



Adaptive Systeme

Vorlesung im Wintersemester 2019/20

Die Vorlesung entstand gemeinsam mit meinem Kollegen
Prof. Dr. André Neubauer, der 2013 viel zu früh verstarb.

Prof. Dr. rer. nat. Nikolaus Wulff





Überblick

- Einleitung
- Adaptive Filter
- Künstliche neuronale Netze
- Adaptive Vektorquantisierung
- Evolutionäre Algorithmen

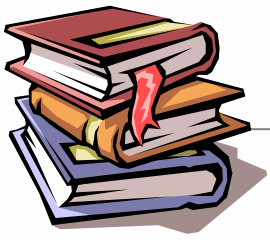
- Einleitung
 - Beispiele adaptiver Systeme
 - Allgemeiner Adaptionsprozess
 - Optimierung und Nullstellensuche
- Adaptive Filter
 - Anwendungen adaptiver Filter in der Signalverarbeitung
 - Systemidentifikation
 - Störunterdrückung
 - Inverse Modellierung
 - Prädiktion
 - Optimalfilter, Normalengleichung
 - LMS-, RLS-Algorithmus

- Künstliche neuronale Netze
 - Modelle künstlicher neuronaler Netze
 - Lernregeln
 - Perzeptron und Backpropagation-Lernalgorithmus
 - Kohonens selbstorganisierende Merkmalskarten
 - Anwendungen künstlicher neuronaler Netz
- Adaptive Vektorquantisierung

- Evolutionäre Algorithmen
 - Evolutionsstrategie
 - $(1+1)$ -, $(\mu+1)$ -, $(\mu+\lambda)$ -, (μ,λ) -, $(\mu/\rho,\lambda)$ -Evolutionsstrategien
 - 1/5-Erfolgsregel
 - Genetische Algorithmen
 - Genetische Operatoren
 - Schema-Theorem
 - Evolutionäres Programmieren
 - Genetisches Programmieren
 - Anwendungen evolutionärer Algorithmen

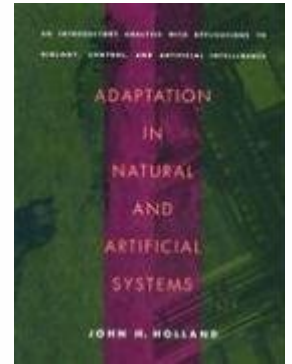
Einleitung

- Adaptive Filter
- Künstliche neuronale Netze
- Adaptive Vektorquantisierung
- Evolutionäre Algorithmen



Literatur

Holland, J.H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems – An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, Cambridge: First MIT Press Edition, 1992



Russel, St., Norvig P.: *Künstliche Intelligenz – Ein moderner Ansatz*, Pearson Studium – IT, 3. Auflage, 2012





Einleitung

Adaptation [lat. *adaptare* – anpassen]

Anpassung von natürlichen und künstlichen Systemen in nur unvollständig bekannten und/oder zeitlich veränderlichen Umgebungen.



Adaptation

„The first technical descriptions and definitions of adaptation come from biology. In that context adaptation designates any process whereby a structure is progressively modified to give better performance in its environment. The structures may range from a protein molecule to a horse’s foot or a human brain or, even, to an interacting group of organisms such as the wildlife of the African veldt. Defined more generally, adaptive processes have a critical role in fields as diverse as psychology („learning“), economics („optimal planning“), control, artificial intelligence, computational mathematics and sampling („statistical inference“). Basically, adaptive processes are optimization processes, ...“

Quelle: Holland, J.H.: Adaptation in Natural and Artificial Systems – An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence, Cambridge: First MIT Press Edition, 1992

Adaptation

„Adaptation is the tendency of a species to change to better take advantage of its environment. Through genetic variation and the natural selection of individuals for environmentally-advantageous phenotypic attributes, a population changes slowly over time in such a way that its survival as a species is more assured. Adaptation tends to occur as an ecosystem changes. ...

The source of phenotypic adaptation is genetic modification, which can result from the new pronunciation of a previously-latent trait; a physical mutation leading to a new and more advantageous trait; lateral gene transfer, etc.

