



**Prof. Dr. Winfried Kurth**

**Lehrstuhl für Praktische Informatik / Grafische Systeme**

**Brandenburgische Technische Universität Cottbus**

**Ewald-Haase-Str. 12/13, Raum 116**

Postanschrift: Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus

Tel. +49-355-69-3816

Sprechstunde: dienstags, 10:00-12:00, und nach Vereinbarung

E-mail [wk@informatik.tu-cottbus.de](mailto:wk@informatik.tu-cottbus.de), [wkurth@gwdg.de](mailto:wkurth@gwdg.de)

<http://www-gs.informatik.tu-cottbus.de/~wwwgs/>

## **Artificial Life**

Vorlesung

Wintersemester 2002/03 (2 SWS)

*Termin:*

Montags, 09:15-10:45, EH/214

*Leistungsnachweise:*

keine im direkten Anschluss an die Vorlesung.

Das Thema kann – nach Absprache – in Diplomprüfungen des Diplomstudiengangs Informatik eingebracht werden.

Es können Softwarepraktika, Studien- und Diplomarbeiten aufbauend auf den Vorlesungsstoff vergeben werden.

# 1. Einleitung

Gegenstand der Vorlesung:

*Artificial Life* (ALife, AL) = Künstliches Leben (KL)

der Versuch, lebende Systeme künstlich zu erschaffen –  
oder zumindest Systeme, die wichtige Eigenschaften mit  
lebenden Systemen gemeinsam haben

3 Haupt-Varianten von Artificial Life:

- künstliches Leben auf derselben stofflichen Basis wie natürlich vorkommendes Leben, d.h. basierend auf Kohlenstoff und Wasser ("Wetware")
- künstliches Leben auf stofflicher Basis, aber auf anderer stofflicher Basis als das natürliche Leben (→ Roboter)
- künstliches Leben als System im Computer ablaufender Prozesse (nichtstoffliches künstliches Leben)

Alle 3 Varianten sind aktuelle, interdisziplinäre Forschungsgebiete.

Beteiligte Gebiete: Biologie, Chemie, Physik, Informatik, Mathematik, Technik, Soziologie...

Die Vorlesung befasst sich hauptsächlich mit der 3. Variante.

Kurz zu den beiden anderen Varianten:

# Molekulare und Zellulare Ebene: Wetware und Artificial Chemistry

Auf der Suche nach dem selbst-reproduzierenden Molekül, bzw. Programm - Konstruktion von künstlichem Leben

- „Wetware“:  
Konstruktion von Kohlenstoff-basiertem Leben:  
Fortschritt in der Mikrobiologie → Im Labor werden RNA-Stränge als mutmaßliche Vorgänger zellulären Lebens behandelt. Information wird genetisch gespeichert.
- „Artificial Chemistry“:  
Verstehen von komplexen chemischen Vorgängen durch Konstruktion von Regeln, mit denen katalysierte Reaktionen beschrieben werden.  
Grundlage für „Bitstring-Reaktoren“
- Evolution mit offenem Ende von selbst-reproduzierenden Einheiten in streng kontrollierter Umgebung als Alternative zur Wetware.

also schon hier Wechselwirkung zwischen stofflichen und nichtstofflichen ALife-Ansätzen.

Wetware-ALife-Forschung:

