



# Intelligente Systeme

## Einführung

Prof. Dr. Rudolf Kruse    Georg Ruß  
Christian Moewes

`{kruse,russ,cmoewes}@iws.cs.uni-magdeburg.de`

Arbeitsgruppe Computational Intelligence  
Institut für Wissens- und Sprachverarbeitung  
Fakultät für Informatik  
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg



# Gliederung der Vorlesung

- 1. Einblick in die Computational Intelligence**
2. Techniken der Computational Intelligence
3. Reale Beispiele

## Computational *intelligence* Society

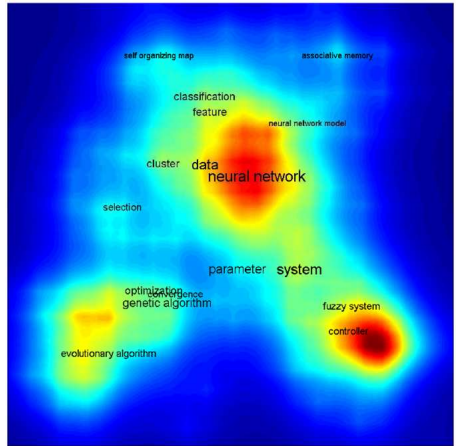
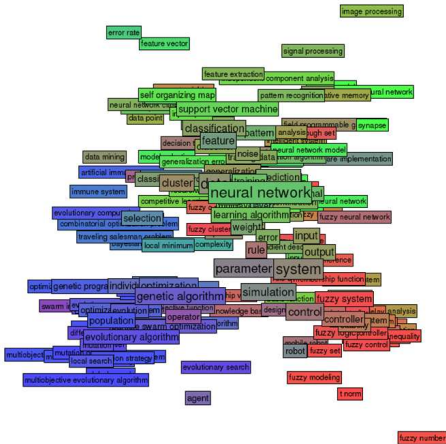
*Home of Neural Networks, Fuzzy Systems and Evolutionary Computation*



Computational Intelligence ist charakterisiert durch:

- meist modellfreie Ansätze
  - es ist kein explizites Modell des zu beschreibenden Gegenstandsbereich notwendig
  - dagegen „modellbasiert“: z.B. Lösen von Differentialgleichungen
- Approximation statt exakte Lösung (nicht immer ausreichend!)
- schnelleres Finden einer brauchbaren Lösung
  - u.U. auch ohne tiefgehende Problemanalyse

# CI-Forschungsthemen



## 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)

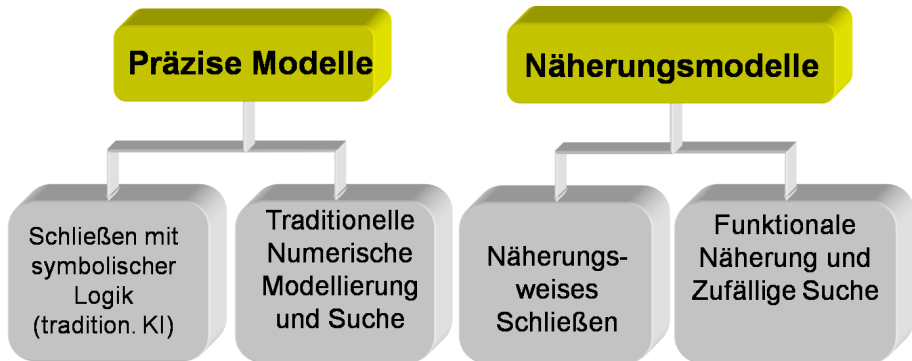
## Anwendungen

- Klassifikation
  - Überwachung/ Anomalieerkennung
  - Diagnose
  - Prognose
  - Konfiguration/Initialisierung
- Vorhersage
  - Qualitätskontrolle
  - Alterungsprozessmodellierung
- Terminplanung
  - Zeit-/Ressourcenzuweisung
- Regelung
  - Maschinen-/Prozesskontrolle
  - Prozessinitialisierung
  - Überwachungskontrolle
- Automatische Entscheidung
  - Kosten-/Risikoanalyse
  - Einkommensoptimierung

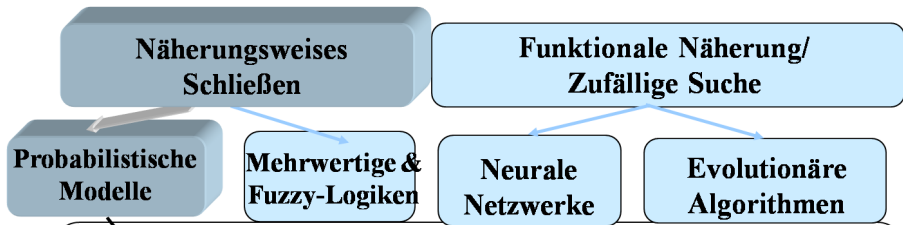
# Gliederung der Vorlesung

1. Einblick in die Computational Intelligence
- 2. Techniken der Computational Intelligence**
3. Reale Beispiele

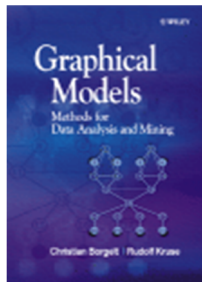
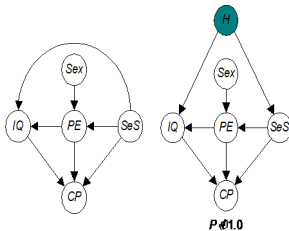
# Techniken zum Lösen von Problemen



