Fakultät für Informatik

Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

CI: Technologien und Anwendungen

Hybride Systeme

Teilchenschwarm-Verfahren

Ameisenkolonie-Algorithmen

Computational *intelligence* Society

Home of Neural Networks, Fuzzy Systems and Evolutionary Computation



Computational Intelligence ist charakterisiert durch:

Meist modellfreie Ansätze,

Kein explizites Modell (z.B. Differentialgleichungen) notwendig

Approximation statt exakte Lösung (nicht immer ausreichend!)

schnelleres Finden einer brauchbaren Lösung (u.U. auch ohne tiefgehende Problemanalyse)

CI: Technologien und Anwendungen

Kerntechnologien

Neuronale Netze (NN)
Fuzzy-Logik (FL)
Probabilistisches Schließen (PR)
Evolutionäre Algorithmen (EA) und
weitere Metaheuristiken
Hybride Systeme

Verwandte Technologien

Fallbasiertes Schließen (CBR)
Regelbasierte Expertensysteme (RBR)
Maschinelles Lernen (z.B.
Induktionsbäume)
Bayessche Belief-Netze (BBN)

Anwendungen

Klassifikation

- Überwachung/
Anomalieerkennung
- Diagnose
- Prognose
- Konfiguration/Initialisierung

Vorhersage

- Qualitätskontrolle
- Alterungsprozessmodellierung

Terminplanung

- Zeit-/Ressourcenzuweisung

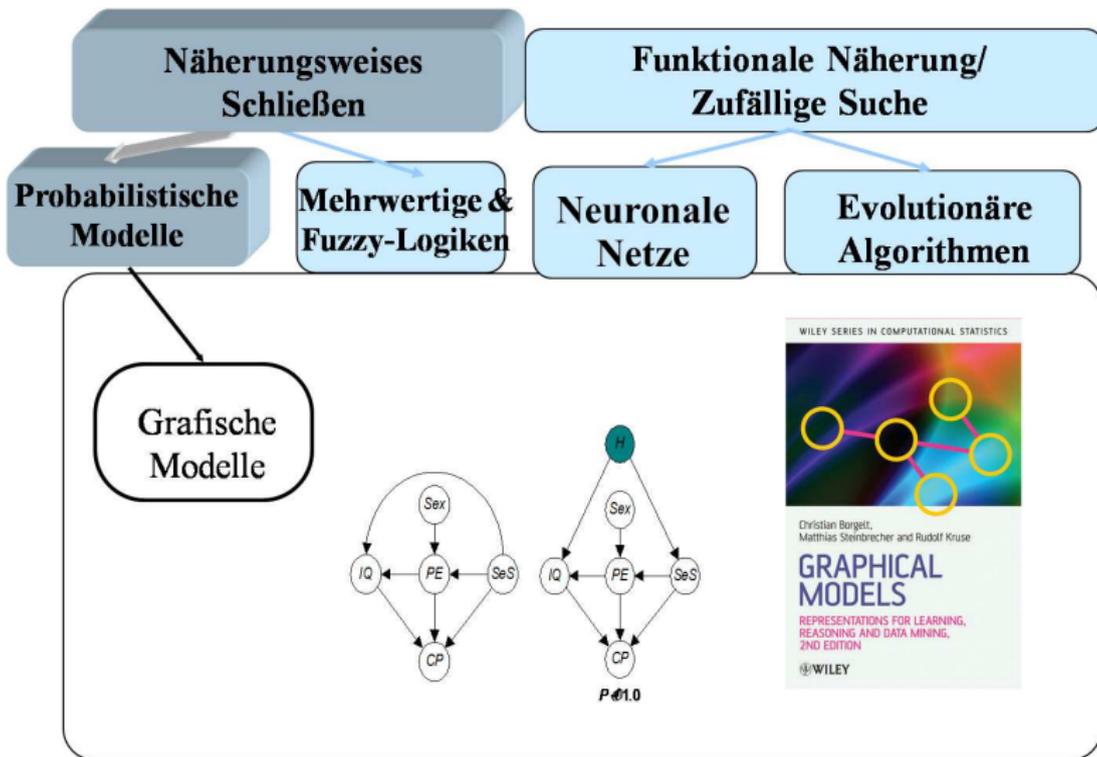
Regelung

- Maschinen-/Prozesskontrolle
- Prozessinitialisierung
- Überwachungskontrolle

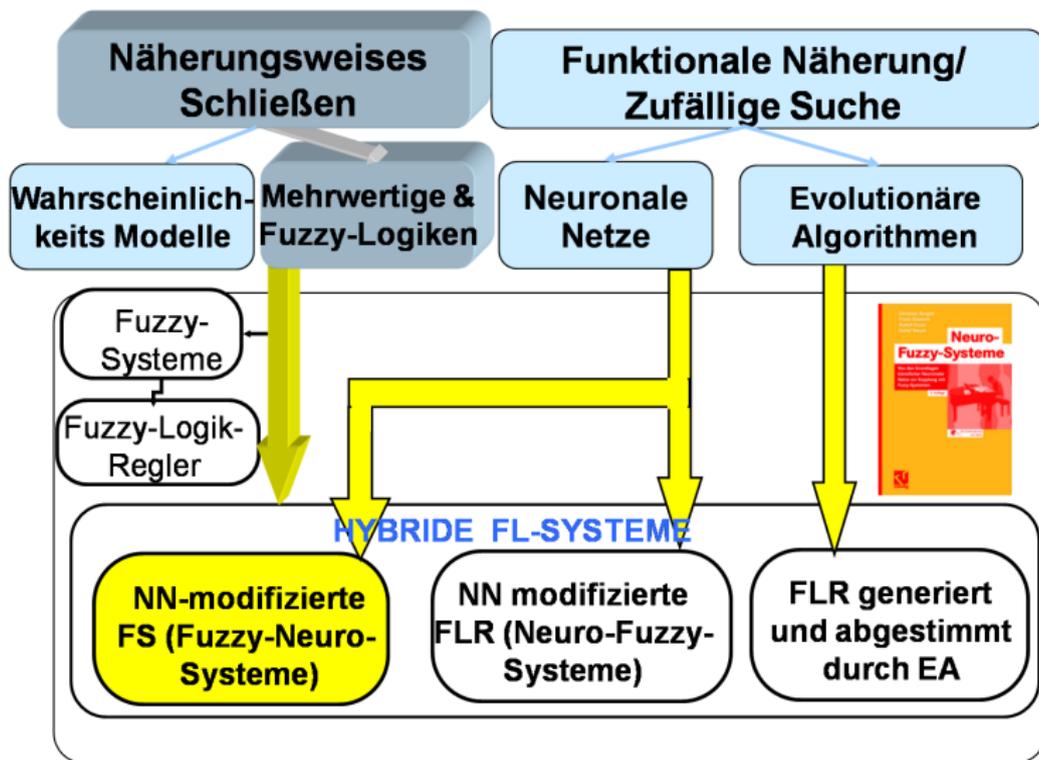
Automatische Entscheidung

- Kosten-/Risikoanalyse
- Einkommensoptimierung

Computational Intelligence



Hybride Neuro-Fuzzy-Systeme



CI: Anwendungen



Haushaltsgeräte

- Bevorzugte Serviceverträge (Stat.)
- Call-Center-Support (CBR)



Kapitalservice

- Kreditwürdigkeitsbewertung (Fusion/FL/CBR)



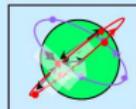
Finanzversicherungen

- Bevorzugte Kunden (Stat./NN)



Plastik

- Automatische Farbanpassung (CBR)



Föderierte Systeme

- Terminwartung von Satellitenkonstellationen (GA)



Schifffahrt

- Schiffmanagementsysteme (AI/GA)