Regardless of the form of the adaptation, hundreds or thousands of small changes over time (microevolution) leads to the separation of different populations into different species. ... “

Quelle: ISCID Encyclopedia of Science and Philosophy

Adaptive Systeme

„An adaptive system is a physical system that is capable of self-adapting in response to changing environments. Adaptive systems should be contrasted with static systems. A static system will not have any self-repair abilities and will typically remain in a single non-adaptive state until its termination. Static systems are not equipped for self-modification and are only able to function within a small range of environmental change. Static systems are unable to adjust to novel environmental scenarios. An adaptive system, on the other hand, will be equipped to self-modify into different system-states in order to navigate, function and succeed within different environments. Adaptive systems are designed to engage and respond to their environments. ...“

Quelle: ISCID Encyclopedia of Science and Philosophy



Einleitung

Fundamentale Fragen

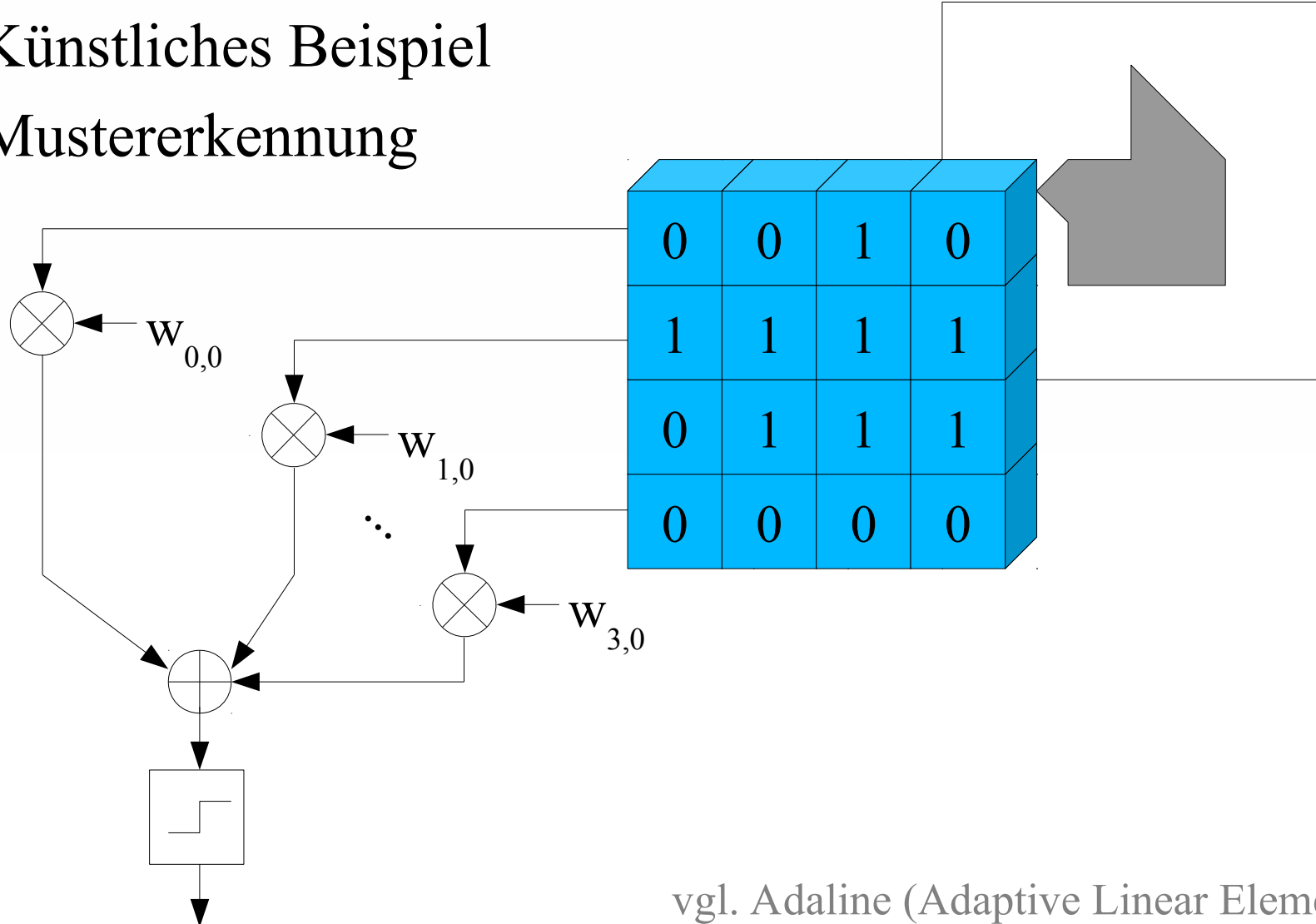
- An welche Eigenschaften der Umgebung passt sich ein Organismus / System / Organisation ... an?
- Wie reagiert die Umgebung auf den sich anpassenden Organismus / System / Organisation ...?
- Welche Strukturen passen sich an?
- Wie passen sich die Strukturen an?
- Wie werden Strukturen bewertet?
- Wie werden unterschiedliche adaptive Prozesse verglichen?