# Computational Intelligence



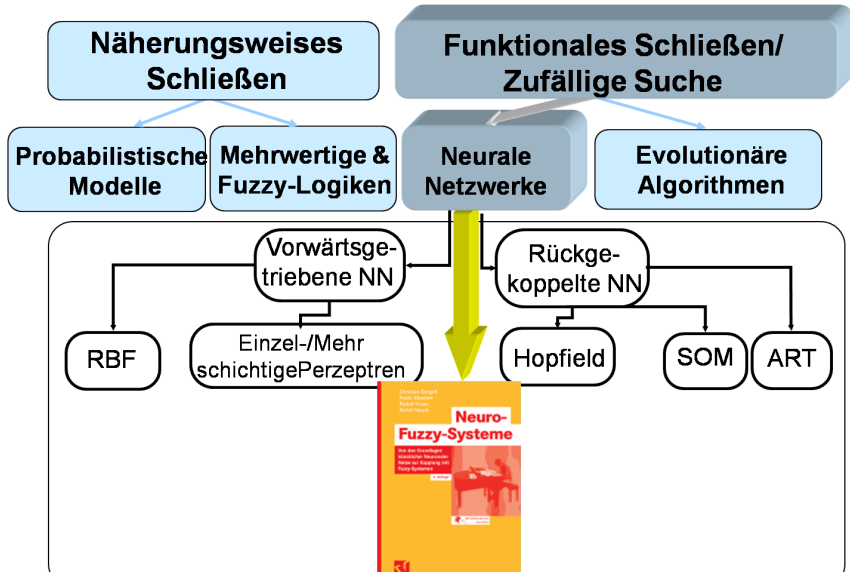
Grafische Modelle





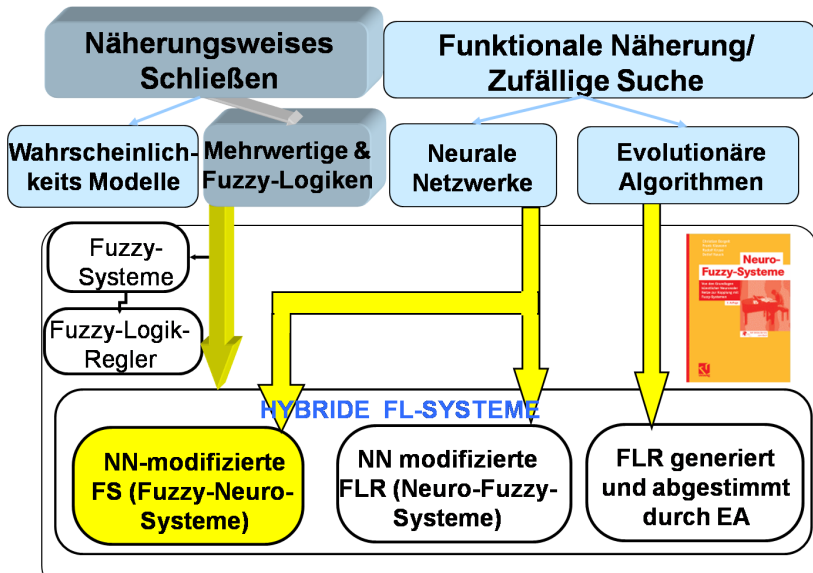
# Computational Intelligence

## Neuronale Netzwerke



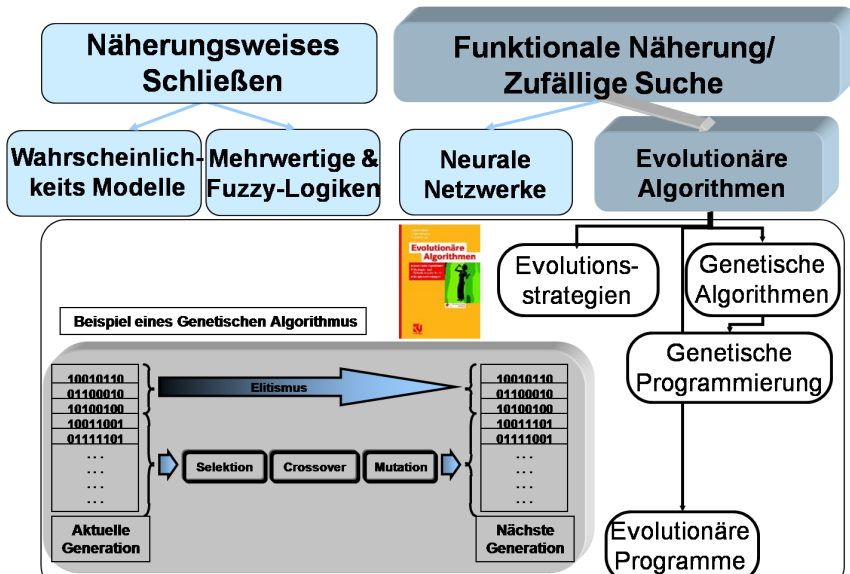
# Computational Intelligence

## Hybride Neuro-Fuzzy-Systeme



# Computational Intelligence

## EA-Systeme



# Computational Intelligence

## 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)



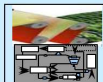
### Transportsysteme

- 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)

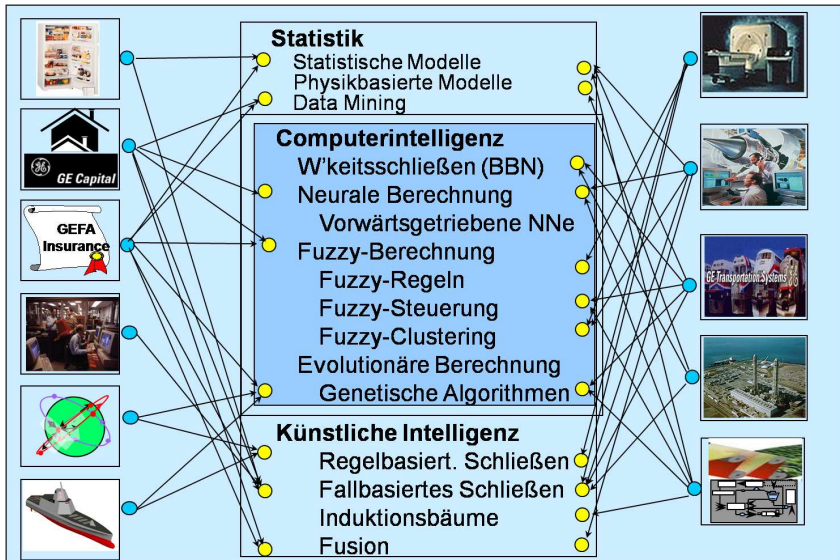


### Industriesysteme

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