Medizinische Systeme

- Automatische Analyse von MRT (FL)
- Reverse Engineering von Picker (FL)
- Finite-Element-Analyse (FL)
- Analyse von Röntgenfehlern (CBR)



Flugzeugmotoren

- Zentrum für Ferndiagnosen (CBR)
- Kundenanfragecenter (CBR)
- Ausreißerererkennung (FL/Stat.)
- Wartungsberater (NN/FL)
- Sensorfusion (FL)



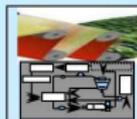
Transportsysteme

- Erfassung von Transport-DB (CBR)
- Prototyp. Zugführerkontrolle (FL/GA)
- Prototyp. Trendanalyse (Stat.)
- Eingebettete/Ferndiagnose (BBN)



Stromerzeugung

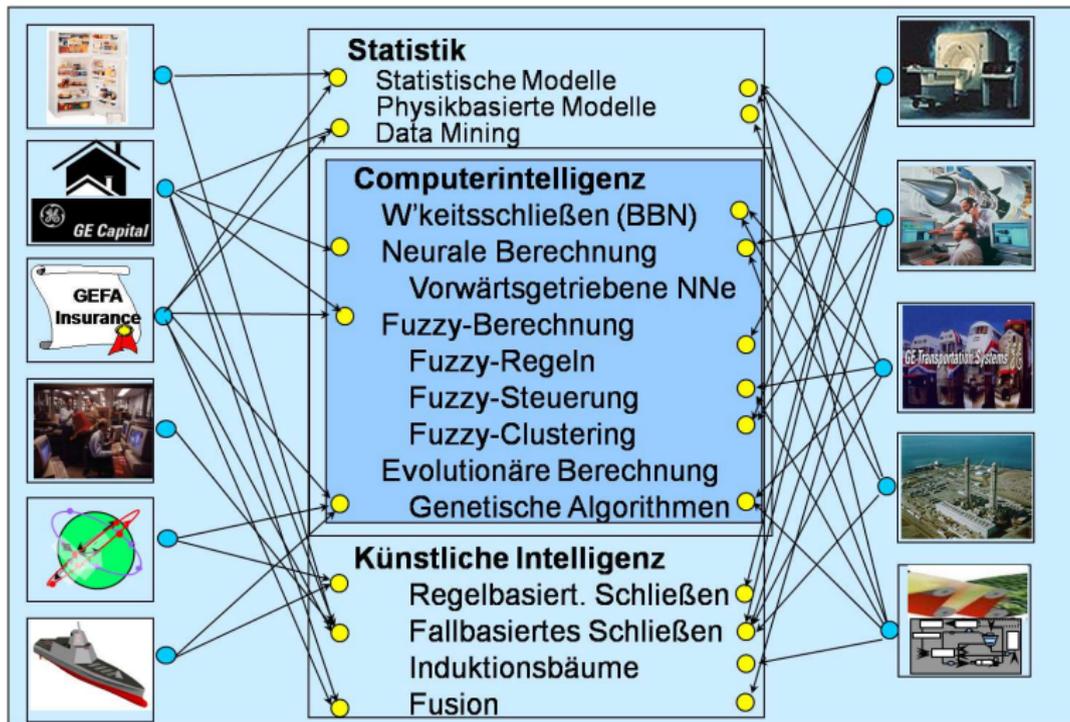
- Fernausreißerererkennung (Stat.)
- Eingebettete/Ferndiagnose (BBN)
- Call-Center-Problem/Lösung (CBR)



Industriesysteme

- Vorhersage eines Abbruchs der Papierbahn (NN/Stat./Induction)
- Rührkontrolle von Zement (FL/GA)

CI: Grundlage und verwandte Technologien



Beispiel: DAX-Prognosen

Datenbasis: Zeitreihe von 1986–1997

DAX	Composite-DAX
Deutsche 3-Monate-Zinsrate	Return Germany
Deutscher Morgan-Stanley-Index	Industrie-Index des Dow Jones
DM / US-\$	US Schatzanweisungen
Goldpreis	Japanischer Nikkei-Index
Europäischer Morgan-Stanley-Index	Verhältnis von Preis und Ertrag

Fuzzy-Regeln in der Finanzwelt

Entwicklungsregel

WENN DAX = fallend **UND** US-\$ = fallend
DANN DAX-Voraussage = fallend
MIT hoher Gewissheit

Wendepunktregel

WENN DAX = fallend **UND** US-\$ = steigend
DANN DAX-Voraussage = steigend
MIT niedriger Gewissheit

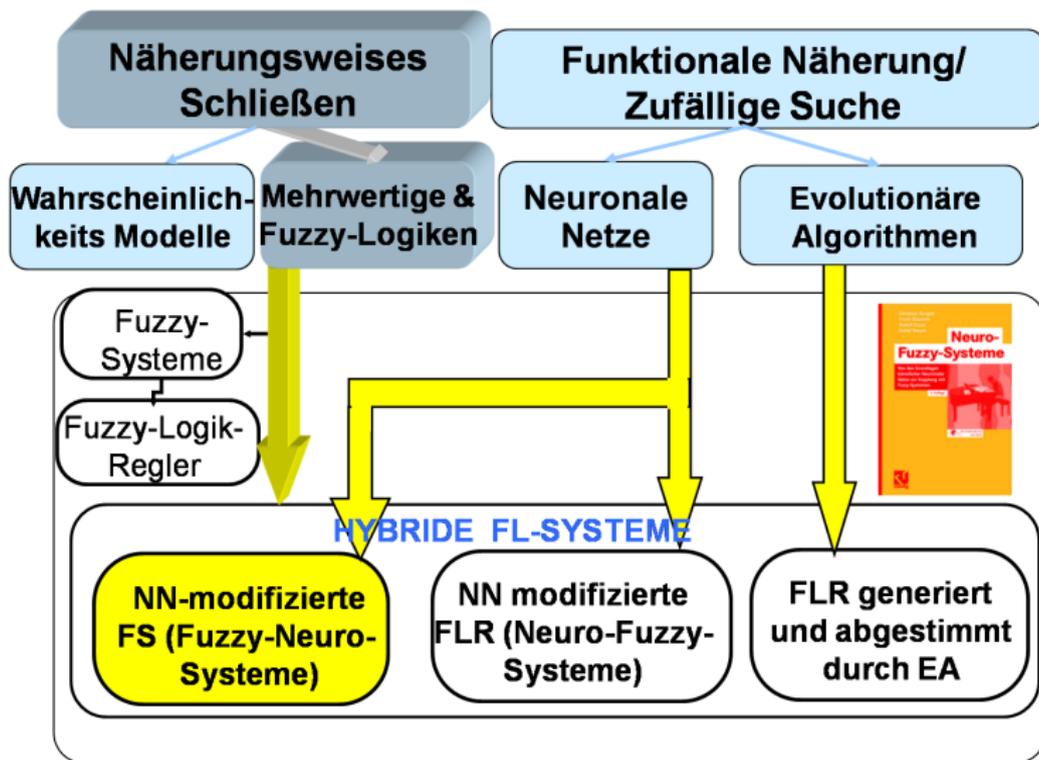
Verzögerungsregel

WENN DAX = stabil **UND** US-\$ = fallend
DANN DAX-Voraussage = fallend
MIT sehr hoher Gewissheit

