



# **Evolution und Design**

## **Gedanken zur spontanen Bildung biologischer Strukturen**

Peter Schuster

Institut für Theoretische Chemie, Universität Wien, Österreich  
und

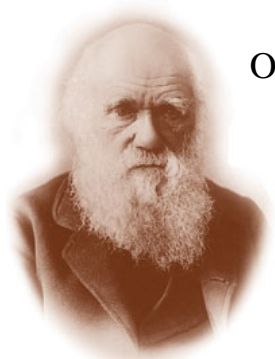
The Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico, USA

Österreichische Akademie der Wissenschaften

Gesamtsitzung, 17.11.2006

1. Geschichte der Evolutionstheorie
2. Wahrscheinlichkeit und Zufall in der Biologie
3. Komplexes Verhalten aus einfachen Regeln
4. Evolutionsexperimente
5. Evolutionäres "Basteln" und Komplexität
6. Schlußbemerkungen

1. **Geschichte der Evolutionstheorie**
2. Wahrscheinlichkeit und Zufall in der Biologie
3. Komplexes Verhalten aus einfachen Regeln
4. Evolutionsexperimente
5. Evolutionäres "Basteln" und Komplexität
6. Schlußbemerkungen

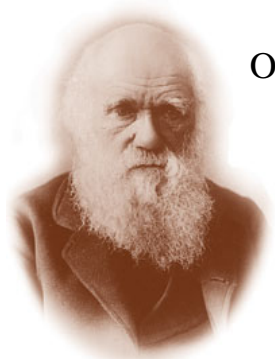


Charles Darwin

Origin of evolutionary biology  
1859



Alfred Russel Wallace



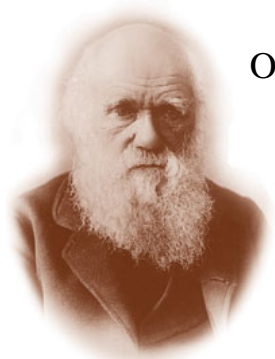
Origin of evolutionary biology  
1859

Charles Darwin

Origin of genetics  
1865



Gregor Mendel



Charles Darwin

Origin of evolutionary biology

1859



Origin of genetics

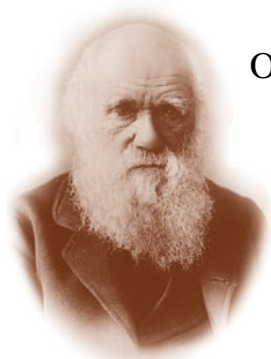
1865



'Rediscovery' 1900



Gregor Mendel



Charles Darwin

Origin of evolutionary biology  
1859

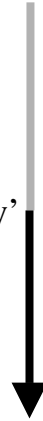


Origin of genetics  
1865



Gregor Mendel

'Rediscovery' 1900



First unification: Population genetics 1930



Ronald Fisher

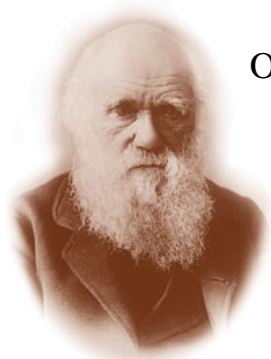


JSB Haldane



Sewall Wright





Charles Darwin

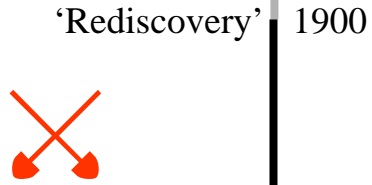
Origin of evolutionary biology  
1859



Origin of genetics  
1865

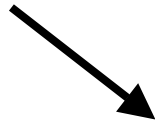


Gregor Mendel

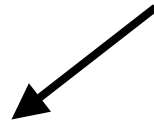


First unification: Population genetics 1930

Ernst Mayr

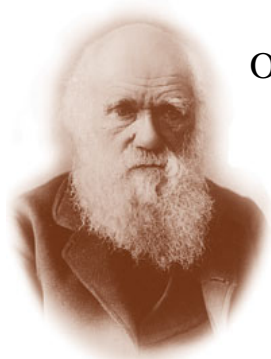


Theodosius  
Dobzhansky



Synthetic theory  
1940 - 1950





Charles Darwin

Origin of evolutionary biology  
1859



Origin of genetics  
1865



'Rediscovery' 1900



Gregor Mendel



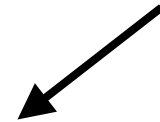
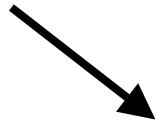
Friedrich Woehler