# Computational Intelligence

## Grundlage und verwandte Technologien



# Gliederung der Vorlesung

1. Einblick in die Computational Intelligence
2. Techniken der Computational Intelligence
- 3. Reale Beispiele**
  - DAX-Prognosen
  - Neuro-Fuzzy-Systeme
  - Qualitätskontrolle
  - Flugroutenplanung

# Beispiel: DAX-Prognosen

Datenbasis: Zeitreihe von 1986–1997

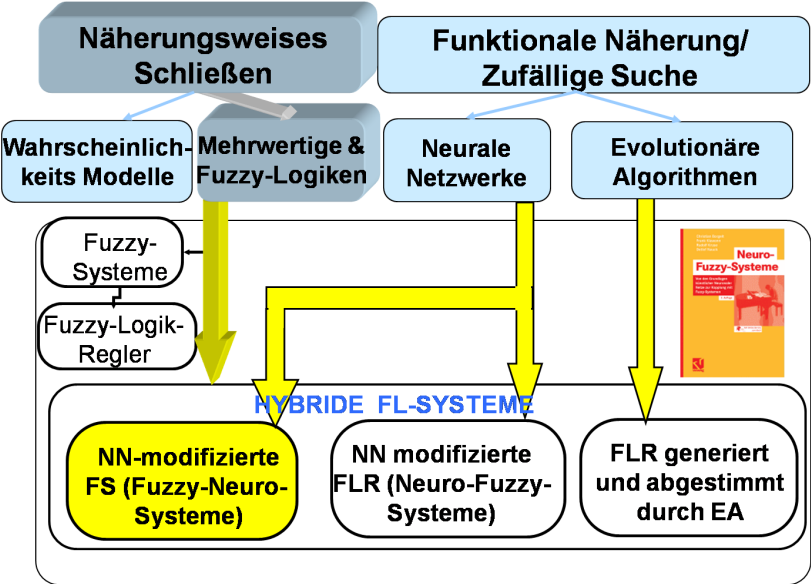
DAX	Composite-DAX
Deutsche 3-Monate-Zinsrate	Return Germany
Deutscher Morgan-Stanley-Index	Industrie-Index des Dow Jones
DM / US-\$	US Schatzanweisungen
Goldpreis	Japanischer Nikkei-Index
Europäischer Morgan-Stanley-Index	Verhältnis von Preis und Ertrag