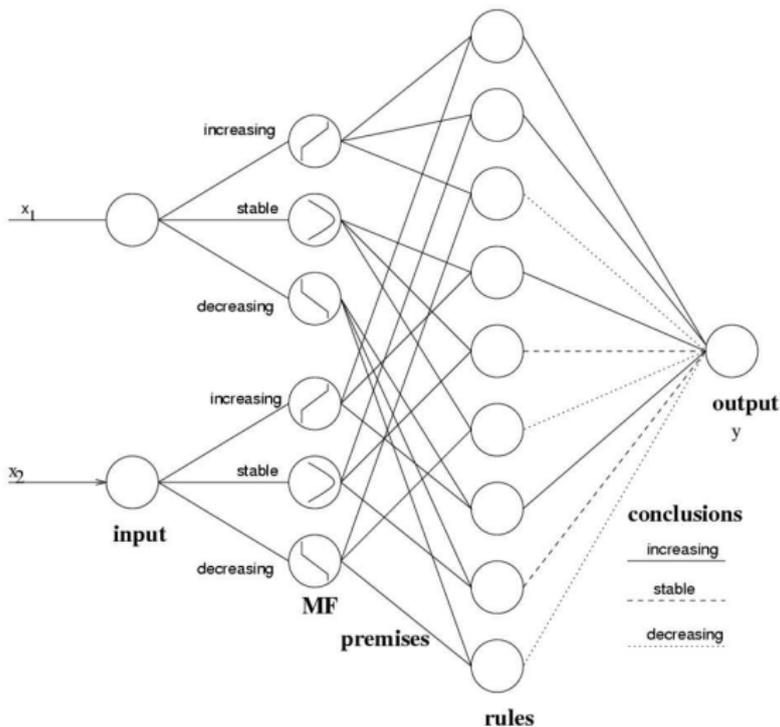
generell

WENN x_1 ist μ_1 **UND** x_2 ist μ_2 **UND** ... **UND** x_n ist μ_n
DANN $y = \eta$
MIT Gewicht k

Neuro-Fuzzy-Architektur



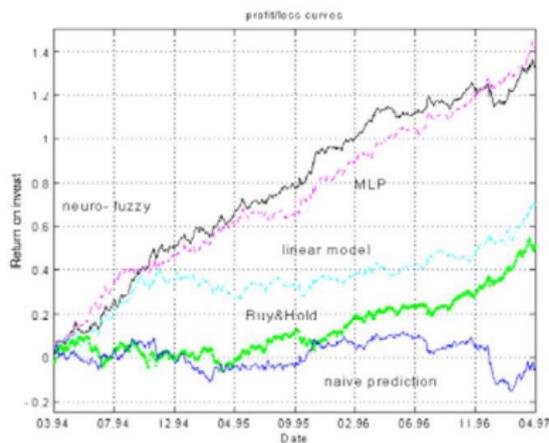
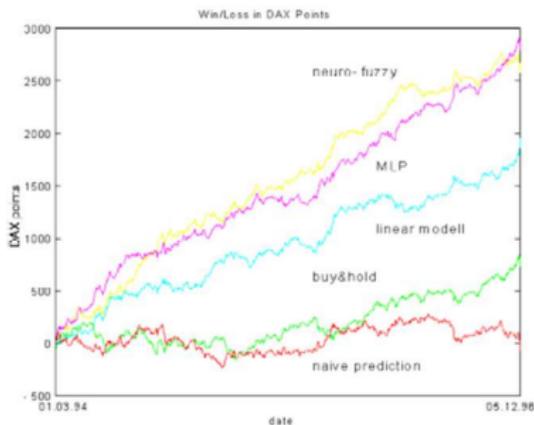
Neuro-Fuzzy-Architektur



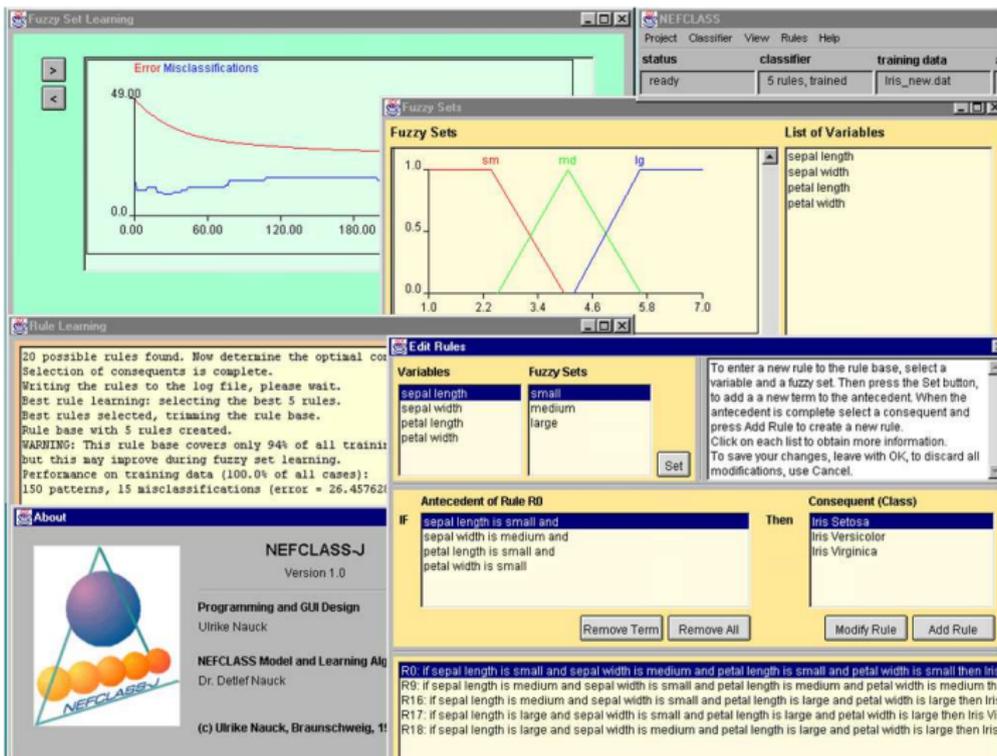
Return-on-Investment-Kurven

verschiedene Modelle

Validierungsdaten: 01. März 1994 bis April 1997



NEFCLASS-J



The screenshot displays the NEFCLASS-J software interface with several windows open:

- Fuzzy Set Learning:** A graph showing 'Error Misclassifications' over time. The error starts at 49.00 and decreases to approximately 26.45 over 180.00 iterations.
- Fuzzy Sets:** A graph showing three fuzzy sets: 'sm' (small), 'md' (medium), and 'lg' (large) for a variable. The x-axis ranges from 1.0 to 7.0, and the y-axis from 0.0 to 1.0.
- Rule Learning:** A text window reporting: '20 possible rules found. Now determine the optimal one. Selection of consequents is complete. Writing the rules to the log file, please wait. Best rule learning; selecting the best 5 rules. Best rules selected, trimming the rule base. Rule base with 5 rules created. WARNING: This rule base covers only 94% of all training but this may improve during fuzzy set learning. Performance on training data (100.0% of all cases): 150 patterns, 15 misclassifications (error = 26.45762)'.
- Edit Rules:** A window for editing a rule. It shows 'Variables' (sepal length, sepal width, petal length, petal width) and 'Fuzzy Sets' (small, medium, large). The 'Antecedent of Rule R0' is 'sepal length is small and sepal width is medium and petal length is small and petal width is small'. The 'Consequent (Class)' is 'Iris Setosa', 'Iris Versicolor', and 'Iris Virginica'.
- About:** A window showing the NEFCLASS-J logo and version information: 'NEFCLASS-J Version 1.0', 'Programming and GUI Design Ulrike Nauck', 'NEFCLASS Model and Learning Alg Dr. Detlef Nauck', and '(c) Ulrike Nauck, Braunschweig, 1998'.