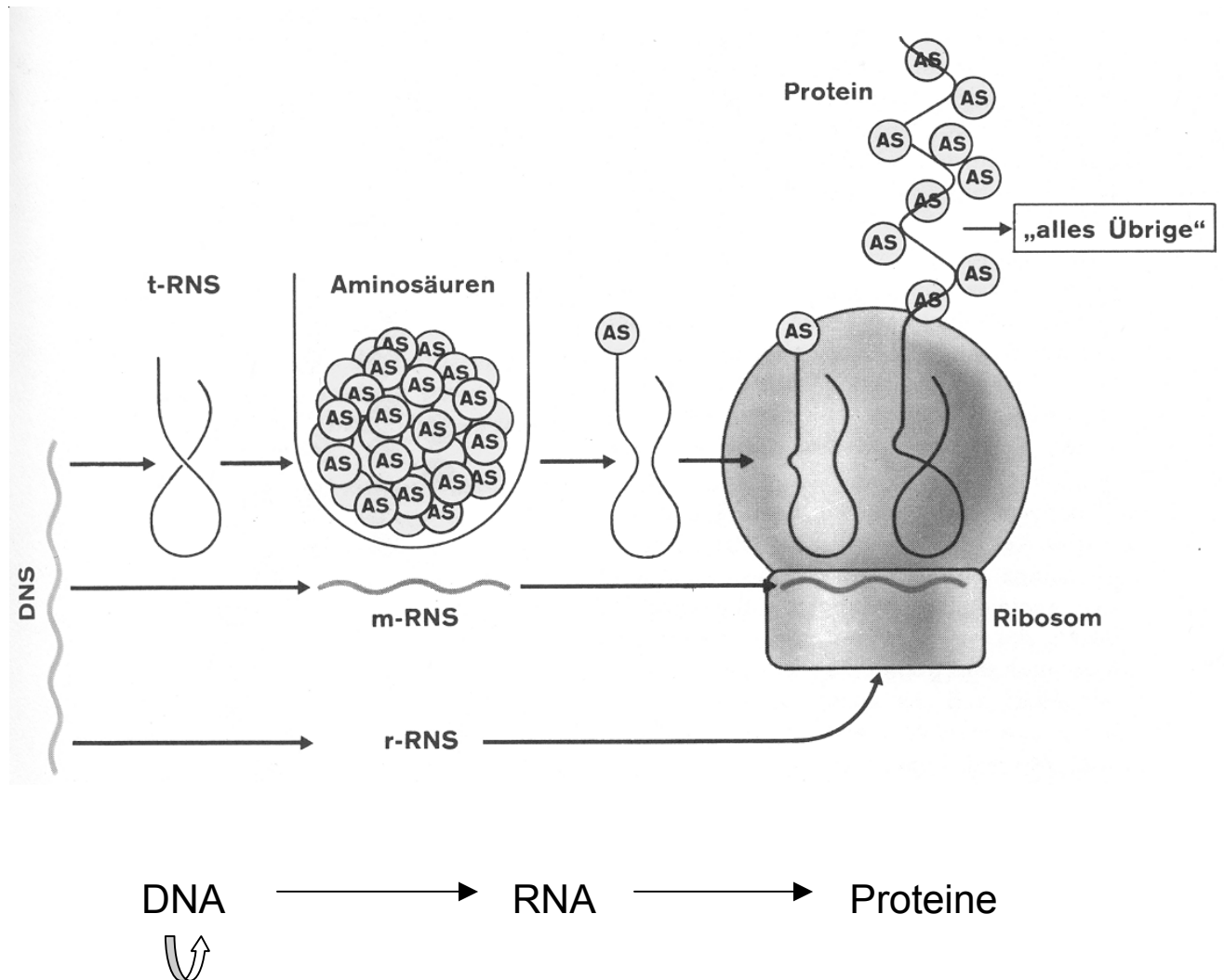
z.B. im Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen (Arbeitsgruppe Manfred Eigen)

komplexe Makromoleküle, die für natürliches Leben von zentraler Funktion sind: *DNA*, *RNA*, *Proteine* (Eiweiße).