# Fuzzy-Regeln in der Finanzwelt

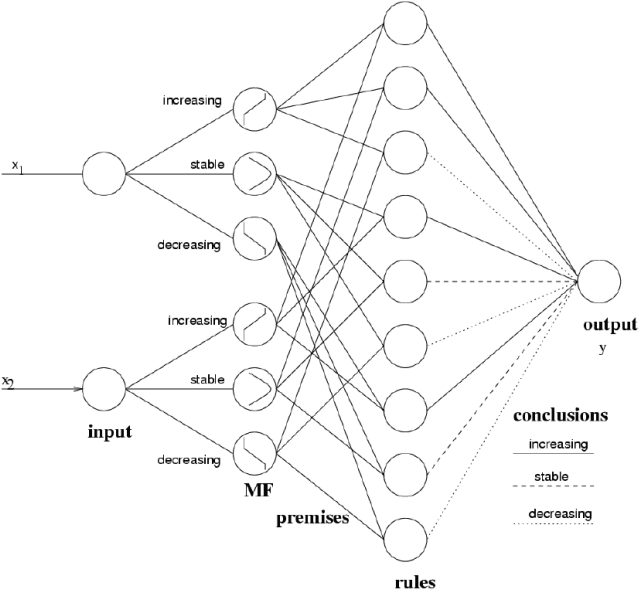
- Entwicklungsregel
  - WENN DAX = fallend UND US-\$ = fallend
  - DANN DAX-Voraussage = fallend
  - MIT hoher Gewissheit
- Wendepunktregel
  - WENN DAX = fallend UND US-\$ = steigend
  - DANN DAX-Voraussage = steigend
  - MIT niedriger Gewissheit
- Verzögerungsregel
  - WENN DAX = stabil UND US-\$ = fallend
  - DANN DAX-Voraussage = fallend
  - MIT sehr hoher Gewissheit
- generell
  - WENN  $x_1$  ist  $\mu_1$  (UND  $x_2$  ist  $\mu_2 \dots$ )
  - DANN  $y = \eta$
  - MIT Gewicht  $k$



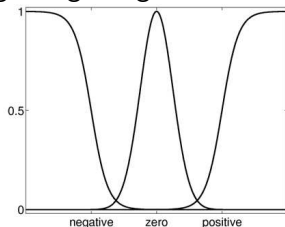
# Neuro-Fuzzy-Architektur



# Neuro-Fuzzy-Architektur



## 1. Bestimmung der Zugehörigkeitsgrade



## 2. Bestimmung der Regeln (Regelaktivität)

$$\mu_l = \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]^r, \quad \underline{x} \Rightarrow \prod_{j=1}^{D_l} \mu_{c,s}^{(j)}(x_i)$$

## 3. Summierung der Regeleingaben und Normalisierung

$$\text{NF} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad \underline{x} \Rightarrow \sum_{l=1}^r w_l \frac{k_l \mu_l(\underline{x})}{\sum_{j=1}^r k_j \mu_j(\underline{x})}$$

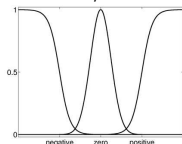
# Reduktion der Dimension des Gewichtsraumes

## Semantikerhaltender Rückpropagationslernalgorithmus

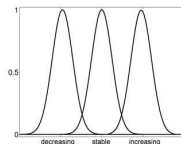
1. Zugehörigkeitsfunktionen verschiedener Eingaben teilen ihre Parameter, z.B.

$$\mu_{\text{DAX}}^{\text{stabil}} = \mu_{\text{C-DAX}}^{\text{stabil}}$$

2. Zugehörigkeitsfunktionen gleicher Eingabevariablen dürfen sich nicht aneinander vorbei schieben. Sie müssen ihre ursprüngliche Ordnung behalten, z.B.



$$\mu_{\text{fallend}} < \mu_{\text{stabil}} < \mu_{\text{steigend}}$$

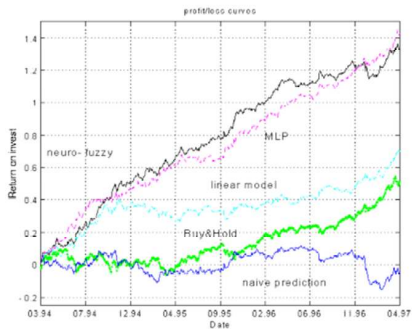
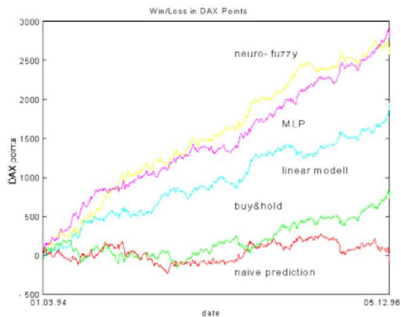


## Vorteile

- optimierte Regelbasis can noch interpretiert werden
- Anzahl der freien Parameter wird reduziert

# Return-on-Investment-Kurven verschiedener Modelle

Validierungsdaten vom 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% after 180 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.
- List of Variables:** A list containing 'sepal length', 'sepal width', 'petal length', and 'petal width'.
- Rule Learning:** A text window reporting: '20 possible rules found. Now determine the optimal combination of consequences 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 patterns 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 rules. 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 with the NEFCLASS-J logo and text: 'NEFCLASS-J Version 1.0 Programming and GUI Design Ulrike Nauck NEFCLASS Model and Learning Algorithms Dr. Detlef Nauck (c) Ulrike Nauck, Braunschweig, 1998'.