Beispiel: Qualitätskontrolle

Heutiges Verfahren

Oberflächenkontrolle: manuell durchgeführt

Erfahrener Arbeiter bearbeitet Oberfläche mit Schleifstein

Experten klassifizieren Abweichungen durch sprachliche Beschreibungen

Umständlich, subjektiv, fehleranfällig, zeitaufwendig



Vorgeschlagener Ansatz:

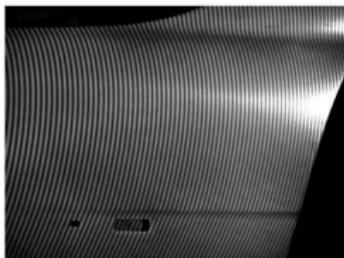
Digitalisierung der Oberfläche mit optischen Mess-Systemen

Charakterisierung der Formabweichungen durch mathematische Eigenschaften (nahe der subjektiven Merkmale)

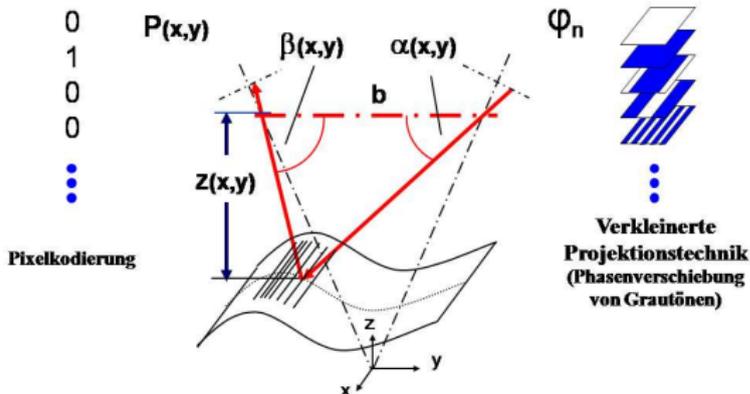
Topometrisches 3D-Mess-System



breuckmann 

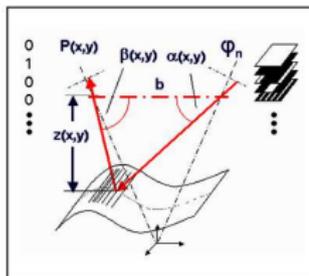


Triangulation und Gitterprojektion

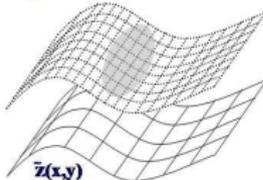


- hohe Punktdichte
- schnelle Datenansammlung
- genaue Messung
- kontakt- und harmlos

Datenverarbeitung

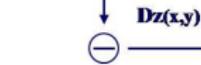


• Annäherung durch
Polynomiale Oberfläche



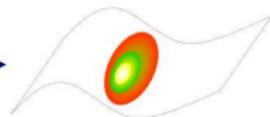
• Differenz

$z(x,y)$



$\tilde{z}(x,y)$

• Farbkodierte
• Darstellung



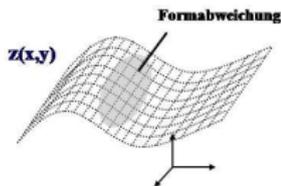
3-D-Daten-
aufnahme

Nachverarbeitung

Erkennung von
Abweichungen

Merkmalsanalyse

• 3-D-Punktwolke



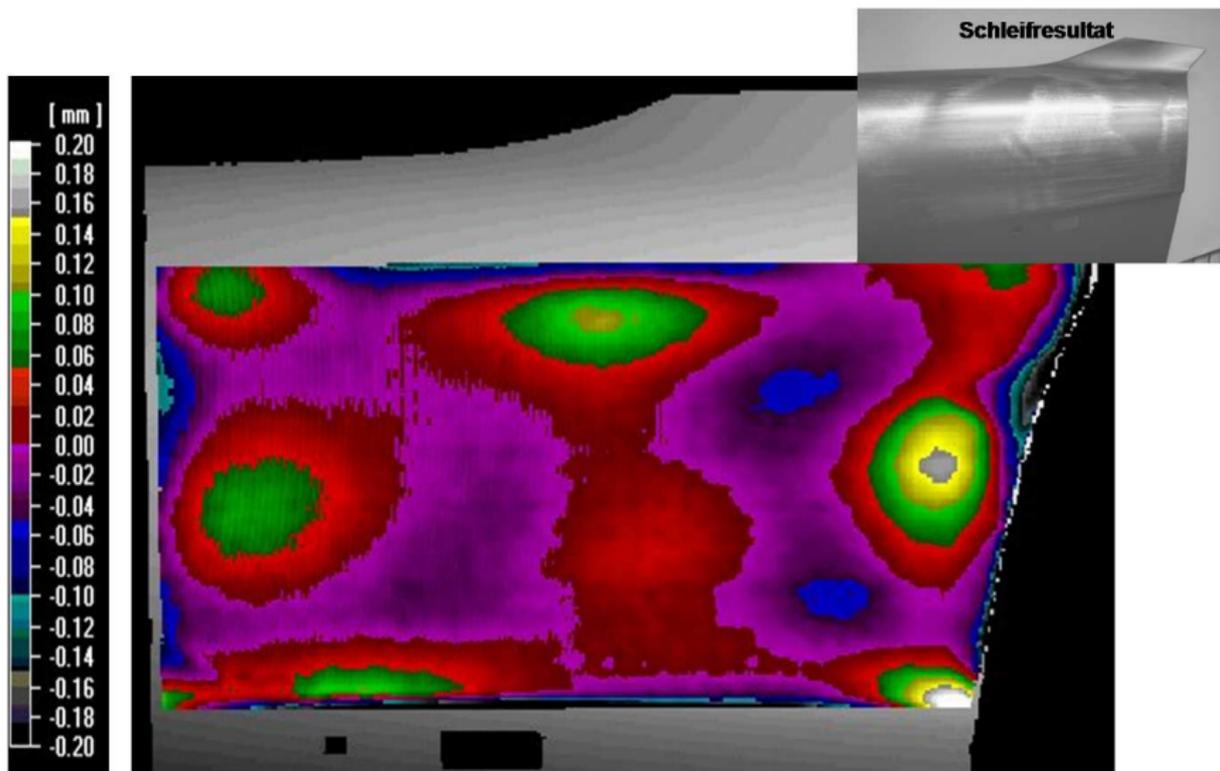
• Merkmalsberechnung



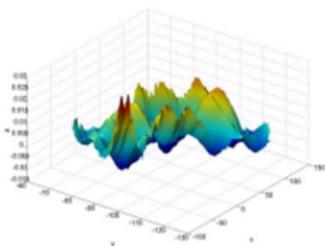
• Klassifikation (Data-Mining)



Farbkodierte Darstellung

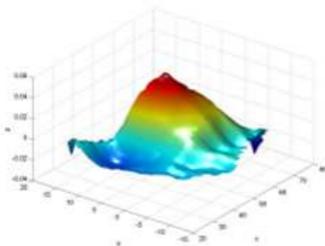


3D-Darstellung lokaler Oberflächendefekte



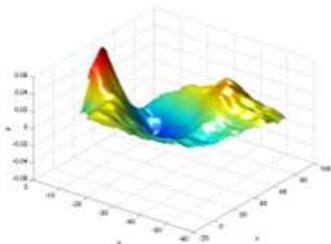
Unebene Oberfläche

Mehrere Einfallstellen in Serie/benachbart



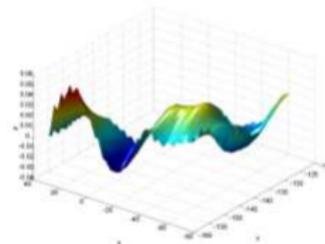
Walzenmarkierung

Lokale Glättung der Oberfläche



Einfallstelle

Leichte flach basierte Senke einwärts



Wellplatte

Mehrere schwerere Faltungen in Serie

Charakteristik der Daten

9 Meisterstücke mit insgesamt 99 Defekten analysiert

Für jeden Defekt wurden 42 Merkmale berechnet

Typen sind eher unbalanciert

Seltene Klassen wurden verworfen

Einige extrem korrelierte Merkmale wurden verworfen (31 übrig)