Rollen dieser 3 Molekülsorten:

- DNA: speichert Information über die Generationen hinweg (Replikation der DNA-Doppelhelix); stückweise Translation in einzelne RNA-Moleküle (messenger-RNA)

- RNA: Mittlerrolle bei Informationsübermittlung von DNA an Protein-Synthese (Transskription), auch Substrat der Proteinfabriken (Ribosomen) in der Zelle



- Proteine:
  - katalysieren chemische Reaktionen
  - steuern dadurch den Stoffwechsel
  - Funktionsstoffe (z.B. Hämoglobin für Sauerstofftransport)
  - bauen Konzentrationsgradienten auf, die die Morphogenese steuern
  - können die Genexpression (Ablesen durch RNA, Proteinsynthese) ein- und ausschalten (*Transkriptionsfaktoren*)

das Wechselspiel dieser 3 Molekülsorten ist zu komplex, als dass spontane Entstehung am Anfang des Lebens auf der Erde denkbar wäre

kann vielleicht eine der Molekülsorten allein schon die Funktionen von allen dreien erfüllen?

Kandidat: RNA

(RNA-Viren: enthalten nur RNA, keine DNA; RNA kann katalytische Funktionen wie bestimmte Proteine ausüben...)

→ deshalb konzentriert sich "Wetware-ALife" stark auf Experimente mit RNA.

2. ALife-Variante:

# Autonome, adaptive Roboter

- Ghengis  
R. Brooks' Laufender 6-Fuß-Roboter (12 Motoren)  
Jeder Motor durch Modul aus Subsumptionsarchitektur gesteuert  
→ „Emergent functionality“
- „Cricket Robot“
  - Weibliche Grille bewegt sich auf das Zirpen einer männlichen Grille zu, Lied mit spezies-abhängigen Tonabstand und Frequenz  
→ Kontrollarchitektur für Phonotaxis
  - Emulation des Grillen-Gehörapparats auf Kephera-Roboter
  - Zwei (vier) Ohren, jeweils auf einer Seite, verbunden mit Tunnel, Verzögerung (genau halbe Wellenlänge) sorgt dafür, daß Signal auf abgewandten Seite ausgelöscht, auf selben Seite verstärkt wird.
  - Neuronen als „leaky integrators“

## Literatur:

R. Brooks (1990): Elephants Don't Play Chess. In: P. Maes (ed) Designing Autonomous Agents, Theory and Practice from Biology to Engineering and Back, MIT-Press, pp.3-15

H.H.Lund, B. Webb & J. Hallam (1998) Physical and Temporal Scaling Considerations in a Robot Model of Cricket Calling Song Performance. In: C. Adami, R. Belew, H. Kitano & C. Taylor (eds.) Artificial Life VI, pp. 63-71

Forschung an autonomen Robotern wird auch in Cottbus (am Lehrstuhl für Softwaresystemtechnologie) betrieben.

dritte Variante von ALife:  
Leben als Prozess im Rechner nachbauen  
- geht das überhaupt??

## *Was ist Leben?*

es gibt keine allgemein anerkannte Definition.

“What is it to be ‘really alive’? I’m certainly not going to be able to answer this question here, but I can suggest one thing that’s *not*: It’s not a matter of satisfying a definition, at least not at this time, for such a definition would have to be preceded by a true theory of life, which we do not yet have.”  
(Harnad, 1995, p. 293)

Merkmale lebender Systeme:

- ein lebender Organismus existiert in Raum und Zeit
- er wächst oder dehnt sich aus
- er hat einen Stoffwechsel (ist fähig, chemische Energie aus aufgenommener Materie in andere Energieformen zu verwandeln)
- er wird aktiv in seiner Umgebung, insbesondere ist er reaktionsfähig auf Reize aus der Umgebung
- er speichert Informationen über sich selbst
- er reproduziert sich in seinem eigenen oder einem verbundenen Organismus
- er bleibt bei Veränderung der Umgebungsbedingungen (in gewissen Grenzen) stabil (Homöostase, Regenerationsfähigkeit), insbes.: er zeigt die Fähigkeit und den Drang zur Selbsterhaltung
- lebende Systeme halten ihre Entropie signifikant niedriger als die maximal mögliche Entropie, und dies auf Zeitskalen, die die natürliche Abbaurate des informationstragenden Substrats um Größenordnungen übersteigen

- lebende Systeme können sich hierarchisch organisieren (Zelle, Organismus, soziale Gruppe, Ökosystem)
- lebende Systeme bestehen aus voneinander abhängigen Teilen
- Leben entwickelt sich
- *stärker*: lebende Systeme evolvieren durch Darwinsche Evolution

(nach Farmer, Balin und Adami)

"Artificial Life" als Versuch, künstlich Systeme zu generieren, die einige dieser Eigenschaften haben.