Origin of  
biochemistry  
1828



First unification: Population genetics 1930

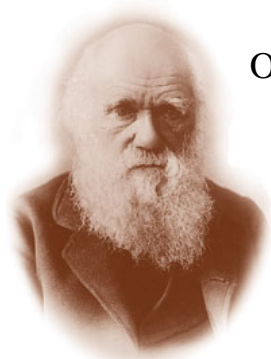
Ernst Mayr



Theodosius  
Dobzhansky

Synthetic theory  
1940 - 1950





Charles Darwin

Origin of evolutionary biology  
1859



Origin of genetics  
1865



'Rediscovery' 1900



First unification: Population genetics 1930



Gregor Mendel

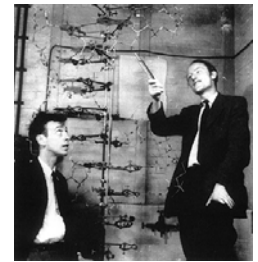


Friedrich Woehler

Origin of  
biochemistry  
1828

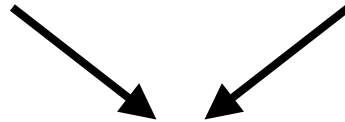


Origin of molecular  
biology 1953



James Watson and  
Francis Crick

Ernst Mayr



Synthetic theory  
1940 - 1950



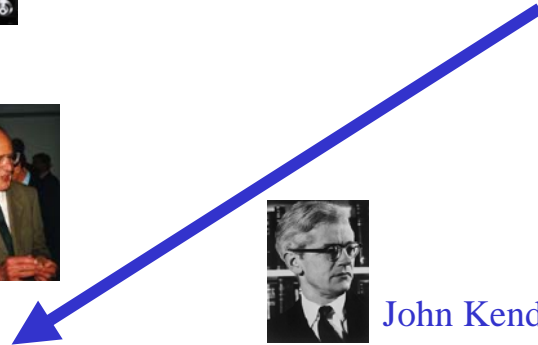
Theodosius  
Dobzhansky



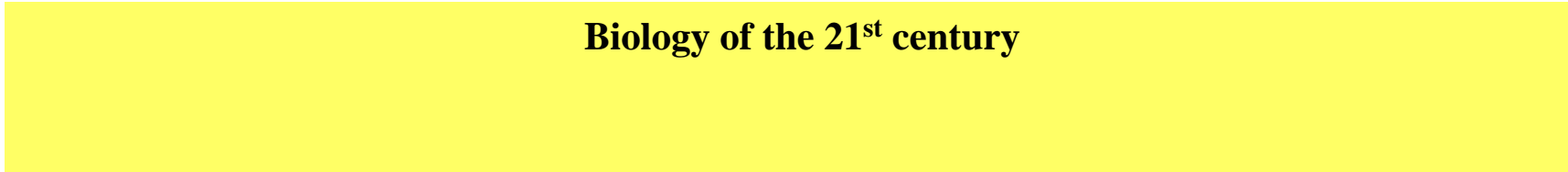
Max Perutz

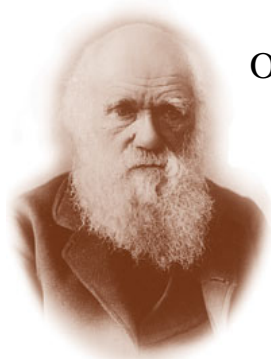


John Kendrew



**Biology of the 21<sup>st</sup> century**





Charles Darwin

Origin of evolutionary biology  
1859

Origin of genetics  
1865



Gregor Mendel



Friedrich Woehler

Origin of  
biochemistry  
1828

'Rediscovery' 1900



First unification: Population genetics 1930

Ernst Mayr



Synthetic theory  
1940 - 1950

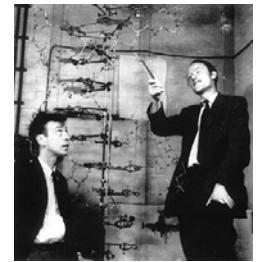


Theodosius  
Dobzhansky

Origin of molecular  
biology 1953



Jacques Monod



James Watson and  
Francis Crick

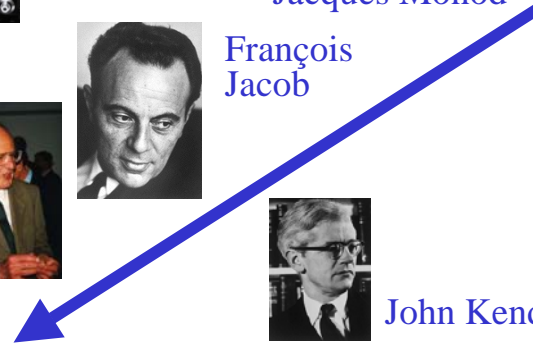