## Heutiges Verfahren

Die momentane Oberflächekontrolle wird per Hand durchgeführt. Ein erfahrener Arbeiter bearbeitet die äußere Oberfläche mit einem Schleifstein. Die Experten klassifizieren Abweichungen der Oberflächenform durch sprachliche Beschreibungen. umständlich, subjektiv, fehleranfällig, zeitaufwendig



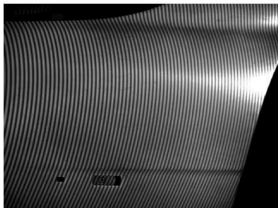
## Der vorgeschlagene Ansatz

Unser Ansatz basiert auf die Digitalisierung der äußeren Oberfläche mit optischen Messsystemen. Wir charakterisieren die Formabweichungen durch mathematische Eigenschaften, die nahe der subjektiven Merkmale sind, welche die Experten in ihren sprachlichen Beschreibungen nutzen.

# Topometrisches 3D-Messsystem

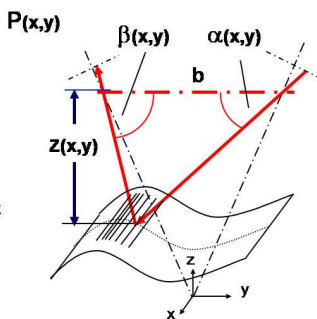


breuckmann 



## Triangulation und Gitterprojektion

0  
1  
0  
0  
⋮  
Pixelkodierung

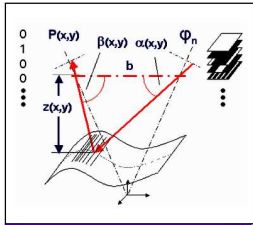


$\varphi_n$    
⋮  
Verkleinerte  
Projektionstechnik  
(Phasenverschiebung  
von Graitönen)

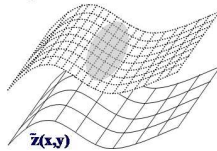
- hohe Punktdichte
- schnelle Datenansammlung
- genaue Messung
- kontakt- und harmlos



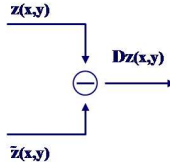
# Datenverarbeitung



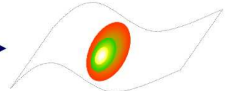
• Annäherung durch  
Polynomiale Oberfläche



• Differenz



• Farbkodierte  
• Darstellung



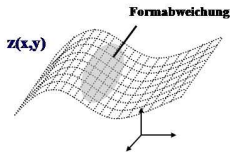
3-D-Daten-  
aufnahme

Nachverarbeitung

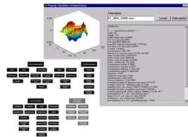
Erkennung von  
Abweichungen

Merkmalsanalyse

• 3-D-Punkt-  
wolke



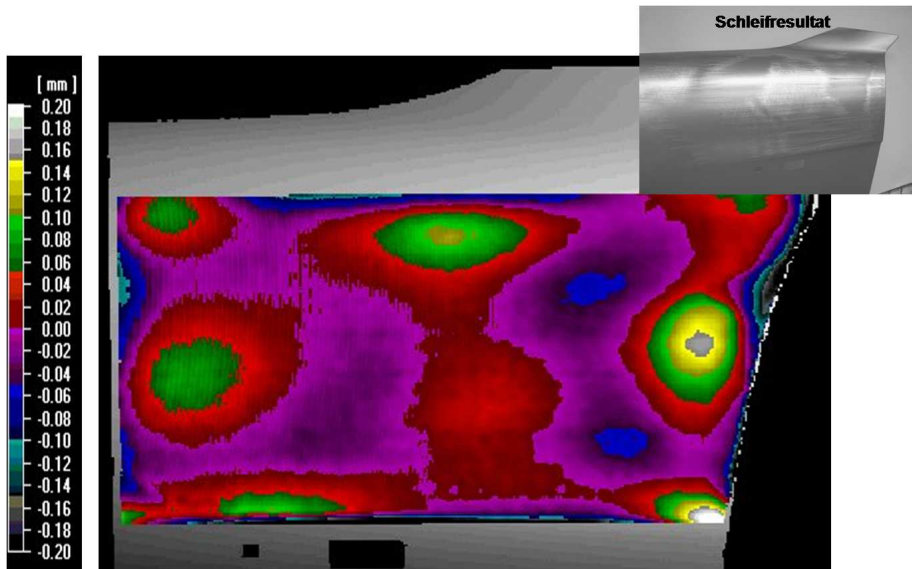
• Merkmalsberechnung



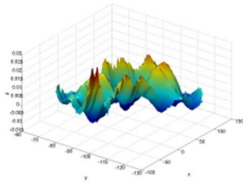
• Klassifikation (Data-Mining)