Gliederung der Vorlesung in der Reihenfolge dieser Eigenschaften:

- 1. Einleitung**
- 2. Morphogenese**
- 3. Metabolismus**
- 4. Aktivität von Organismen in ihrer Umgebung**
- 5. Selbstreplikation**
- 6. Evolution, Teil I**
- 7. Niedrighaltung der Entropie**
- 8. Evolution, Teil II**
- 9. Netzwerke, Kooperation und verteilte Intelligenz**
- 10. Metadiskussion: Risiken und Nebenwirkungen von ALife**



## *Geschichte der Vorstellungen von künstlichem Leben*

"*Golem*":

hebräisch für "substanzlos", "noch nicht entwickelt", "unfertig"

Sage im mittelalterlichen Europa (in mehreren Versionen), bekannteste aus d. 16. Jh.:

Rabbi Löw aus Prag soll eine Lehmfigur zu Leben erweckt haben, indem er ihr den Namen Gottes auf die Stirn schrieb (Anlehnung an biblische Schöpfungsgeschichte)

- Golem als Bedrohung
- in Zeiten der Judenverfolgung wurde der Golem zum Beschützer

*Homunculus*:

lat. für "Menschlein"

*Homunculus: An exceedingly minute body that according to medical scientists of the 16th and 17th centuries, was contained in a sex cell and whose preformed structure formed the basis for the human body.*

Stedman's Medical Dictionary

In der Vorstellung der Alchemisten des Mittelalters soll es möglich gewesen sein, einen Homunculus zu erschaffen, indem man Sperma in einem Behälter 40 Tage unter Pferdemit aufbewahrt und dann 40 Wochen mit menschlichem Blut ernährt (Paracelsus).

Literarische Bearbeitung des Themas in Goethe's "Faust".

In der Aufklärungszeit Loslösung von biblischen und alchemistischen Vorstellungen.

Descartes: Trennung von körperlicher und geistiger Welt (Dualismus)

Einen Schritt weiter ging Julian Offray de la Mettrie:  
Der Mensch – eine Maschine (1748).

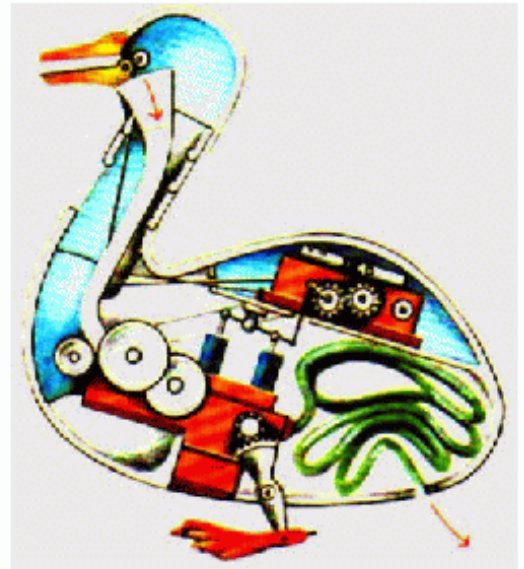
Im Zuge der Entwicklung von Naturwissenschaften und Technik begann man, *Automaten* zu konstruieren, die Eigenschaften von Lebewesen aufweisen sollten.