François  
Jacob



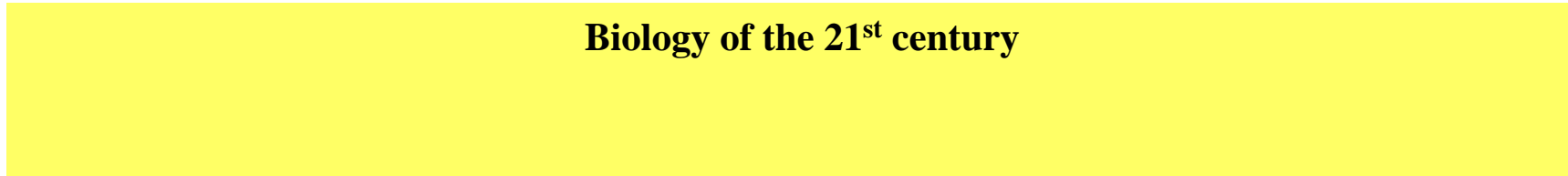
Max Perutz

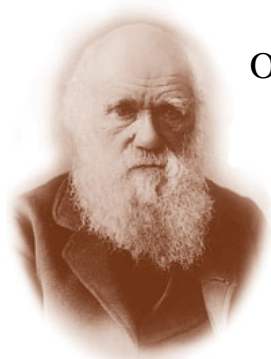


John Kendrew



**Biology of the 21<sup>st</sup> century**





Charles Darwin

Origin of evolutionary biology  
1859

Origin of genetics  
1865



Gregor Mendel



Friedrich Woehler

Origin of  
biochemistry  
1828



'Rediscovery' 1900

First unification: Population genetics 1930

Ernst Mayr



Synthetic theory  
1940 - 1950

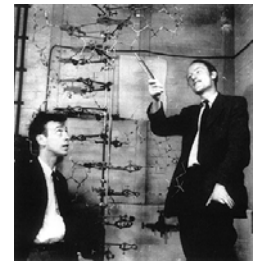


Theodosius  
Dobzhansky

Origin of molecular  
biology 1953



Jacques Monod



James Watson and  
Francis Crick

Max Perutz



François  
Jacob



John Kendrew



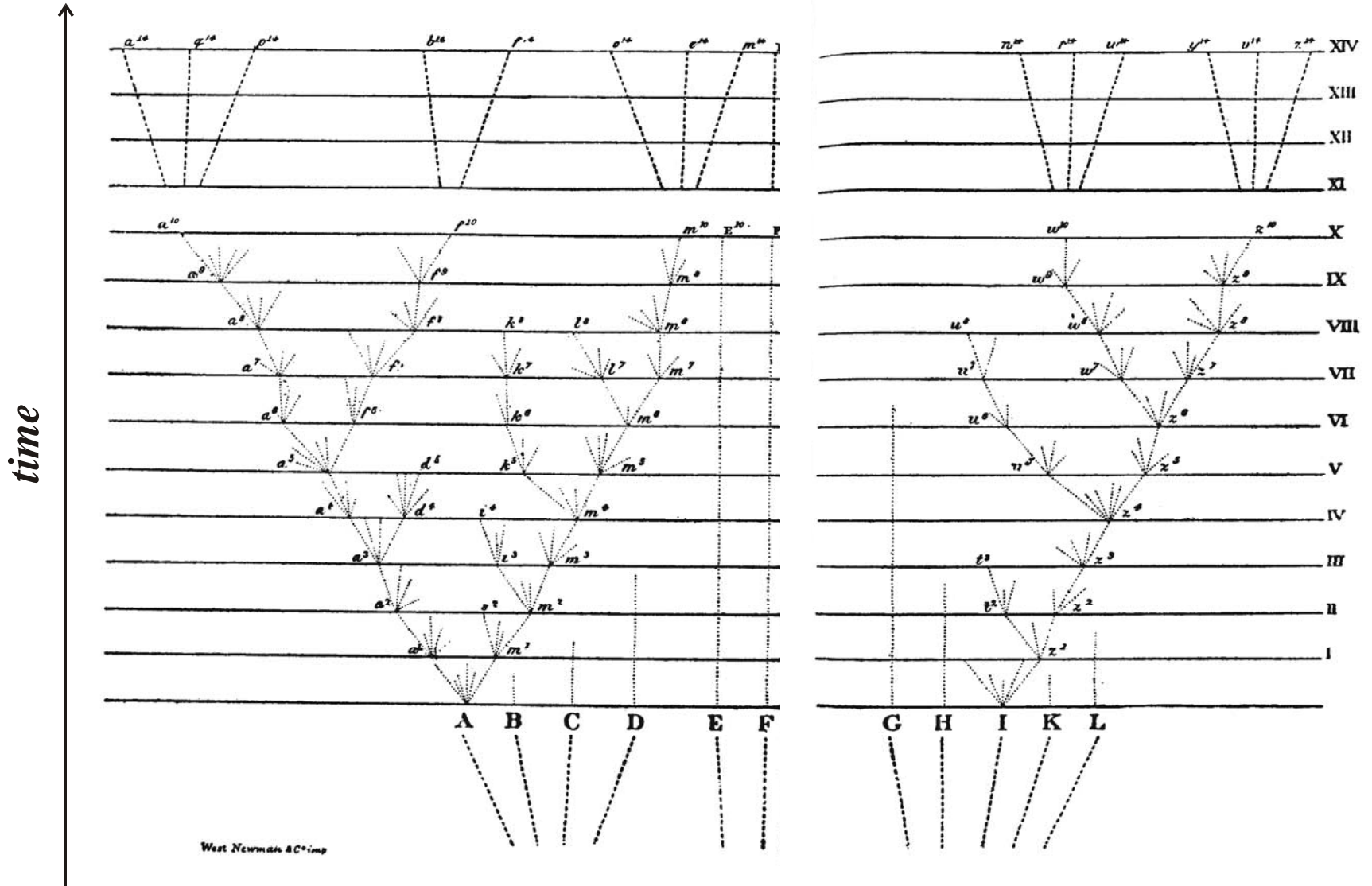
Sydney Brenner



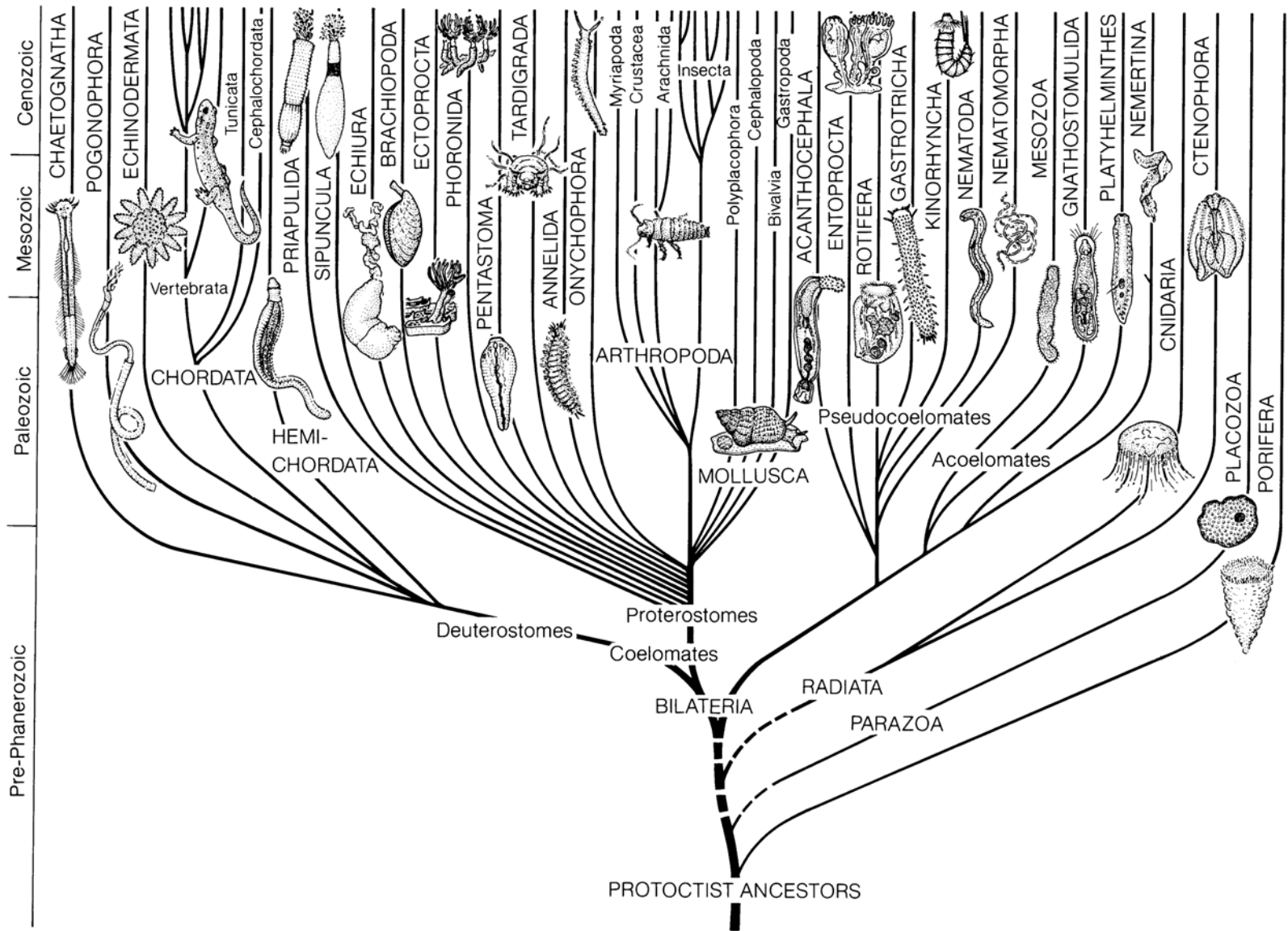
Manfred  
Eigen

## Biology of the 21<sup>st</sup> century

Biomathematics, bioinformatics, ... , biophysics, biochemistry, ... , molecular genetics, ... , systems biology, biomedicine, macroscopic biology, **evolutionary biology**, sociobiology, anthropology, ...



Charles Darwin, *The Origin of Species*, 6th edition.  
 Everyman's Library, Vol.811, Dent London, pp.121-122.



Modern phylogenetic tree: Lynn Margulis, Karlene V. Schwartz. *Five Kingdoms. An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth.* W.H. Freeman, San Francisco, 1982.