Rangfolge der 31 Merkmale nach Wichtigkeit

Geschichtete 4-fache Kreuzvalidierung fürs Experiment

Anwendung und Ergebnisse

Regelbasis für NEFCLASS:

Rule base

- ☞ Rule 1: IF (max_distance_to_cog IS fun 2 AND min_extrema IS fun 1 AND max_extrema IS fun 1) THEN type IS press_mark
- ☞ Rule 2: IF (max_distance_to_cog IS fun 2 AND all_extrema IS fun 1 AND max_extrema IS fun 2) THEN type IS sink_mark
- ☞ Rule 3: IF (max_distance_to_cog IS fun 3 AND min_extrema IS fun 2 AND max_extrema IS fun 2) THEN type IS uneven_surface
- ☞ Rule 4: IF (max_distance_to_cog IS fun 2 AND min_extrema IS fun 2 AND max_extrema IS fun 2) THEN type IS uneven_surface
- ☞ Rule 5: IF (max_distance_to_cog IS fun 2 AND all_extrema IS fun 1 AND min_extrema IS fun 2) THEN type IS press_mark
- ☞ Rule 6: IF (max_distance_to_cog IS fun 3 AND all_extrema IS fun 2 AND max_extrema IS fun 3) THEN type IS uneven_surface
- ☞ Rule 7: IF (max_distance_to_cog IS fun 3 AND min_extrema IS fun 3) THEN type IS uneven_surface

Klassifikationsgenauigkeit:

	NBC	DTree	NN	NEFCLASS	DC
Trainingsmenge	89.0%	94.7%	90%	81.6%	46.8%
Testmenge	75.6%	75.6%	85.5%	79.9%	46.8%

Schwarm- und populationsbasierte Optimierung

Schwarm-Intelligenz

Bereich der KI, der intelligente Multi-Agentensysteme entwickelt
Inspiration durch das Verhalten bestimmter Tierarten, speziell sozialer Insekten (z.B. Ameisen, Termiten, Bienen, etc.) und in Schwärmen lebender Tiere (z.B. Fische, Vögel, etc.)

Tiere dieser Arten können recht komplexe Aufgaben lösen (Finden von Nahrungsquellen, Wegesuche, Nestbau, etc.), indem sie kooperieren.

Wesentliche Ideen

Ziemlich einfache Einzelindividuen mit begrenzten Fähigkeiten
Koordination ohne zentrale Steuerung, lediglich Selbstorganisation
Austausch von Informationen zwischen Individuen (Kooperation)
Klassifizierung der Verfahren nach Art des Informationsaustausches

Verfahren

Genetische/Evolutionäre Algorithmen

Biologisches Vorbild: Evolution der Lebewesen

Informationsaustausch durch Rekombination der Genotypen

Jedes Individuum ist ein Lösungskandidat

Verfahren

Teilenschwarmoptimierung

Biologisches Vorbild: Futtersuche von Fisch- und Vogelschwärmen
Informationsaustausch über einfache Aggregation der
Einzellösungen
Jedes Individuum ist ein Lösungskandidat

Ameisenkolonialgorithmen

Biologisches Vorbild: Wegesuche zu Futterquellen durch Ameisen
Informationsaustausch über Veränderung der Umgebung
(Stigmergie, erweiterter Phänotyp nach Dawkins)
Individuen konstruieren Lösungskandidaten

Teilenschwarmoptimierung



© Eric T. Schulz <http://www.eeb.uconn.edu/courses/eeb296/>



© Ariel Bravy <http://www.skphoton.com/albums/>

Fische, Vögel suchen in Schwärmen nach ergiebigen Futterplätzen. Orientierung anhand individueller Suche (kognitiver Anteil) und an anderen Mitgliedern des Schwarmes in ihrer Nähe (sozialer Anteil) Außerdem: Leben im Schwarm schützt Individuen gegen Fressfeinde.

Biologische Vorbilder: Fische



©http://s3.amazonaws.com/xlsuite_production/assets/51840/fish-swarm.jpg

2-3 Artgenossen geben individuellem Fisch im Schwarm Orientierung
Anpassung von Geschwindigkeit und Richtung, sodass Winkel
zwischen Schwimmrichtung und nächsten Artgenossen: $45-135^\circ$
Andere Fische werden ignoriert

Garantie, dass Schwarm ständig vorwärtsschwimmt und
Abweichler nicht Gesamtrichtung beeinflussen

Teilenschwarmoptimierung

Motivation: Verhalten von z.B. Fischschwärmen bei der Futtersuche: zufälliges Ausschwärmen, aber stets auch Rückkehr zum Schwarm, Informationsaustausch zwischen Mitgliedern

Ansatz: verwende statt nur einzelnen aktuellen Lösungskandidaten „Schwarm“ von m Lösungskandidaten

Voraussetzung: $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ und somit zu optimierende (o.B.d.A.: zu maximierende) Funktion $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

Vorgehen: fasse jeden Lösungskandidaten als „Teilchen“ auf, das Ort \mathbf{x}_i im Suchraum und Geschwindigkeit \mathbf{v}_i hat ($i = 1, \dots, m$)
Vereinigt Elemente der bahnorientierten Suche (z.B. Gradientenverfahren) und populationsbasierter Suche (z.B. EA)

Teilenschwarmoptimierung

Aktualisierung für Ort und Geschwindigkeit des i -ten Teilchens:

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \alpha \mathbf{v}_i(t) + \beta_1 \left(\mathbf{x}_i^{(\text{lokal})}(t) - \mathbf{x}_i(t) \right) + \beta_2 \left(\mathbf{x}^{(\text{global})}(t) - \mathbf{x}_i(t) \right)$$

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t)$$

Parameter: β_1, β_2 zufällig in jedem Schritt, α mit t abnehmend

$\mathbf{x}_i^{(\text{lokal})}$ ist **lokales Gedächtnis** des Individuums (Teilchens): der beste Ort im Suchraum, den Teilchen bisher besucht hat, d.h.

$$\mathbf{x}_i^{(\text{lokal})} = \mathbf{x}_i \left(\arg \max_{u=1}^t f(\mathbf{x}_i(u)) \right)$$

$\mathbf{x}^{(\text{global})}$ ist **globales Gedächtnis** des Schwarms: der beste Ort im Suchraum, den Individuum des Schwarms bisher besucht hat (beste bisher gefundene Lösung), d.h.