### ◆ Vaucansons Ente

Vaucanson\* war von der Idee gepackt, einen künstlichen Menschen zu schaffen. Aber sein Ziel schien zu weit gesteckt. Schließlich reduzierte er seinen Traum:

Er baute einen Enterich. Sein Automatenherpel schlug mit den Flügeln, schnatterte, trank Wasser und pickte Körner. Diese wurden mit chemischen Stoffen "verdaut" und als entengemäßes Abfallprodukt wieder hergegeben.

\* Jacques de Vaucanson  
(1709 - 1782)



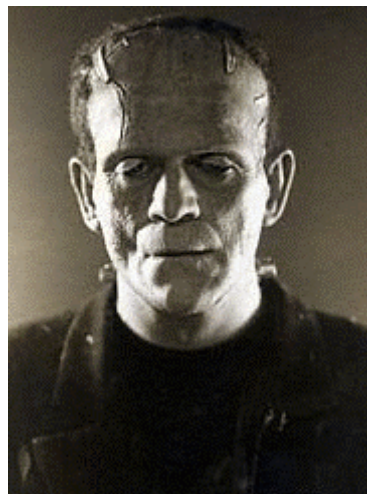
in der Romantik (Anfang 19. Jh.):  
Faszination durch Automaten, Statuen, künstliche Menschen  
– jedoch eher als Metapher für Extremzustände *des Menschen*.

E.T.A. Hoffmann: Der Sandmann (1816)

Mary W. Shelley: Frankenstein oder Der moderne Prometheus (1818)



Mary W. Shelley



das Monster

Frankenstein schuf einen künstlichen Menschen aus Leichenteilen, den er mit Hilfe der Elektrizität zum Leben erweckte – dieser künstliche Mensch wurde von der Gesellschaft nicht akzeptiert und wandte sich daraufhin gegen seinen Schöpfer.

## Roboter

Der Begriff 'Roboter' wurde im Jahre 1920 von dem tschechischen Schriftsteller K. Capek in seinem Schauspiel "RUR" geprägt. Er bezeichnete hiermit Maschinenmenschen, die anstelle des Menschen an den Werkbänken stehen. Abgeleitet hat er den Begriff vom slawischen Wort 'rabota' = Arbeit.

Die Science-Fiction-Literatur griff das Thema auf:

Einer der bekanntesten Autoren ist Isaac Asimov (1920-1992).  
"Ich, der Robot" (1950)

Asimov's "Drei Grundgesetze für Roboter":

1. Ein Roboter darf keinem Menschen Schaden zufügen oder durch Untätigkeit zulassen, daß einem Menschen Schaden zugefügt wird.
2. Ein Roboter muß jedem Befehl eines Menschen gehorchen, sofern dies nicht im Widerspruch zum ersten Gesetz steht.
3. Ein Roboter muß seine Existenz erhalten, sofern dies nicht im Widerspruch zum ersten oder zweiten Gesetz steht.

Stanislav Lem (1921-) schrieb eine Reihe von Aufsätzen (ernsthafte und ironische) über Roboter. Er kritisierte die Asimov'schen Gesetze: Echt autonome Roboter würden diese sowieso übertreten können.

Weitere Begriffe aus dem Umfeld:

"Androiden": künstliche Menschen auf eher biologischer Basis

"Cyborgs": cybernetic organisms, Mischwesen Mensch-Maschine

Daniel F. Galouye: Welt am Draht (Simulacron-3)

Die ganze Welt könnte eine Simulation in einem Computer sein

der Film "Tron" (1982):  
Wesen existieren in einem Computer, als Programme



Die seriöse Beschäftigung mit künstlichem Leben und künstlicher Intelligenz:

Die "Gründerväter" der "Künstlichen Intelligenz" (Alan Turing, John von Neumann) verfolgten im wesentlichen einen "top-down-Ansatz" (mit dem Gesamtproblem beginnen, es in seine Bestandteile zerlegen, es Stück für Stück untersuchen, ein Modell bilden)

– erfolgreich nur auf umgrenzten Spezialgebieten (Expertensysteme, Schachcomputer)