A ≡ Adenine

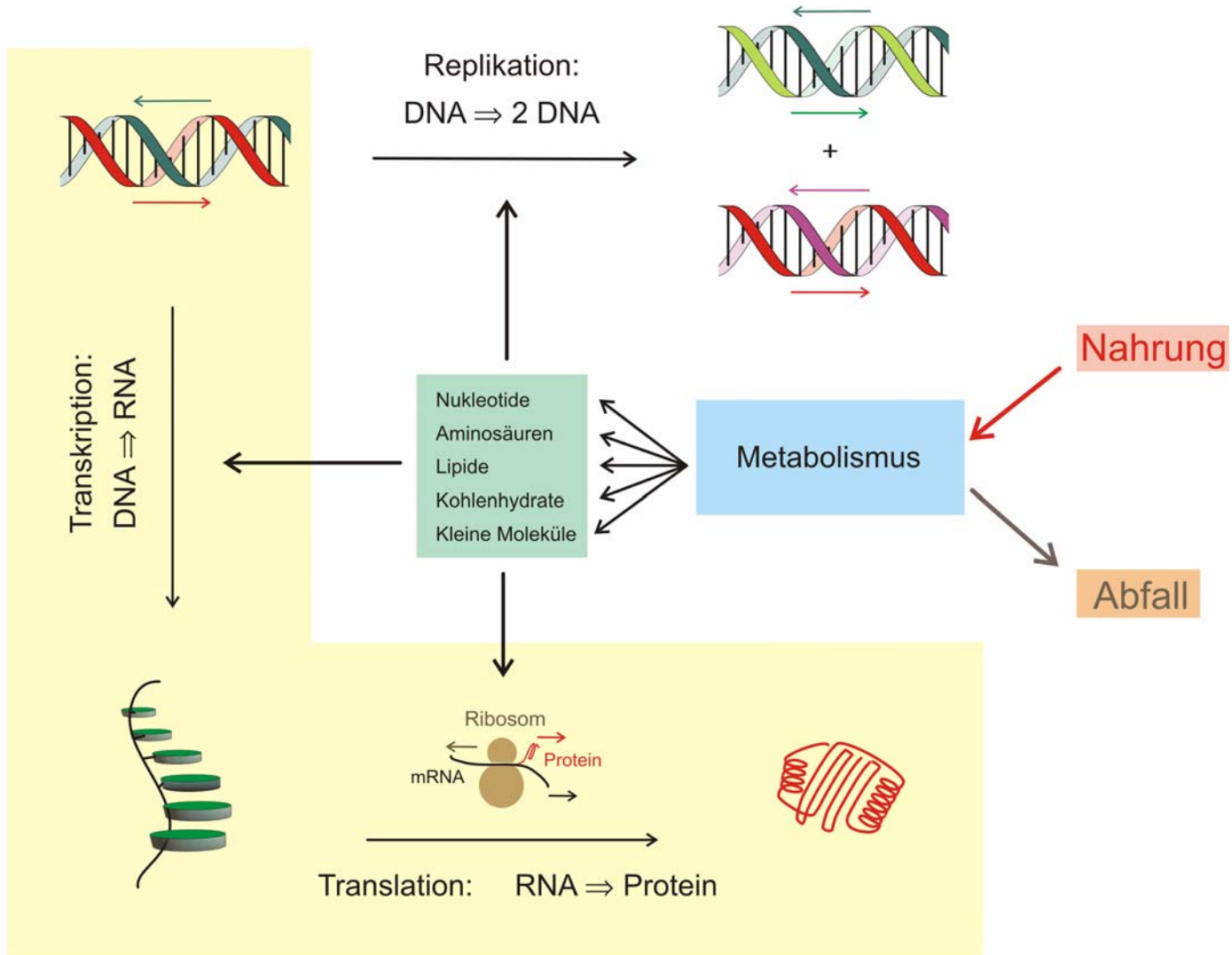
G ≡ Guanine

T ≡ Thymine

C ≡ Cytosine

Deoxyribonucleic acid - DNA

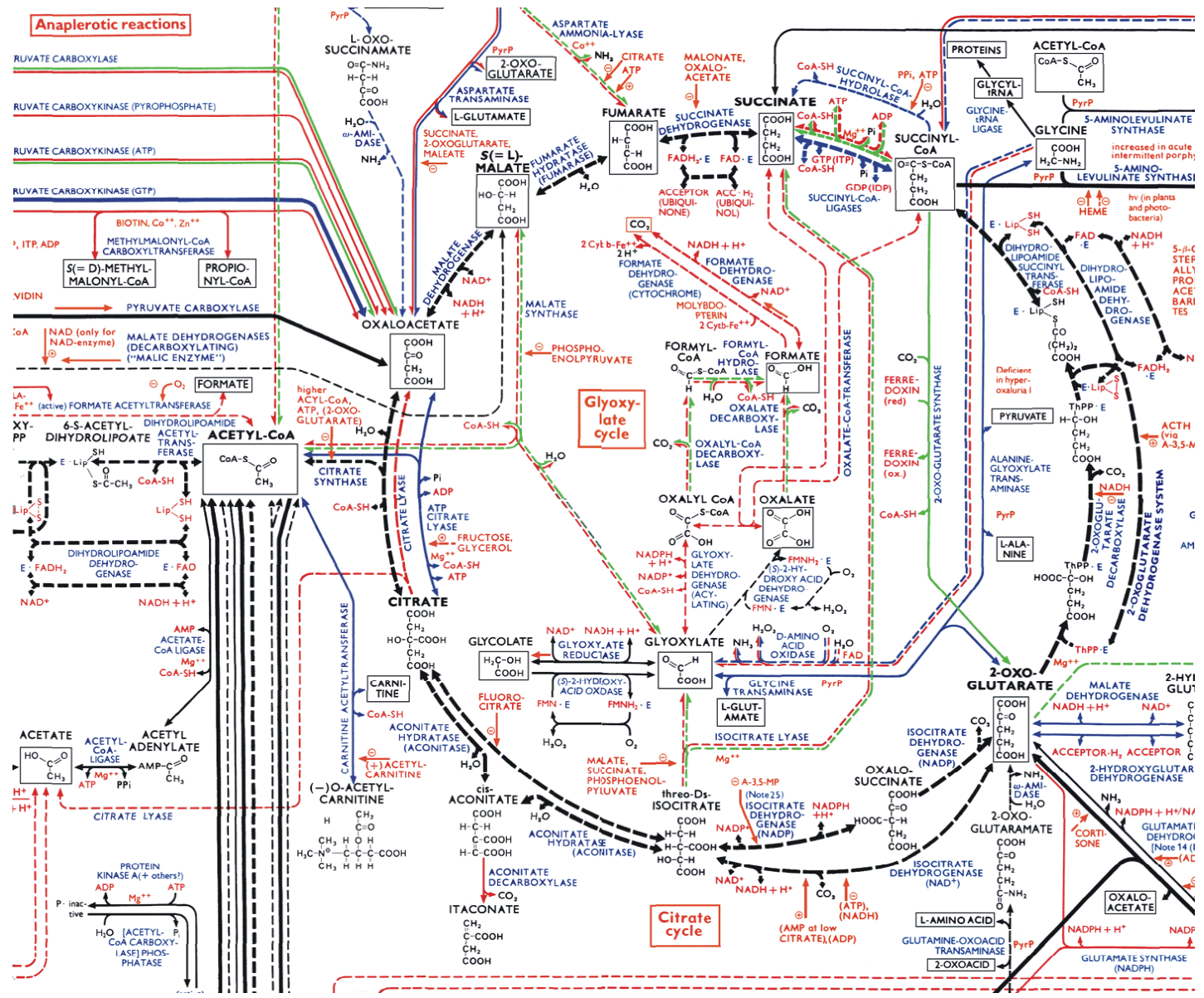




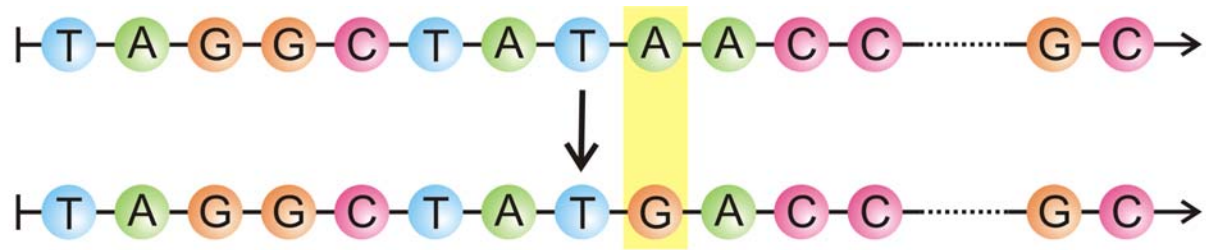
Skizze des zellulären Stoffwechsels

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	<b>Biochemical Pathways</b>											
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

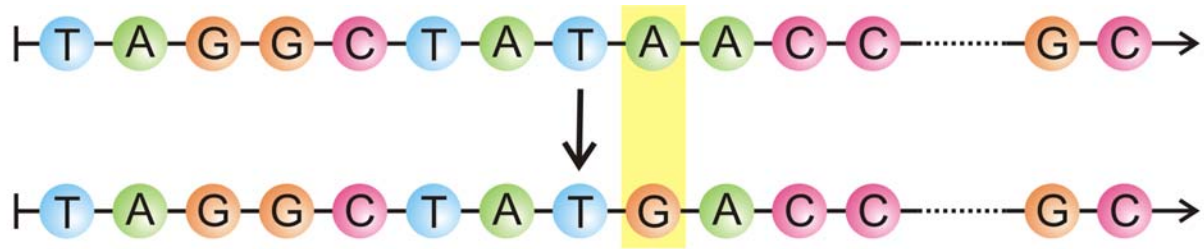
Das Reaktionsnetzwerk des zellulären Stoffwechsels publiziert von Boehringer-Ingelheim.



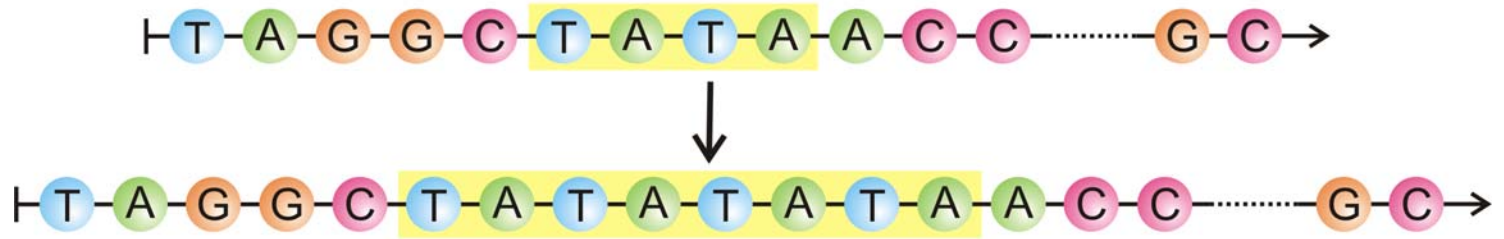
Der Zitronensäure- oder Krebszyklus (vergrößert aus der vorigen Abbildung).