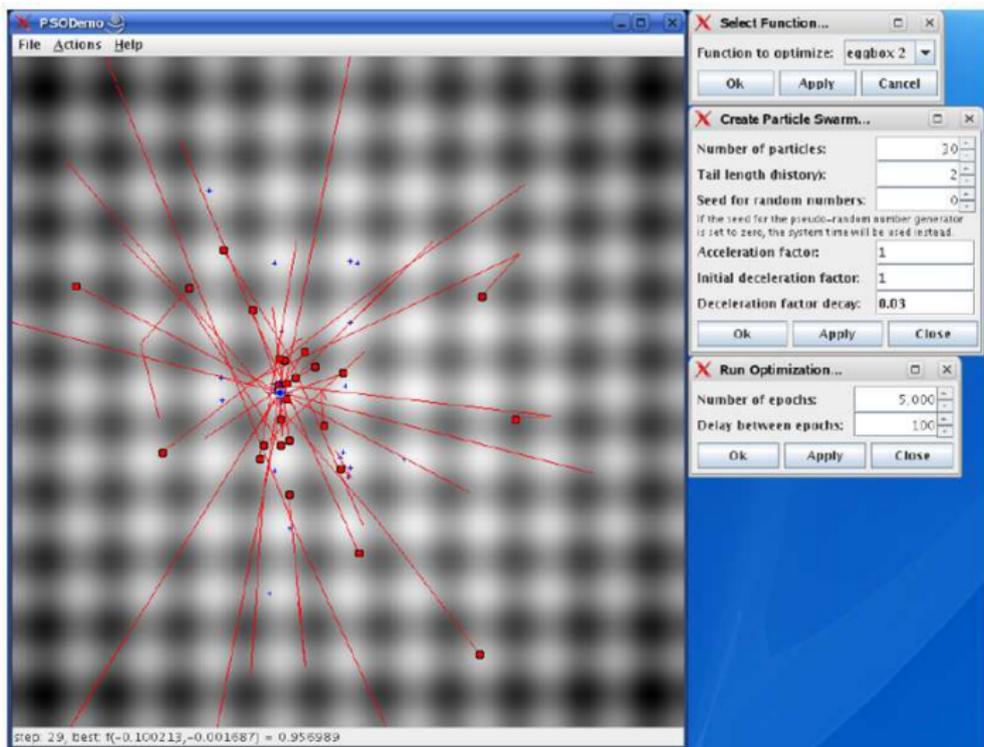
$$\mathbf{x}^{(\text{global})}(t) = \mathbf{x}_j^{(\text{lokal})}(t) \quad \text{mit} \quad j = \arg \max_{i=1}^m f \left(\mathbf{x}_i^{(\text{lokal})} \right)$$

Algorithmus 1 Teilenschwarmoptimierung

```

1: for each Teilchen  $i$  {
2:    $\mathbf{x}_i \leftarrow$  wähle zufällig im Suchraum  $\Omega$ 
3:    $\mathbf{v}_i \leftarrow 0$ 
4: }
5: do {
6:   for each Teilchen  $i$  {
7:      $y \leftarrow f(\mathbf{x}_i)$ 
8:     if  $y \geq f(\mathbf{x}_i^{(\text{lokal})})$  {
9:        $\mathbf{x}_i^{(\text{lokal})} \leftarrow \mathbf{x}_i$ 
10:    }
11:    if  $y \geq f(\mathbf{x}_i^{(\text{global})})$  {
12:       $\mathbf{x}_i^{(\text{global})} \leftarrow \mathbf{x}_i$ 
13:    }
14:  }
15:  for each Teilchen  $i$  {
16:     $\mathbf{v}_i(t+1) \leftarrow \alpha \cdot \mathbf{v}_i(t) + \beta_1 \left( \mathbf{x}_i^{(\text{lokal})}(t) - \mathbf{x}_i(t) \right) + \beta_2 \left( \mathbf{x}_i^{(\text{global})}(t) - \mathbf{x}_i(t) \right)$ 
17:     $\mathbf{x}_i(t+1) \leftarrow \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t)$ 
18:  }
19: } while Terminierungskriterium ist nicht erfüllt
  
```

Teilenschwarmoptimierung



PSODemo

File Actions Help

step 29, best $f(-0.100213, -0.001687) = 0.956989$

Select Function...

Function to optimize: eggbox 2

Ok Apply Cancel

Create Particle Swarm...

Number of particles: 30

Tail length history: 2

Seed for random numbers: 0

Acceleration factor: 1

Initial deceleration factor: 1

Deceleration factor decay: 0.03

Ok Apply Close

Run Optimization...

Number of epochs: 5,000

Delay between epochs: 100

Ok Apply Close

Ameisenkolonieoptimierung



© PeTA <http://www.helpingwildlife.com/ants.asp>



© NickLyonMedia <http://nicklyon.orchardhostings4.co.uk>

Da gefundenes Futter zur Versorgung der Nachkommen zum Nest transportiert werden muss, bilden Ameisen Transportstraßen
Weglängen zu Futterplätzen werden annähernd minimiert

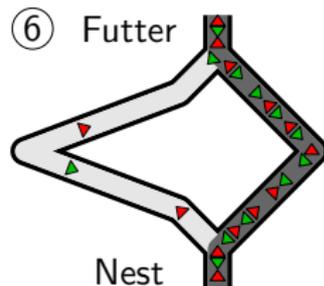
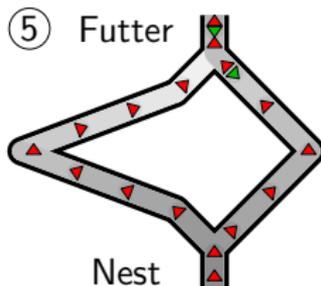
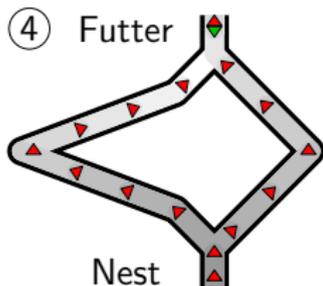
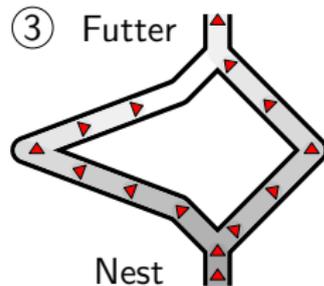
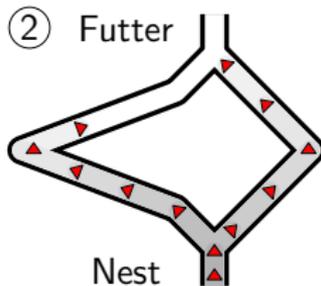
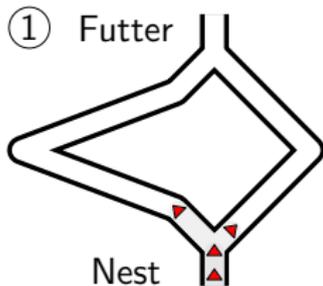
Doppelbrückenexperiment

Ameisennest und Futterquelle werden durch Doppelbrücke verbunden (beiden Zweige der Brücke sind verschieden lang)

Experiment mit argentinischer Ameise *Iridomyrmex Humilis*: diese Ameisenart ist (wie fast alle anderen auch) fast blind (Ameisen können also nicht sehen, welcher Weg kürzer ist)

Schon nach wenigen Minuten: in meisten Versuchen benutzen fast alle Ameisen kürzeren Weg

Doppelbrückenexperiment



Doppelbrückenexperiment

Auf kürzerem Weg erreichen Ameisen Futter schneller (Ende des kürzeren Weges erhält daher (am Anfang) mehr Pheromon)
Auf Rückweg wird wegen entstandener Pheromondifferenz mit höherer W'keit kürzerer Weg gewählt (führt zu einer Verstärkung der Pheromondifferenz)

Ameisenkolonieoptimierung

Motivation: Ameisen einiger Arten finden kürzeste Wege zu Futterquellen durch Legen und Verfolgen von Pheromon („Duftmarken“)

Intuitiv: kürzere Wege erhalten in gleicher Zeit mehr Pheromon
Wege werden zufällig nach vorhandenen Pheromonmenge gewählt
(es ist um so wahrscheinlicher, dass ein Weg gewählt wird, je mehr Pheromon sich auf Weg befindet)

Menge des ausgebrachten Pheromons kann von Qualität und Menge des gefundenen Futters abhängen

Grundprinzip: Stigmergie (engl. stigmergy)

Ameisen kommunizieren indirekt über Pheromonablagerungen
Stigmergie (indirekte Kommunikation durch Veränderung der Umgebung) ermöglicht global angepasstes Verhalten aufgrund lokaler Informationen