Strukturen, Operatoren und Gütekriterien

Gebiet	Strukturen	Operatoren	Gütekriterien
Genetik	Chromosomen	Mutation, Rekombination, ...	Fitness
Marktwirtschaft	Firmen	Herstellungs- prozesse, Produkte, ...	Umsatz, Gewinn, Shareholder Value
Spieltheorie	Strategien	Strategieregeln	Gewinn
Künstliche Intelligenz	Programme	Lernstrategien	Effizienz, Nutzen
Psychologie, Neurologie	Gehirn	Synapsen- Modifikationen	Leistungs- fähigkeit
Steuerungs- und Regelungstechnik	Regelungs- systeme	Zustands- beobachter, ...	Regel- abweichung
Kommunikations- technik	Filter	LMS, RLS, ...	Fehlerenergie

Einleitung

Künstliches Beispiel Mustererkennung



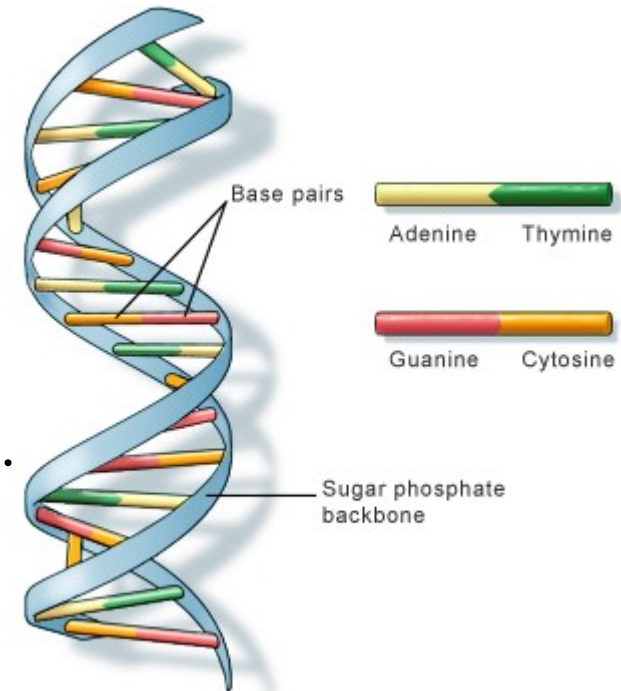
vgl. Adaline (Adaptive Linear Element)



Einleitung

Natürliches Beispiel

- Biologische Evolution
 - Chromosomen enthalten Gene, welche in verschiedenen Formen (Allelen) auftreten.
 - Der Phänotyp eines Organismus ist durch seinen Genotyp bestimmt.
 - Erzeugung neuer Varianten durch Mutation und Rekombination.
 - Selektion geschieht in Abhängigkeit der individuellen Fitness.