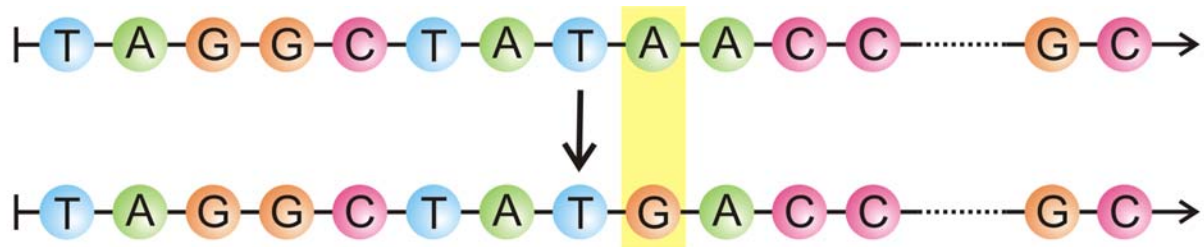
Punktmutation



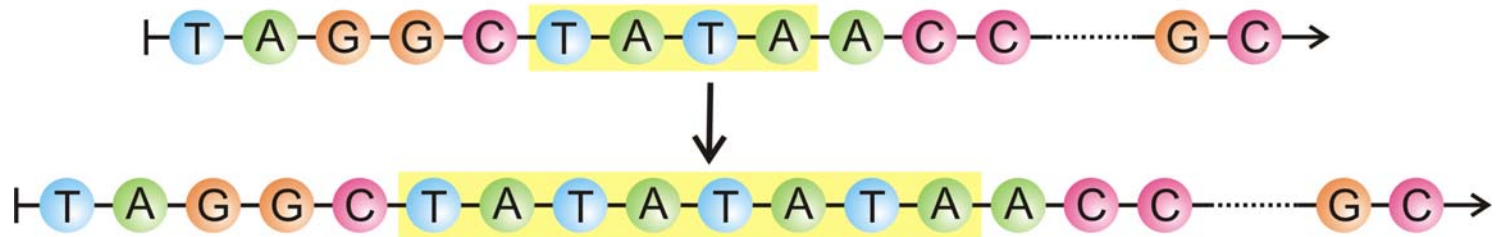
Punktmutation



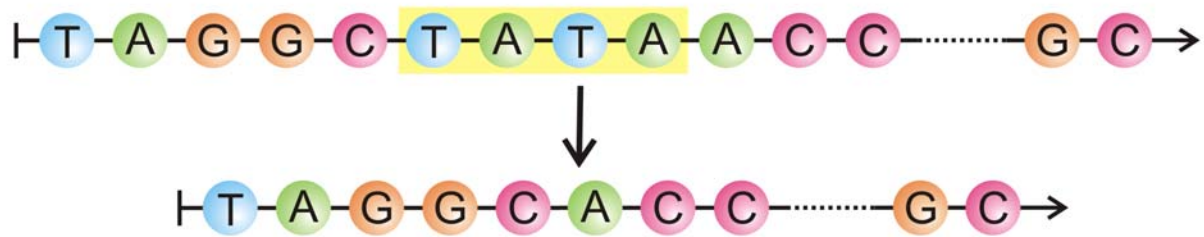
Insertion



Punktmutation



Insertion



Deletion



Reconstruction of phylogenies through comparison of molecular sequence data

## Molekulare Evolutionsforschung durch DNA-Sequenzierung

Aus dem Vergleich der heutigen DNA-Sequenzen kann die geschichtliche Abfolge der Mutationen rekonstruiert werden und diese ergibt phylogenetische Bäume, die jenen aus der vergleichenden Morphologie, welche durch Betrachtung von Formen und Gestalten der Organismen gewonnen wurden, weitest gehend entsprechen.

Eine in der Vergangenheit postulierte **molekulare Uhr der Evolution** verlangt, dass die Mutationshäufigkeiten auf den verschiedenen Ästen der phylogenetischen Bäume gleich groß sind. Die **molekulare Uhr** ist bei Wirbeltieren recht gut erfüllt, trifft aber für die wirbellosen Tiere nicht zu.



1. Geschichte der Evolutionstheorie
- 2. Wahrscheinlichkeit und Zufall in der Biologie**
3. Komplexes Verhalten aus einfachen Regeln
4. Evolutionsexperimente
5. Evolutionäres "Basteln" und Komplexität
6. Schlußbemerkungen

Eugene Wigner's or Fred Hoyle's argument applied to a bacterium:

**All genomes have equal probability and all except one have no survival value or are lethal**

5'-end **GCGGATTTAGCTCAGTTGGGAGAGCGCCAGACTGAAGATCTGGAGGTCCTGTGTTCGAUCCACAGAATTC.....GCACCA** 3'-end

Alphabet size: 4

Chain length:  $\approx 1\,000\,000$  nucleotides

Number of possible genomes:  $4^{1\,000\,000}$

Probability to find a given bacterial genome:

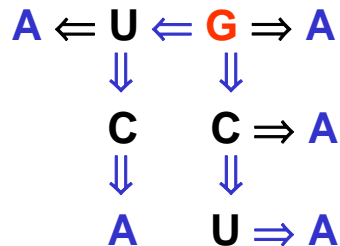
$$4^{-1\,000\,000} \approx 10^{-600\,000} = 0.000\dots001$$

  
600000

Eugene Wigner's and Fred Hoyle's arguments revisited:

**Every single point mutation leads to an improvement and is therefore selected**

5'-end **GCGGATTAGCTCAGTTGGGAGAGCGCCAGACTGAAGATCTGGAGGTCCTGTGTTCGAUCCACAGAATTC.....GCACCA** 3'-end



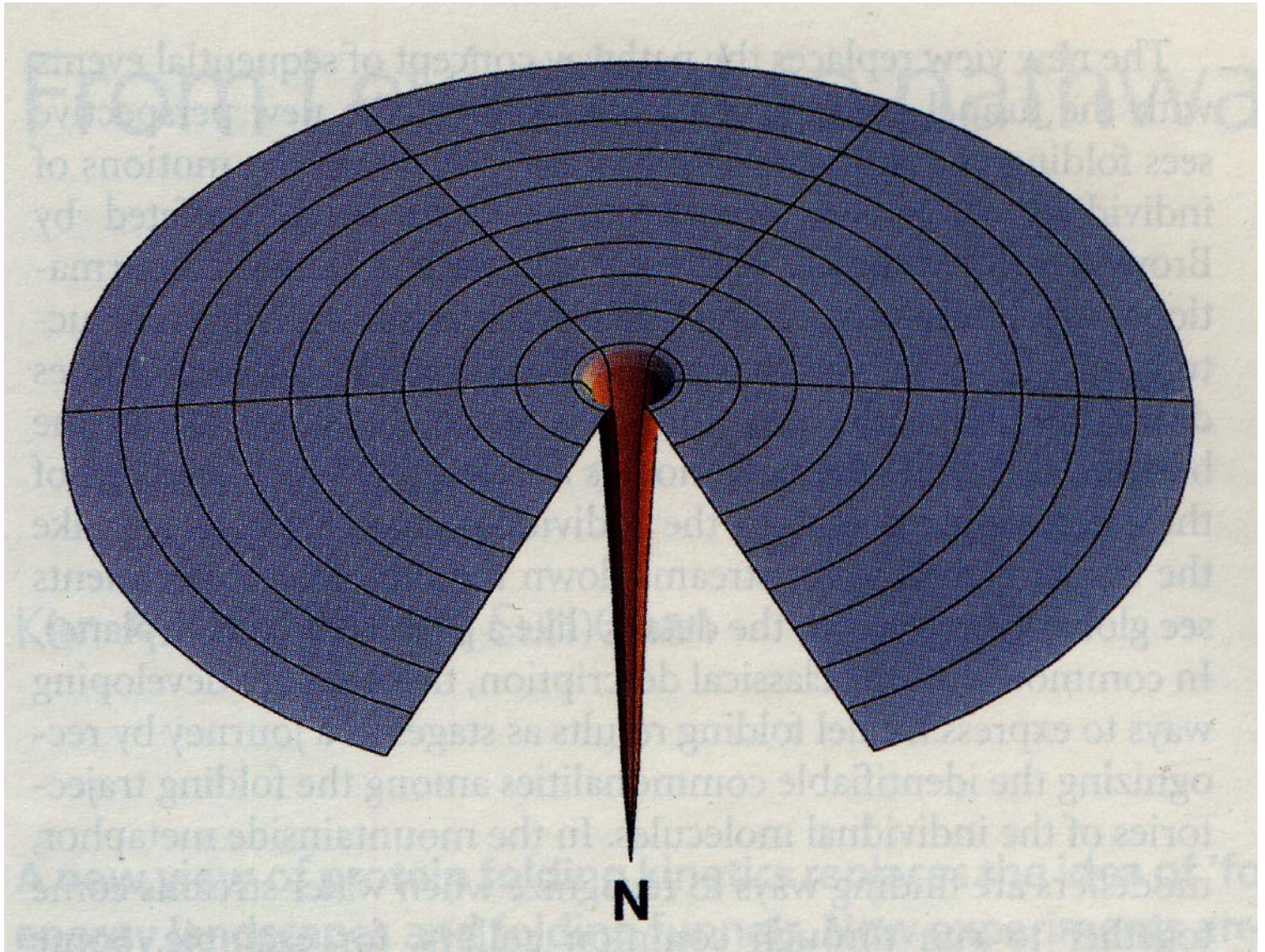
Alphabet size: 4

Chain length:  $\approx 1\,000\,000$  nucleotides

Length of longest path to the optimum:  $3 \times 10\,000\,000$

Probability to find the optimal bacterial genome:

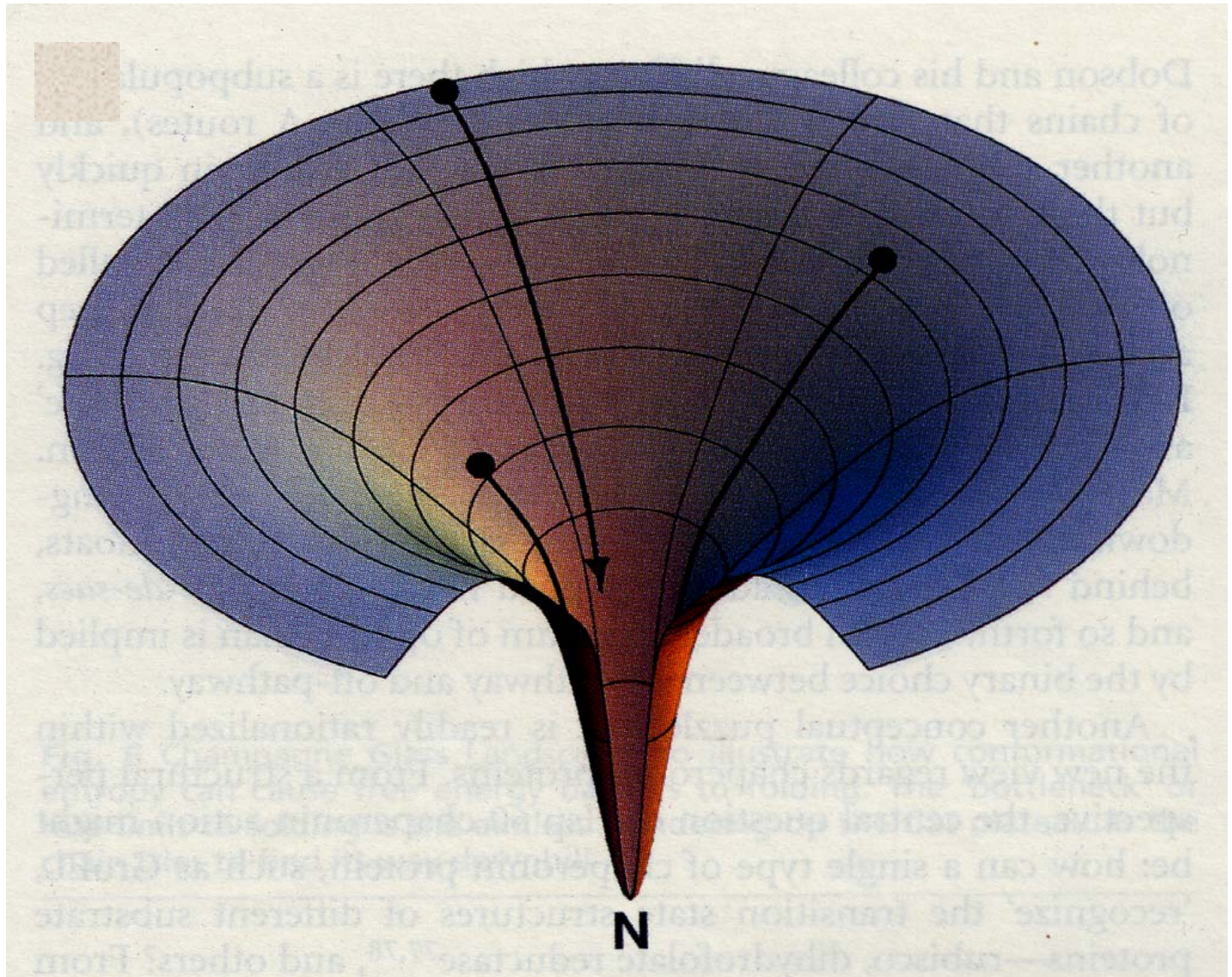
$$0.333.. \times 10^{-6} = 0.000000333..$$



Die Golfplatzlandschaft

Hoyles Paradoxon

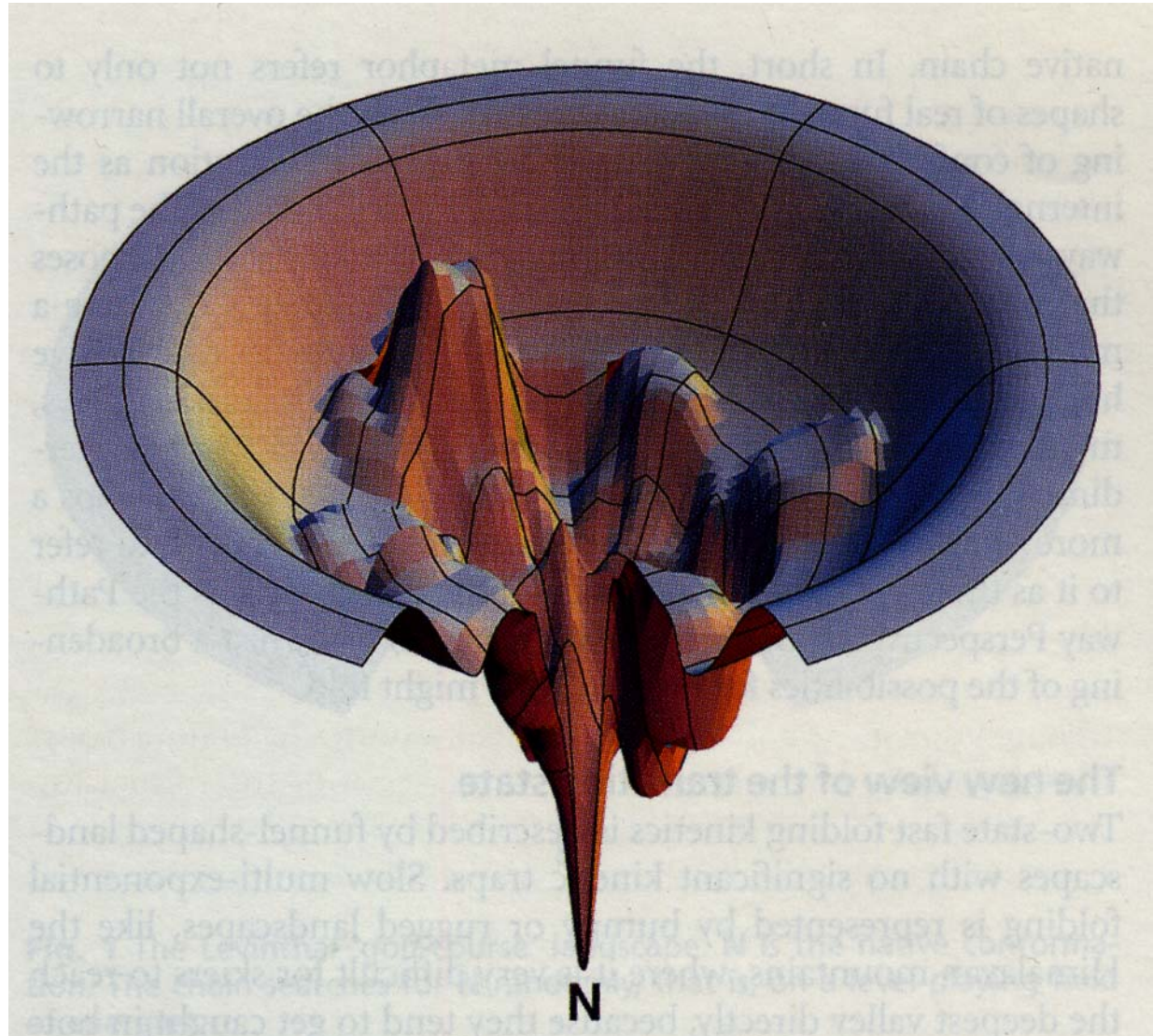
Picture: K.A. Dill, H.S. Chan, Nature Struct. Biol. 4:10-19