Grey Walter: elektronische Schildkröten (1950)  
basierend auf dem Regelkreis-Prinzip  
Walter behauptete, sie hätten einen "freien Willen"

um 1970 erste Zweifel am top-down-Ansatz der orthodoxen KI-Forschung

## Erste Artificial Life-Tagung: 1987 in Los Alamos (160 TeilnehmerInnen)

organisiert von Christopher Langton (Programmierer und Biologe, dieser arbeitete am multidisziplinären Santa Fe Institute (SFI) zur Erforschung komplexer Systeme.

### Langton über den Workshop:

“The workshop itself grew out of my frustration with the fragmented nature of the literature on biological modeling and simulation. For years I had prowled around libraries, shifted through computer-search results, and haunted bookstores, trying to get an overview of a field, which I sensed, existed but which did not seem to have any coherence or unity. Instead, I literally kept stumbling over interesting work almost by accident, often published in obscure journals if published at all.” (Langton, 1989, p. xv)

### Zentrale Ideen des sich neu entwickelnden Gebietes "ALife":

- synthetischer Ansatz ("understanding by building")
- Computersimulationen und Roboter als Hilfsmittel zum Verstehen
- auf höheren Organisationsebenen können sich neue, "emergente" Eigenschaften einstellen: z.B. Biologie ist mehr als Chemie, Psychologie ist mehr als Biologie
- zentrales Forschungsthema sind Selbstorganisationsprozesse
- Untersuchung der Anwendung *lokaler Regeln* und ihrer Auswirkungen auf *globaler Ebene*

“I think that many of us went away from that tumultuous interchange of ideas with a very similar vision, strongly based on themes such as *bottom-up* rather than *top-down* modeling, *local* rather than *global* control, *simple* rather than *complex* specifications, *emergent* rather than *pre-specified* behavior, *population* rather than *individual* simulation, and so forth.

Perhaps, however, the most fundamental idea to emerge at the workshop was the following: Artificial systems which exhibit lifelike behaviors are worthy of investigation on their own rights, whether or not we think that the processes that they mimic have played a role in the development or mechanics of life as we know it to be. Such systems can help us expand our understanding of life as it *could* be. By allowing us to view the life that has evolved here on Earth in the larger context of *possible* life, we may begin to derive a truly general theoretical biology capable of making universal statements about life wherever it may be found and whatever it may be made of”. (Langton, 1989, p. xvi)

Wie im Falle von "Artificial Intelligence", gibt es auch bei "Artificial Life" *extreme* und *gemäßigte* Vertreter.

- *die extreme Position*: Strukturen innerhalb eines Computers, die den Gesetzmäßigkeiten natürlichen Lebens folgen, *leben wirklich*. Artificial Life ist "echtes Leben". (z.B. Bruce McLennan, Univ. Tennessee).

Mark Bedau (Dartmouth) und Norman Packard (Univ. Illinois) haben einen "Turing-Test" für künstliches Leben vorgeschlagen (ähnlich dem Turing-Test der künstlichen Intelligenz), wobei als Beweis für Leben "Vitalität" gilt. Sie definieren Vitalität als messbar an der Ziel- oder Zweckgerichtetheit, die ein Organismus während seiner Entwicklung zeigt.

John McCaskill (GMD Bonn, früher am MPI in Göttingen) behauptete kürzlich, Artificial Life würde sehr wahrscheinlich innerhalb der nächsten 5 Jahre "eine physische Realität" werden, und fordert eine ethische Diskussion über die resultierenden Probleme. (GMD-Spiegel)

- Die *gemäßigten AL-Anhänger* behaupten *nicht*, dass ihre Schöpfungen im Rechner lebendig sind. Sie sagen, dass die Faktoren des natürlichen Lebens und die in Computerexperimenten resultierenden Verhaltensweisen interessante Studienobjekte sind und zur Unterstützung bei der Beantwortung von Fragen zu natürlichem Leben eingesetzt werden können (und für andere Zwecke, z.B. zur Unterhaltung).