U.S. National Library of Medicine

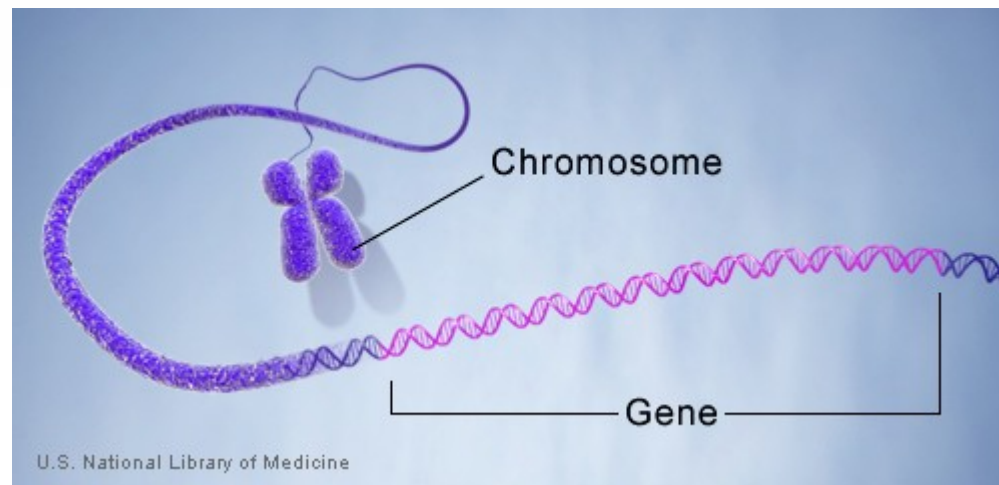
Quelle: National Library of Medicine

Einleitung

Natürliches Beispiel

Biologische Evolution

Chromosomen enthalten Gene, welche in verschiedenen Formen (Allelen) auftreten.



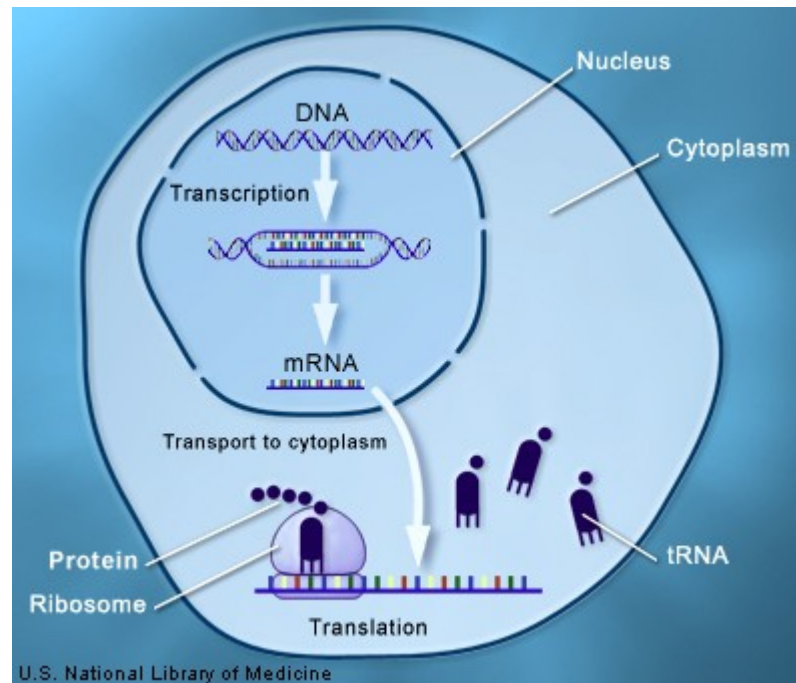
Quelle: National Library of Medicine

Einleitung

Natürliches Beispiel

Biologische Evolution

Der Phänotyp eines Organismus ist durch seinen Genotyp bestimmt.



Quelle: National Library of Medicine



Einleitung

Problemstellungen

- Die anzupassenden Strukturen sind komplex und bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten.
- Die Menge der möglichen Strukturen ist sehr groß.
- Aufgrund der Komplexität der Strukturen ist es schwierig, Komponenten zu finden, die für eine hohe Güte verantwortlich sind.
- Die Güte einer Struktur hängt gemäß einer komplizierten Beziehung nichtlinear von den Komponenten der Struktur ab (*Epistasis*).
- Die Güte einer Struktur ist zeitlich veränderlich.