Die Trichterlandschaft

Die Lösung von Hoyles Paradoxon

Picture: K.A. Dill, H.S. Chan, Nature Struct. Biol. 4:10-19



Die strukturierte Trichterlandschaft

Die Lösung von Hoyles Paradoxon

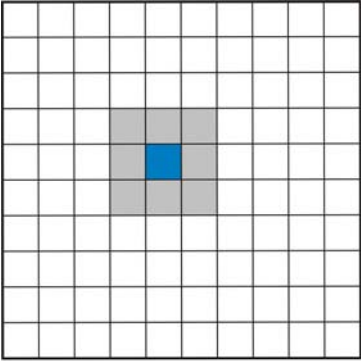
Picture: K.A. Dill, H.S. Chan, Nature Struct. Biol. 4:10-19

**Aber** die Landschaften, auf denen die Evolution in der Natur oder im Laborexperiment stattfindet, sind viel komplizierter als die drei hier gezeigten einfachen Beispiele !

1. Geschichte der Evolutionstheorie
2. Wahrscheinlichkeit und Zufall in der Biologie
- 3. Komplexes Verhalten aus einfachen Regeln**
4. Evolutionsexperimente
5. Evolutionäres "Basteln" und Komplexität
6. Schlußbemerkungen

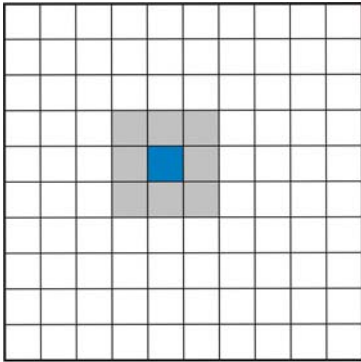