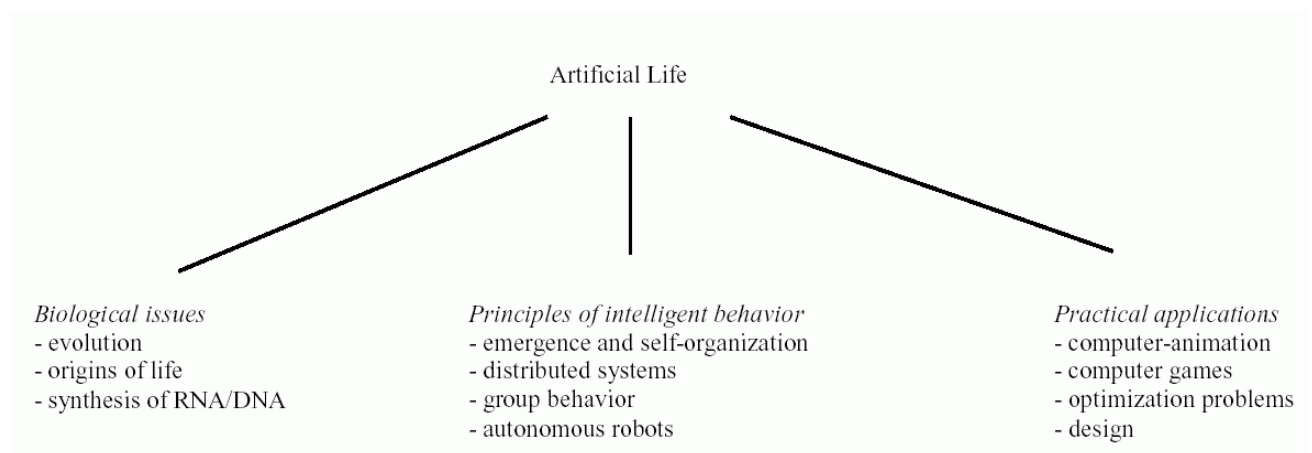


## Definition von "Artificial Life" nach Langton:

"Artificial Life is the study of man-made systems that exhibit behaviors characteristic of natural living systems. It complements the traditional biological sciences concerned with the analysis of living organisms by attempting to *synthesize* life-like behaviors within computers and other artificial media. By extending the empirical foundation upon which biology is based *beyond* the carbon-chain life that has evolved on Earth, Artificial Life can contribute to theoretical biology by locating *life-as-we-know-it* within the larger picture of *life-as-it-could-be*. (Langton, 1989, p. 1)

→ Untersuchung *allgemeiner* Lebens-Prinzipien

Neben diesem Grundlagenforschungs-Ziel werden in der ALife-Forschung auch praktische Ziele verfolgt (rechter Zweig im Diagramm):



# Emergenz als die Grundmotivation

... aus der heutigen Vorlesung

- „Einfache Mikro-Regeln erzeugen komplexes, globales Verhalten“
- „Lebendes System auf einer Ebene ist ein komplexes adaptives System, dessen Verhalten durch die Interaktion von vielen Einheiten der darunterliegenden Ebene entsteht.“
- „emergent functionality“

„Emergenz“

- „Das ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ (Holland, 1997)
- Cariani, 1992:  
Ursprung qualitativ neuer Strukturen und Funktionalitäten, die nicht auf bereits existierende zurückführbar sind
  - Computational emergence
  - Thermodynamic emergence
  - Emergence relative to a model
- Steels 1994/ Wavish 1992  
Konstrukte zum Beschreiben des Mikro-Verhaltens reichen nicht, um Makro-Verhalten zu beschreiben.
- Die Eigenschaft, die ein komplexes adaptives System beschreibt?
- ???

(Klügl 1998)