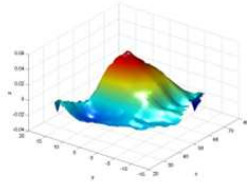
# Farbkodierte Darstellung



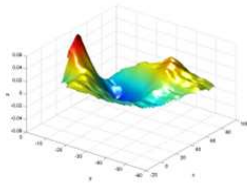
# 3D-Darstellung lokaler Oberflächendefekte



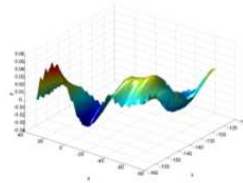
**unebene Oberfläche**  
mehrere Einfallstellen in Serie oder benachbart



**Walzenmarkierung**  
lokale Glättung der Oberfläche



**Einfallstelle**  
leichte flach basierte Senke einwärts



**Wellplatte**  
mehrere schwerere Faltungen in Serie

- 9 Meisterstücke mit insgesamt 99 Defekten analysiert
- für jeden Defekt, 42 Merkmale berechnet
- Typen sind eher unbalanciert
- seltene Klassen verworfen
- einige der extrem korrelierten Merkmale wurden verworfen (31 übrig)
- Rangfolge der 31 Merkmale nach Wichtigkeit
- geschichtete 4-fache Kreuzvalidierung fürs Experiment

## Die 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

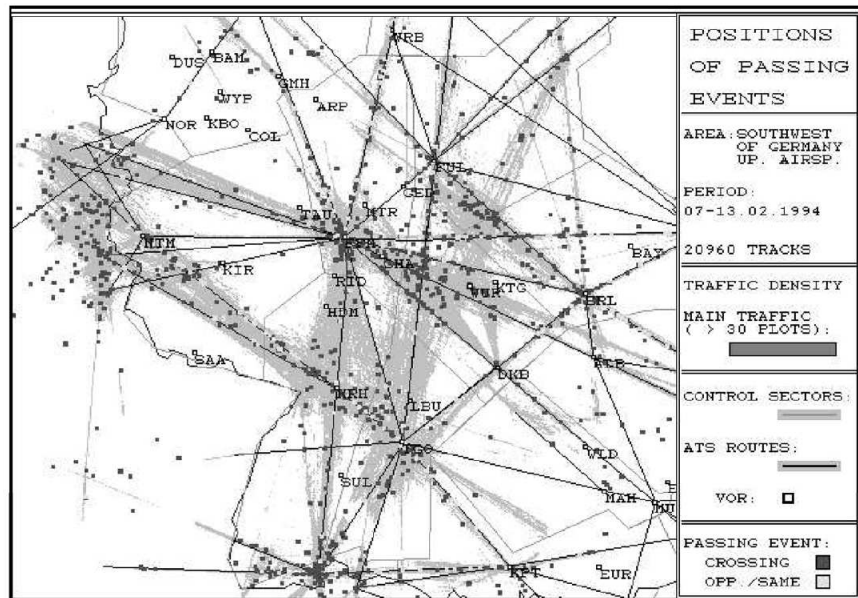
## Klassifikationsgenauigkeit

	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%

# Flugroutenplanung – Ansatz

- Flugzeuge bewegen sich im Luftraum normalerweise
  - auf Standardrouten zwischen den Flughäfen,
  - mit einem vorgeschriebenen Mindestabstand auf der gleichen Route,
  - abhängig von ihrer Flugrichtung auf unterschiedlichen Höhen.
- Vorteile dieser Lösung:
  - einfache Regeln/Vorschriften für den Flugverkehr,
  - leichte Kontrolle der Flugrouten durch die Fluglotsen,
  - große Sicherheit im Flugverkehr (i. w. Kollisionsvermeidung).
- Nachteile dieser Lösung:
  - nur ein relativ kleiner Teil des Luftraums wird genutzt,
  - die Flugzeugdichte in der Nähe von Flughäfen ist relativ eng begrenzt.
  - Diese Lösung ist dem steigenden Flugverkehr nicht mehr angemessen.