Einleitung

Problemstellungen

Exploration vs. Exploitation:

Suche nach besseren neuen Strukturen (*Exploration*) bei gleichzeitiger Ausnutzung guter bekannter Strukturen (*Exploitation*).



Einleitung

Theorie adaptiver Systeme

- Struktur $a(t) \in A$ zum Zeitpunkt $t \in \mathbb{N}$ aus der Menge der Strukturen A
 - Kardinalität $|A|$ sehr groß
- Umgebung $e \in E$
 - Umgebung e a priori unbekannt
- Information $i_e(t) \in I$ zum Zeitpunkt $t \in \mathbb{N}$ in der Umgebung $e \in E$
- Gütefunktion $\mu_e: A \rightarrow \mathbb{R}$ bzw. $\mu_e: A \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$
 - Güte $\mu_e(a(t))$ bzw. $\mu_e(a(t), t)$ von Umgebung e abhängig



Einleitung

Theorie adaptiver Systeme

Adaptive Strukturen $a(t) \in A$

Beispiel:

l -Tupel $a(t) = (a_0, a_1, \dots, a_{l-1})$ mit $a_i \in A_i$ und
 $A = A_0 \times A_1 \times \dots \times A_{l-1}$

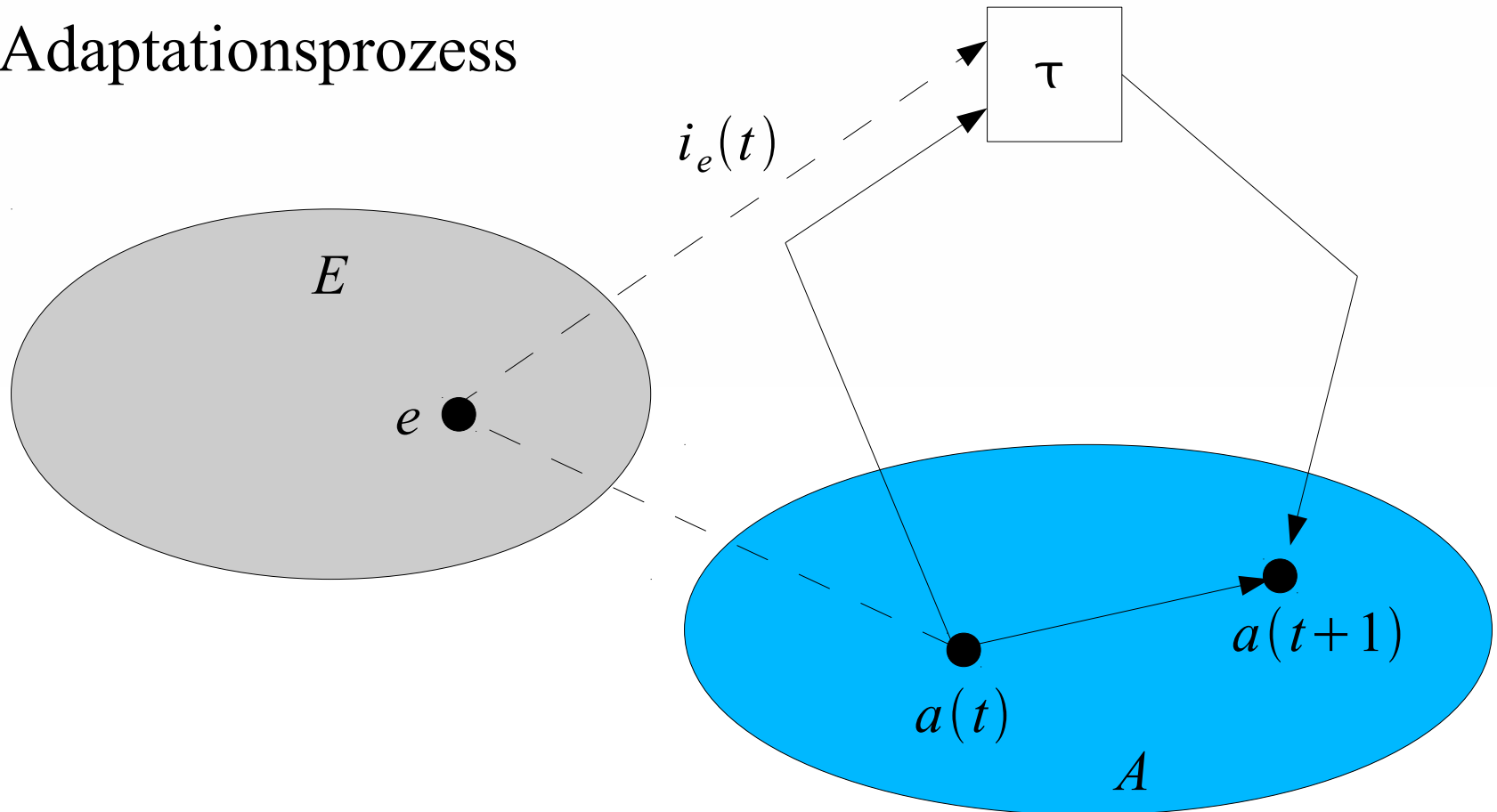
Für binäre l -Tupel gilt z.B. $a(t) = (a_0, a_1, \dots, a_{l-1})$ mit
 $a_i \in \{0, 1\}$ und $A = \{0, 1\}^l$