Natürliche und künstliche Ameisen

abstrahiere zu Suche nach bestem Weg in gewichtetem Graphen

Problem: Kreise, die sich selbst verstärken (durchläuft Ameise Kreis, erzeugt sie durch abgelegtes Pheromon Tendenz, Kreis erneut zu durchlaufen)

Abhilfe: Ablegen von Pheromon erst nach Konstruktion des ganzen Weges (Entfernen von Kreisen, bevor Pheromon abgelegt wird)

Problem: Ggf. konzentriert sich Suche auf am Anfang konstruierte Lösungskandidaten (vorzeitige Konvergenz)

Abhilfe: Pheromonverdunstung (spielt in Natur geringe Rolle)

Nützliche Erweiterungen/Verbesserungen

Abgelegte Pheromonmenge hängt von Lösungsgüte ab
Einbringen von Heuristiken in Kantenwahl (z.B. Kantengewicht)

Ameisenkolonieoptimierung

Voraussetzungen: kombinatorisches Optimierungsproblem mit konstruktiver Methode, zur Erzeugung eines Lösungskandidaten

Vorgehen: Lösungen werden durch Folge von Zufallsentscheidungen konstruiert, wobei jede Entscheidung Teillösung erweitert

Entscheidungsfolge = Pfad in Entscheidungsgraphen (auch: Konstruktionsgraphen)

Ameisen sollen Pfade durch Entscheidungsgraphen erkunden und besten (kürzesten, billigsten) Weg finden

Ameisen markieren benutzte Kanten des Graphen mit Pheromon
⇒ andere Ameisen werden zu guten Lösungen geleitet

Pheromon verdunstet in jeder Iteration, damit einmal ausgebrachtes Pheromon System nicht zu lange beeinflusst („Vergessen“ veralteter Information)

Anwendung auf TSP

Darstellung des Problems durch $n \times n$ Matrix $\mathbf{D} = (d_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$
 n Städte mit Abständen d_{ij} zwischen Städte i und j

Beachte: \mathbf{D} kann asymmetrisch sein, aber $\forall i \in \{1, \dots, n\} : d_{ii} = 0$

Pheromoninformation als $n \times n$ Matrix $\Phi = (\phi_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$

Pheromonwert $\phi_{ij} (i \neq j)$ gibt an, wie wünschenswert es ist, Stadt j direkt nach Stadt i zu besuchen (ϕ_{ii} nicht benötigt)

Φ muss nicht notwendig symmetrisch sein/gehalten werden

Alle ϕ_{ij} werden mit gleichen kleinen Wert initialisiert (anfangs liegt auf allen Kanten gleiche Menge Pheromon)

Ameisen durchlaufen (durch Pheromon) Hamiltonkreise (sie markieren Kanten des durchlaufenden Hamiltonkreises mit Pheromon, wobei ausgebrachte Pheromonmenge der Lösungsqualität entspricht)

Lösungskonstruktion

Jede Ameise hat „Gedächtnis“ C , welche Indizes der noch nicht besuchten Städte enthält

Jede besuchte Stadt wird aus Menge C entfernt

Gedächtnis gibt es im biologischen Vorbild nicht!

Ameise wird in zufällig bestimmter Stadt gesetzt (Anfang der Rundreise)

Ameise wählt noch nicht besuchte Stadt und begibt sich in diese:
in Stadt i wählt Ameise (unbesuchte) Stadt j mit W 'keit

$$p_{ij} = \frac{\phi_{ij}}{\sum_{k \in C} \phi_{ik}}$$

Wiederhole Schritt 2 bis alle Städte besucht

Pheromonaktualisierung

1. Verdunstung/Evaporation

alle ϕ_{ij} werden um Bruchteil η (evaporation) verringert:

$$\forall i, j \in \{1, \dots, n\} : \phi_{ij} = (1 - \eta) \cdot \phi_{ij}$$

2. Verstärkung konstruierter Lösungen

Kanten der konstruierten Lösungen werden mit zusätzlicher Menge an Pheromon belegt, die Lösungsqualität entspricht:

$$\forall \pi \in \Pi_t : \phi_{\pi(i)\pi((i \bmod n)+1)} = \phi_{\pi(i)\pi((i \bmod n)+1)} + Q(\pi)$$

Π_t ist Menge der im Schritt t konstruierten Rundreisen (Permutationen), Qualitätsfunktion: z.B. inverse Reiselänge

$$Q(\pi) = c \cdot \left(\sum_{i=1}^n d_{\pi(i)\pi((i \bmod n)+1)} \right)^{-1}$$

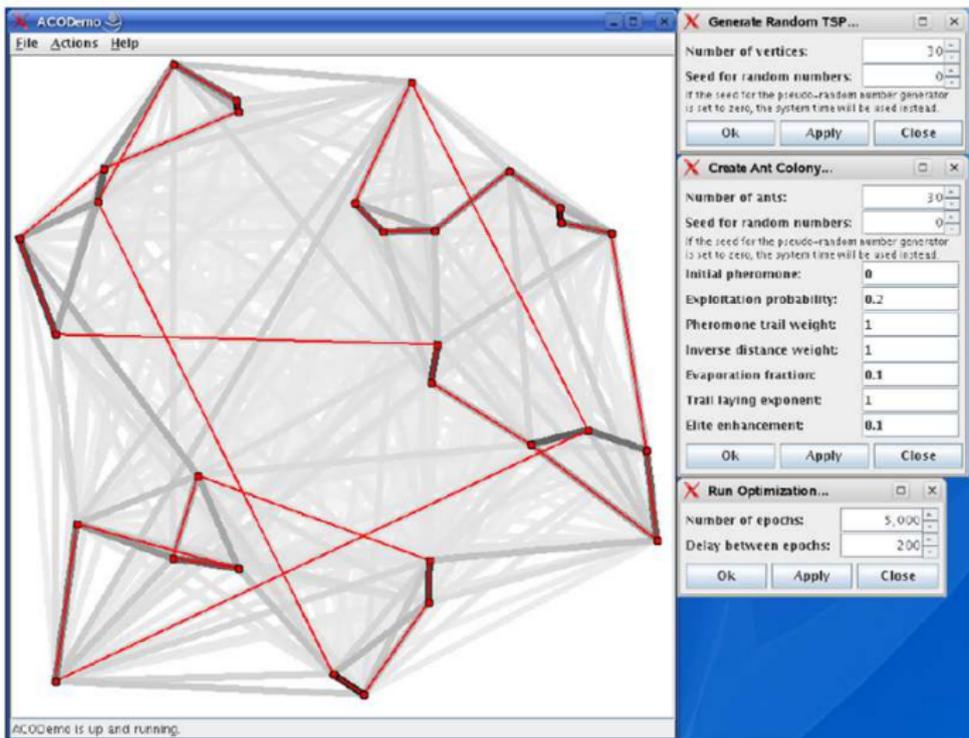
„Je besser Lösung, desto mehr Pheromon erhalten deren Kanten.“

Problem des Handlungsreisenden

Algorithmus 2 Ameisenkolonieoptimierung für das TSP

```
1: initialisiere alle Matricelemente  $\phi_{ij}$ ,  $1 \leq i, j \leq n$ , auf kleinen Wert  $\epsilon$ 
2: do {
3:   for each Ameise {                               /* konstruiere Lösungskandidaten */
4:      $C \leftarrow \{1, \dots, n\}$                    /* Menge der zu besuchenden Städte */
5:      $i \leftarrow$  wähle zufällig Anfangsstadt aus  $C$ 
6:      $C \leftarrow C \setminus \{i\}$                  /* entferne sie aus den unbesuchten Städten */
7:     while  $C \neq \emptyset$  {                       /* solange nicht alle Städte besucht wurden */
8:        $j \leftarrow$  wähle nächste Stadt der Reise aus  $C$  mit  $W$ 'keit  $p_{ij}$ 
9:        $C \leftarrow C \setminus \{j\}$                /* entferne sie aus den unbesuchten Städten */
10:       $i \leftarrow j$                                /* und gehe in die ausgewählte Stadt */
11:    }
12:  }
13:  aktualisiere Pheromon-Matrix  $\Phi$  nach Lösungsgüte
14: } while Terminierungskriterium ist nicht erfüllt
```

Ameisenkolonieoptimierung



The screenshot displays the ACODemo application window, which is used for demonstrating Ant Colony Optimization (ACO) on a Traveling Salesman Problem (TSP). The main window shows a graph with 30 vertices and a set of edges. A red path highlights the current solution, while a grey path shows the previous iteration. The status bar at the bottom indicates "ACODemo is up and running."