# Luftraum um Frankfurt/Main (FRA)



# Lösungsidee: Fluglotsenunterstützung

- Der Luftraum zwischen den Standardrouten muß genutzt werden, um für zukünftige Luftverkehrssteigerungen gewappnet zu sein.
- Problem dieses Ansatzes:
  - Sich freier bewegende Flugzeuge sind schwerer zu koordinieren.
  - Dadurch steigt die Arbeitsbelastung für die Fluglotsen.
- Aufgabenstellung: Entwicklung eines Unterstützungswerkzeugs, das die Konstruktion sicherer und effizienter Routen zwischen Eintritts- und Austrittspunkt in dem vom Lotsen kontrollierten Teil des Luftraumes übernimmt.
- Vorgegebene Rahmenbedingungen:
  - Eintrittszeitpunkt, Ein- und Austrittsort im kontrollierten Bereich,
  - Flugeigenschaften der kontrollierten Flugzeuge,
  - Bewegung weiterer Flugzeuge (Kollisionsvermeidung),
  - Sperrgebiete (Bebauung, militärische Nutzung, schlechtes Wetter).



# ROGENA (1)

- Der Suchraum für mögliche Flugrouten ist sehr groß;  
eine analytische Konstruktionsmethode ist schwer zu finden.  
→ Suche mit genetischen Algorithmen
- **ROGENA** (free ROuting with GENetic Algorithms) [Gerdes 1994, 1995]
- Die notwendigen Daten und Berechnungsformeln für die Beschreibung der Flugeigenschaften und des Flugverhaltens von Flugzeugen wurden der BADA-Datenbank der EUROCONTROL entnommen [Byrne 1995].
- Es wurde ein Ausschnitt von  $200 \times 200$  nautischen Meilen (NM) mit einer Höhe von 0 bis 10000 Fuß (ft) aus dem Luftraum betrachtet.
- Mindestabstände zwischen Flugzeugen: standardmäßig 5 NM, beim Endanflug zwischen 2.5 und 6 NM in Abhängigkeit vom Gewicht der beiden Flugzeuge.
- Der genetische Algorithmus beginnt erst bei Flugroutenkonflikten (Unterschreitung der Sicherheitsabstände) zu arbeiten.

# ROGENA (2)

## Kodierung der Lösungskandidaten

- Eine Flugroute wird als Sequenz von Linienstücken dargestellt (vgl. Übungsaufgabe zum Finden eines Weges durch ein Gebiet).
- Die Chromosomen haben variable Länge (variable Anzahl von Genen).

- Jedes Gen stellt einen zu überfliegenden Punkt dar; zusätzlich wird die Überfluggeschwindigkeit angegeben:

	$x$	$y$	$z$	$v$
Gen 1	86.2	15.8	1.65	258
Gen 2	88.9	24.7	1.31	252
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\cdots$	$\vdots$
Gen $k$	105.0	98.0	0.00	120

- Es müssen Nebenbedingungen eingehalten werden, z.B.
  - monoton fallende Flugroute (da Landeanflüge modelliert werden),
  - maximale Beschleunigung/Verzögerung zwischen Punkten,
  - minimaler Winkel zwischen Linienstücken (Kurvenradius) etc.

- Die Fitnessfunktion berücksichtigt folgende Eigenschaften einer Flugroute:
  - einzuhaltender Sicherheitsabstand zu anderen Flugzeugen,
  - kein Durchfliegen von gesperrtem Luftraum,
  - Länge der Flugroute bis zur Landebahn,
  - Pünktlichkeit des Fluges (planmäßige Ankunft),
  - möglichst geringe Abweichungen von der optimalen Sinkrate (berechnet nach BADA-Datenbank),
  - keine zu spitzen Winkel zwischen den Linienstücken, um Abweichungen von der tatsächlichen Flugbahn klein zu halten.
- Diese Eigenschaften gehen mit Gewichtungsfaktoren versehen in die Fitnessfunktion ein. Die Fitnessfunktion ist zu minimieren.
- Ein Benutzer kann die Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Eigenschaften über Schieberegler beeinflussen.

# ROGENA (4)

## Ablauf des genetischen Algorithmus

**Ziel:** Erzeugen einer sicheren und effizienten Flugroute für ein neu in den kontrollierten Luftraum eintretendes Flugzeug.

**Basis:** modifizierte Form eines genetischen Algorithmus (ein Chromosom wird entweder Crossover oder Mutation unterworfen)

**Populationsgröße:** 60 Individuen/Chromosomen

**Initialisierung der Anfangspopulation:** Durch wiederholte zufällige Veränderung der Standardflugroute.

**Selektionsverfahren:** Im wesentlichen Glücksradauswahl, wobei allerdings Chromosomen, deren Fitneß über einem Schwellenwert liegt, nicht in die Berechnung der Selektionswahrscheinlichkeit eingehen (entspricht der Forderung einer Mindestgüte). Der Schwellenwert wird im Laufe der Generationen gesenkt, und zwar in Abhängigkeit vom Fitnessdurchschnitt der Population. (Kombination aus Glücksradauswahl und Sintflutalgorithmus)