Für reelle l -Tupel gilt z.B. $a(t) = (a_0, a_1, \dots, a_{l-1})$ mit
 $a_i \in \mathbb{R}$ und $A = \mathbb{R}^l$

Einleitung

Theorie adaptiver Systeme

Adaptationsprozess





Einleitung

Theorie adaptiver Systeme

Deterministischer Algorithmus

$$a(t+1) = \tau(i_e(t), a(t))$$

mit

$$\tau : I \times A \rightarrow A$$

Stochastischer Algorithmus

$$\pi(t+1) = \tau(i_e(t), a(t))$$

mit

$$\tau : I \times A \rightarrow P$$

und der Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$\pi(t) \in P$$



Einleitung

Fundamentale Fragen

- Wie lautet die Menge E der möglichen Umgebungen?
- Wie lautet die Menge I der Informationen?
- Wie lautet die Menge A der möglichen Strukturen?
- Wie lautet die Menge Ω der möglichen Strukturen?
- Wie lautet die Gütefunktion μ_e ?
- Wie lautet das Kriterium χ ?



Einleitung

Theorie adaptiver Systeme

- Schema

$$\xi = (\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{l-1})$$

- Ein l -Tupel $a(t) = (a_0, a_1, \dots, a_{l-1})$ repräsentiert ein Schema $\xi = (\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{l-1})$, d.h.

$$a(t) = (a_0(t), a_1(t), \dots, a_{l-1}(t)) \in \xi = (\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{l-1})$$

falls

$$a_i(t) = \xi_i \quad \text{für } \xi_i \neq ' \times '$$

(' \times ' bedeutet ein *Don't Care*)

- Ein Schema entspricht einer Hyperebene in A .



Einleitung

Theorie adaptiver Systeme

- Die mittlere Gütefunktion einer Menge von M Strukturen $a_h(t) = (a_{h,0}(t), a_{h,1}(t), \dots, a_{h,l-1}(t))$ lautet

$$\bar{\mu}_e(t) = M^{-1} \sum_{h=1}^M \mu_e(a_h(t), t)$$

- Die mittlere Gütefunktion der $M_\xi(t)$ Strukturen, die das Schema $\xi = (\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{l-1})$ repräsentieren, lautet

$$\bar{\mu}_{e,\xi}(t) = M_\xi^{-1}(t) \sum_{a_h(t) \in \xi} \mu_e(a_h(t), t)$$

- Ziel: Finde Kombinationen von Komponenten bzw. Schemata mit $\bar{\mu}_{e,\xi}(t) > \bar{\mu}_e(t)$, die zu Strukturen hoher Güte führen.