Three dialog boxes are open on the right side of the window:

- Generate Random TSP...:**
 - Number of vertices: 30
 - Seed for random numbers: 0
 - Buttons: Ok, Apply, Close
- Create Ant Colony...:**
 - Number of ants: 30
 - Seed for random numbers: 0
 - Initial pheromone: 0
 - Exploitation probability: 0.2
 - Pheromone trail weight: 1
 - Inverse distance weight: 1
 - Evaporation fraction: 0.1
 - Trail laying exponent: 1
 - Elite enhancement: 0.1
 - Buttons: Ok, Apply, Close
- Run Optimization...:**
 - Number of epochs: 5,000
 - Delay between epochs: 200
 - Buttons: Ok, Apply, Close

Allg. Anwendung zur Optimierung

Grundsätzliches Prinzip

Formuliere Problem als Suche in (Entscheidungs-)Graphen, Lösungskandidaten müssen durch Kantenmengen beschreibbar sein, (beachte: es muss sich nicht notwendigerweise um Pfade handeln!)

Allgemeine Beschreibung: im folgenden jeweils angegeben:

- Knoten, Kanten des Entscheidungs-/Konstruktionsgraphen
- Einzuhaltende Nebenbedingungen
- Bedeutung des Pheromons auf Kanten (und evtl. Knoten)
- Nutzbare heuristische Hilfsinformation
- Konstruktion eines Lösungskandidaten

Algorithmisches Vorgehen ist i.W. analog zu Vorgehen beim TSP

Allg. Anwendung zur Optimierung: TSP

Knoten und Kanten des Entscheidungs-/Konstruktionsgraphen: die zu besuchenden Städte und ihre Verbindungen, die Verbindungen sind gewichtet (Abstand, Zeit, Kosten)

einzuhaltende Nebenbedingungen: besuche jede Stadt genau 1x

Bedeutung des Pheromons auf den Kanten: wie wünschenswert ist es, Stadt j nach Stadt i zu besuchen

nutzbare heuristische Hilfsinformation: Abstand der Städte, bevorzuge nahe Städte

Konstruktion eines Lösungskandidaten: ausgehend von zufällig gewählter Stadt wird stets zu einer weiteren, noch nicht besuchten Stadt fortgeschritten

Allg. Anwendung zur Optimierung: Zuordnungsproblem

Ordne n Aufgaben zu m Arbeiter (Personen, Maschinen): Minimierung der Summe der Zuordnungskosten d_{ij} unter Einhaltung maximaler Kapazitäten ρ_j bei gegebenen Kapazitätskosten

$$r_{ij}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$$

Jede Aufgabe und jeder Arbeiter = Knoten des Konstruktionsgraphen (Kanten tragen die Zuordnungskosten d_{ij})

Jede Aufgaben muss genau einem Arbeiter zugeordnet werden (Kapazitäten der Arbeiter nicht überschreiten)

Pheromonwerte auf Kanten beschreiben, wie wünschenswert Zuordnung einer Aufgabe an Arbeiter ist

Inverse absolute oder relative r_{ij} oder inverse d_{ij}

Wähle schrittweise Kanten (müssen keinen Pfad bilden), übergehe Kanten von bereits zugeordneten Aufgaben (bestrafe Lösungen, die Nebenbedingungen verletzen (Kostenerhöhung))

Allg. Anwendung zur Optimierung: Rucksackproblem

Wähle aus n Objekten mit zugeordnetem Wert w_i , Gewicht g_i , Volumen v_i , etc. $1 \leq i \leq n$, Teilmenge maximalen Wertes aus, sodass Maximalwerte für Gewicht, Volumen, etc. eingehalten

Jedes Objekt = Knoten des Konstruktionsgraphen (Knoten tragen Objektwerte w_i , Kanten nicht benötigt)

Maximalwerte für Gewicht, Volumen, etc. müssen eingehalten werden

Pheromonwerte: nur Knoten zugeordnet (sie beschreiben, wie wünschenswert Auswahl des zugehörigen Objektes)

Verhältnis von Objektwert zu relativem Gewicht, Volumen, etc. wobei in den Verhältnissen die Maximalwerte berücksichtigt werden können

Wähle schrittweise Knoten aus, wobei in jedem Schritt sichergestellt, dass Maximalwerte eingehalten

Konvergenz der Suche

betrachte „Standardverfahren“ mit folgenden Eigenschaften:

Verdunstung des Pheromons mit konstantem Faktor von allen Kanten

Nur auf Kanten des besten, bisher gefundenen Lösungskandidaten wird Pheromon abgelegt (strenges Eliteprinzip)

\exists Untergrenze ϕ_{\min} für Pheromonwerte der Kanten, welche nicht unterschritten wird

Standardverfahren konvergiert in W' keit gegen Lösung, d.h. mit $t \rightarrow \infty$ geht W' keit, dass Lösung gefunden wird, gegen 1

Lässt man Untergrenze ϕ_{\min} für Pheromonwerte „genügend langsam“ gegen 0 gehen ($\phi_{\min} = \frac{c}{\ln(t+1)}$ mit Schrittzahl t und Konstante c), kann man zeigen, dass für $t \rightarrow \infty$ jede Ameise der Kolonie Lösung mit gegen 1 gehender W' keit konstruiert

Zusammenfassung

Schwarm- und populationsbasierte Algorithmen: **Heuristiken zur Lösung von Optimierungsproblemen**

Ziel: Finden guter Näherungslösungen

Problem der lokalen Optima: Reduzierung durch bessere Durchforstung des Suchraums

Wichtig: **Informationsaustausch** zwischen Individuen (je nach Prinzip: verschiedene Algorithmentypen)

Teilchenschwarmoptimierung

Optimierung einer Funktion mit reellen Argumenten

Informationsaustausch durch Orientierung an Nachbarn

Ameisenkolonieoptimierung

Suche nach besten Wegen (abstrakt: in einem Entscheidungsgraphen)

Informationsaustausch durch Veränderung der Umgebung (Stigmergie)

Literatur

-  Birattari, M., Di Caro, G. A., Doursat, R., Engelbrecht, A. P., Floreano, D., Gambardella, L. M., Groß, R., Sahin, E., Stützle, T., and Sayama, H. (2010). *Swarm Intelligence*. Springer.
-  Clerc, M. (2010). *Particle Swarm Optimization*. John Wiley & Sons.
-  Goss, S., Aron, S., Deneubourg, J.-L., and Pasteels, J. M. (1989). Self-organized shortcuts in the argentine ant. *Naturwissenschaften*, pages 579–581.
-  Kruse, R., Borgelt, C., Braune, C., Moewes, C., and Steinbrecher, M. (2015). *Computational Intelligence: Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze*. Springer Vieweg, Wiesbaden.