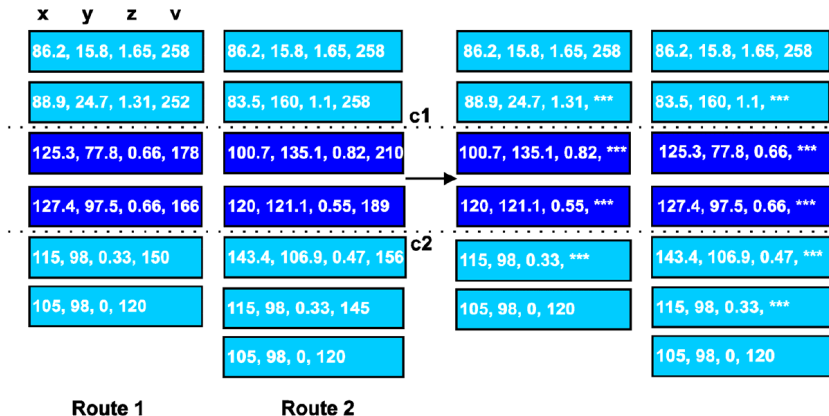
# ROGENA (5)

## Anwendung genetischer Operatoren

- 20 Chromosomen werden unverändert übernommen, darunter die 5 besten Chromosomen (Elitismus).
- 20 Chromosomen werden einem 2-Punkt-Crossover unterworfen.
- 20 Chromosomen werden einem speziellen Mutationsoperator unterworfen:
  - entweder völlig zufällige Koordinatenänderung (globale Suche)
  - oder mittlere Veränderung in einen Punkt *in der Nähe*
  - oder kleine Veränderung in einen Punkt *in der Nähe* (Zufallsaufstieg).
  - Zusätzlich Veränderung der Genanzahl (mit geringer Wahrscheinlichkeit).
- Der Lösch- oder Einfügeort im Chromosom wird zufällig bestimmt, der neue Punkt zufällig in der Nähe seiner Nachbarn initialisiert.
- Reparaturmechanismen: Eine Abfolge von Sink- und Steigvorgängen ist unökonomisch, ebenso eine Abfolge von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen.

# ROGENA (6)

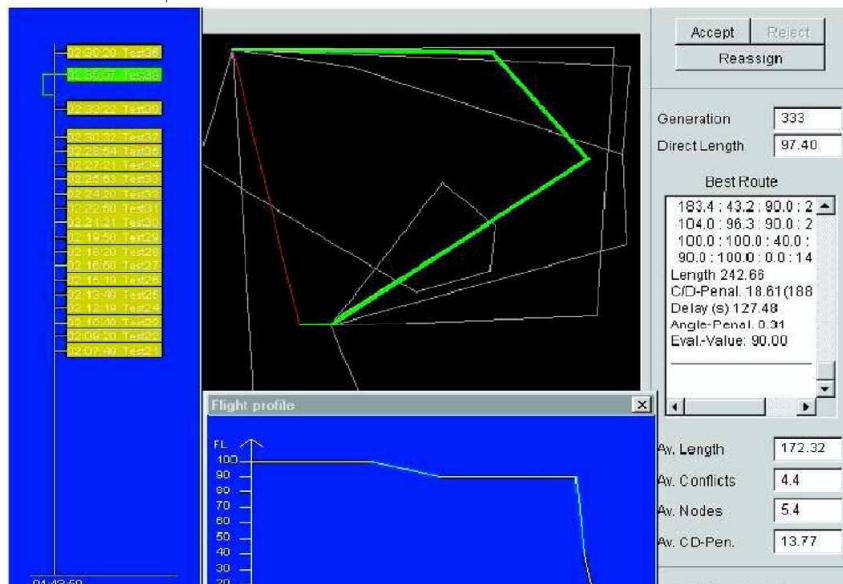
## 2-Punkt-Crossover



Diese Form des Crossover wurde gewählt, um Teilstücke von Routen auszutauschen und auf diese Weise nützliche Teile verschiedener Routen zu kombinieren.

# ROGENA (7)

## Benutzeroberfläche



- Benutzeroberfläche:
  - Originalroute in rot (direkte Verbindung von Eintrittsort und Zielpunkt)
  - beste aktuelle Route in grün
  - alternative Routen in grau
  - Höhendiagramm der Route in getrenntem Fenster
  - Links: Zeitleiter mit Landezeiten aller Flugzeuge
- Es wurden mehrere Simulationsläufe mit realen Daten durchgeführt (beschreiben Eintrittsort/-zeitpunkt und tatsächliche Flugbahn).
- Die von ROGENA erzeugten Flugrouten sind deutlich kürzer als die tatsächlichen, ohne daß dadurch Konflikte mit anderen Flugzeugen erzeugt wurden.
- Wirkungsvolle Unterstützung eines Fluglotsen bei der Koordinierung, die Verkürzung der Routen ermöglicht einen höheren Flugzeugdurchsatz.