# John Horton Conway's Game-of-Life

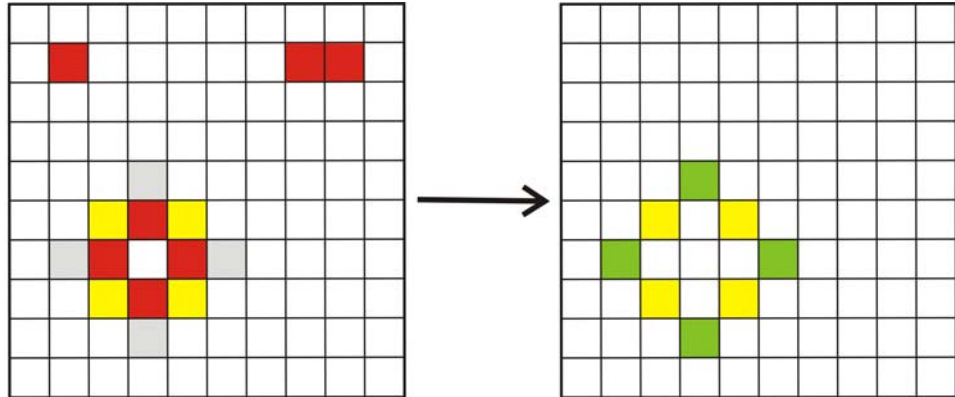


Cell and neighborhood

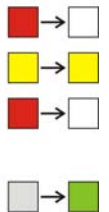
# John Horton Conway's Game-of-Life



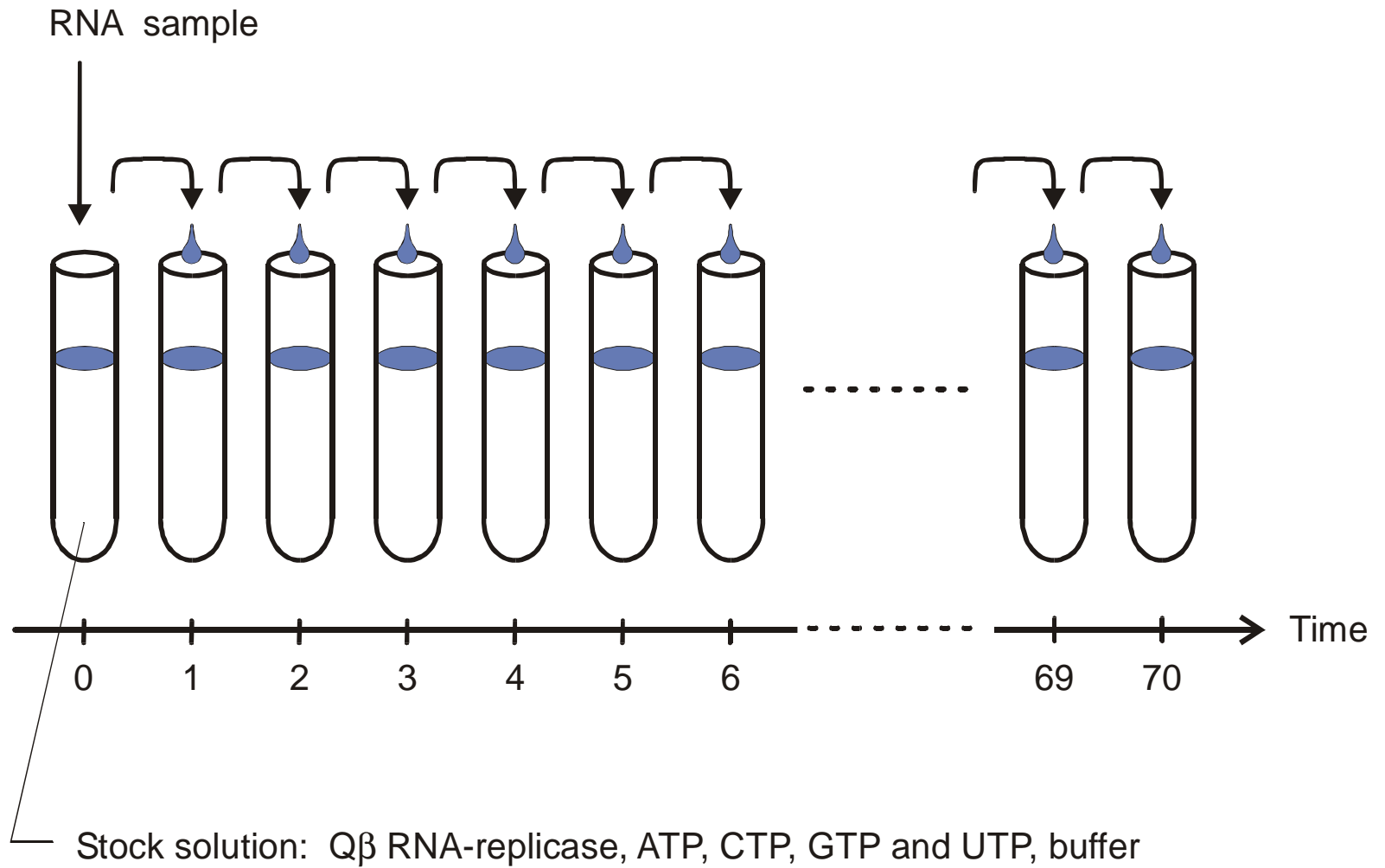
Cell and neighborhood



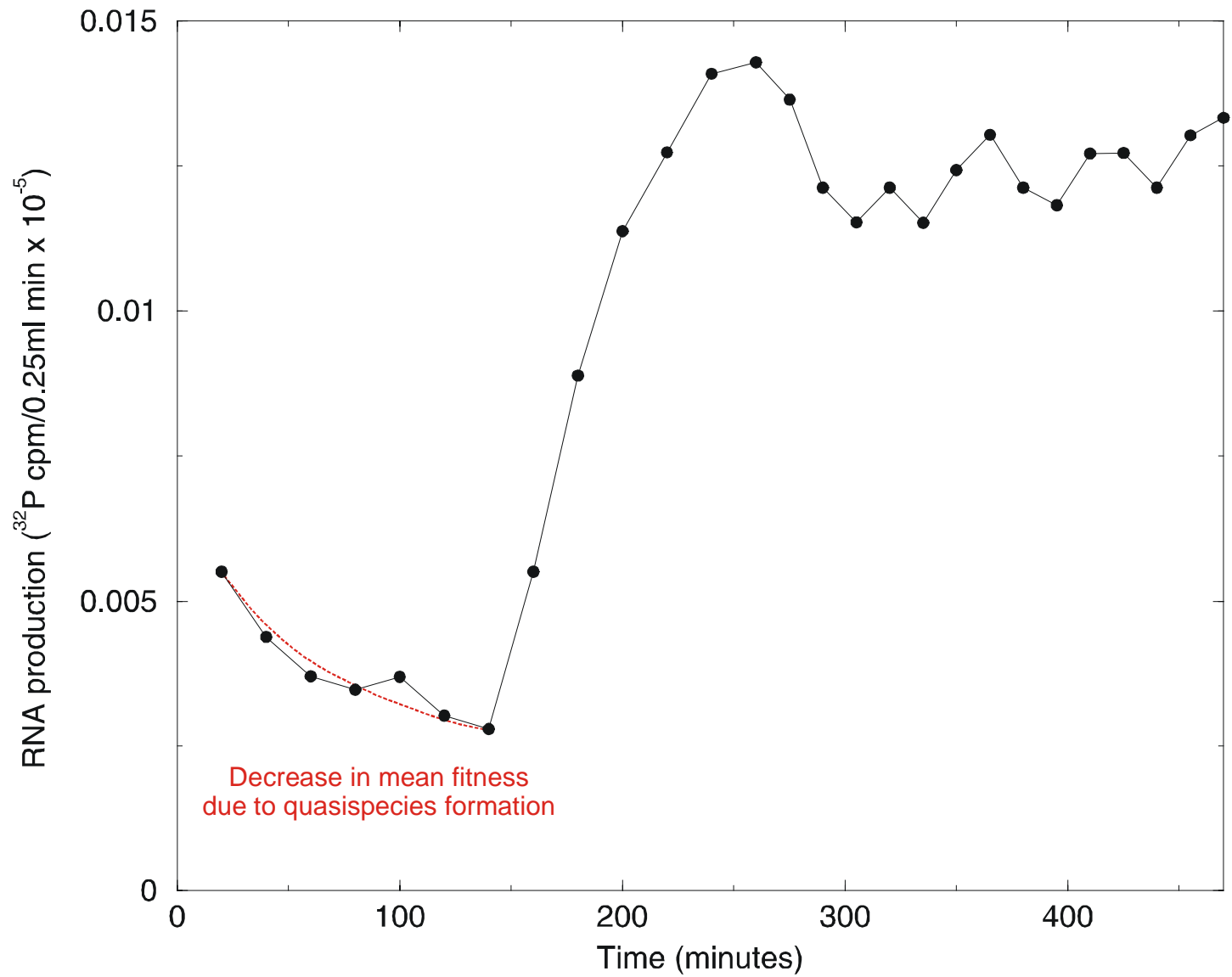
- Populated cell:
- (1) each cell with one or no neighbors dies
  - (2) each cell with two or three neighbors survives
  - (3) each cell with four or more neighbors dies
- Empty cell:
- (4) each empty cell with three neighbors becomes populated.



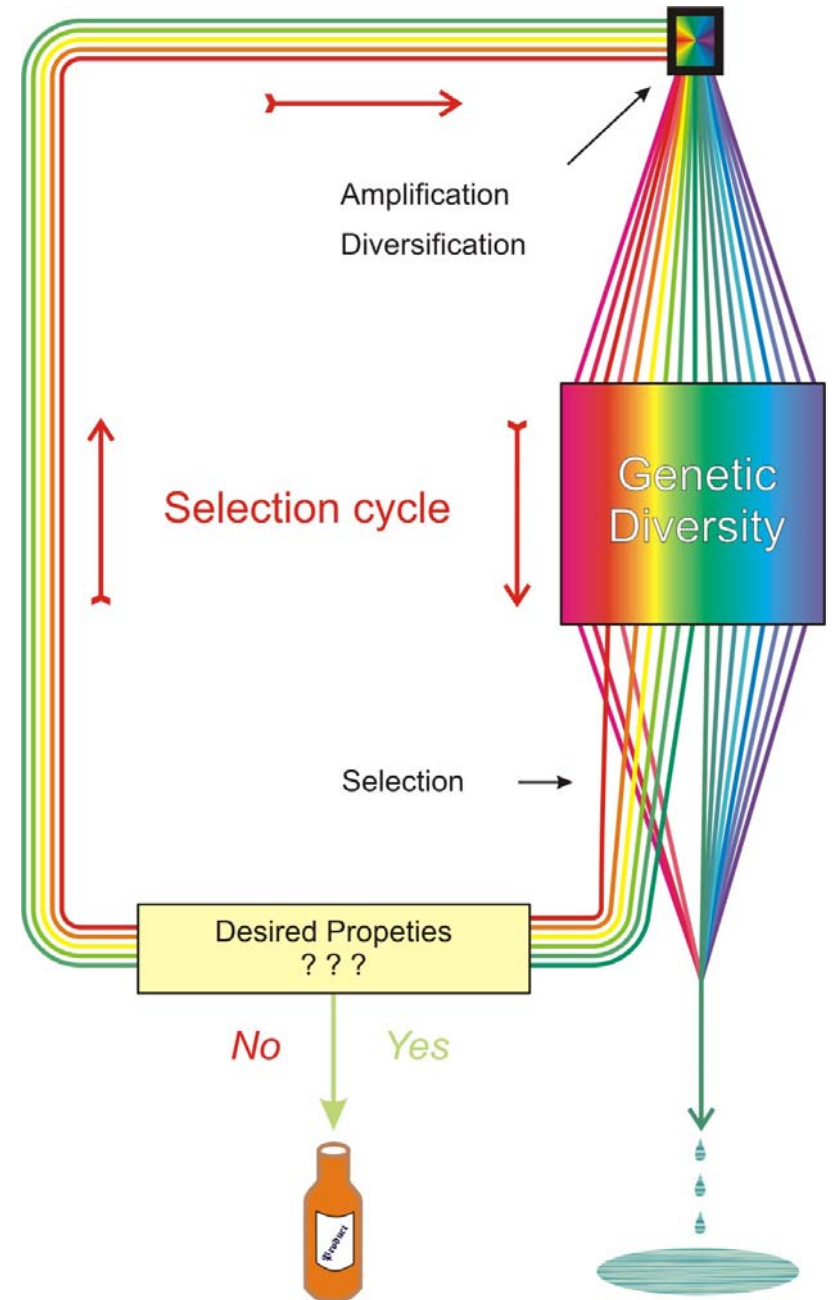
1. Geschichte der Evolutionstheorie
2. Wahrscheinlichkeit und Zufall in der Biologie
3. Komplexes Verhalten aus einfachen Regeln
- 4. Evolutionsexperimente**
5. Evolutionäres "Basteln" und Komplexität
6. Schlußbemerkungen



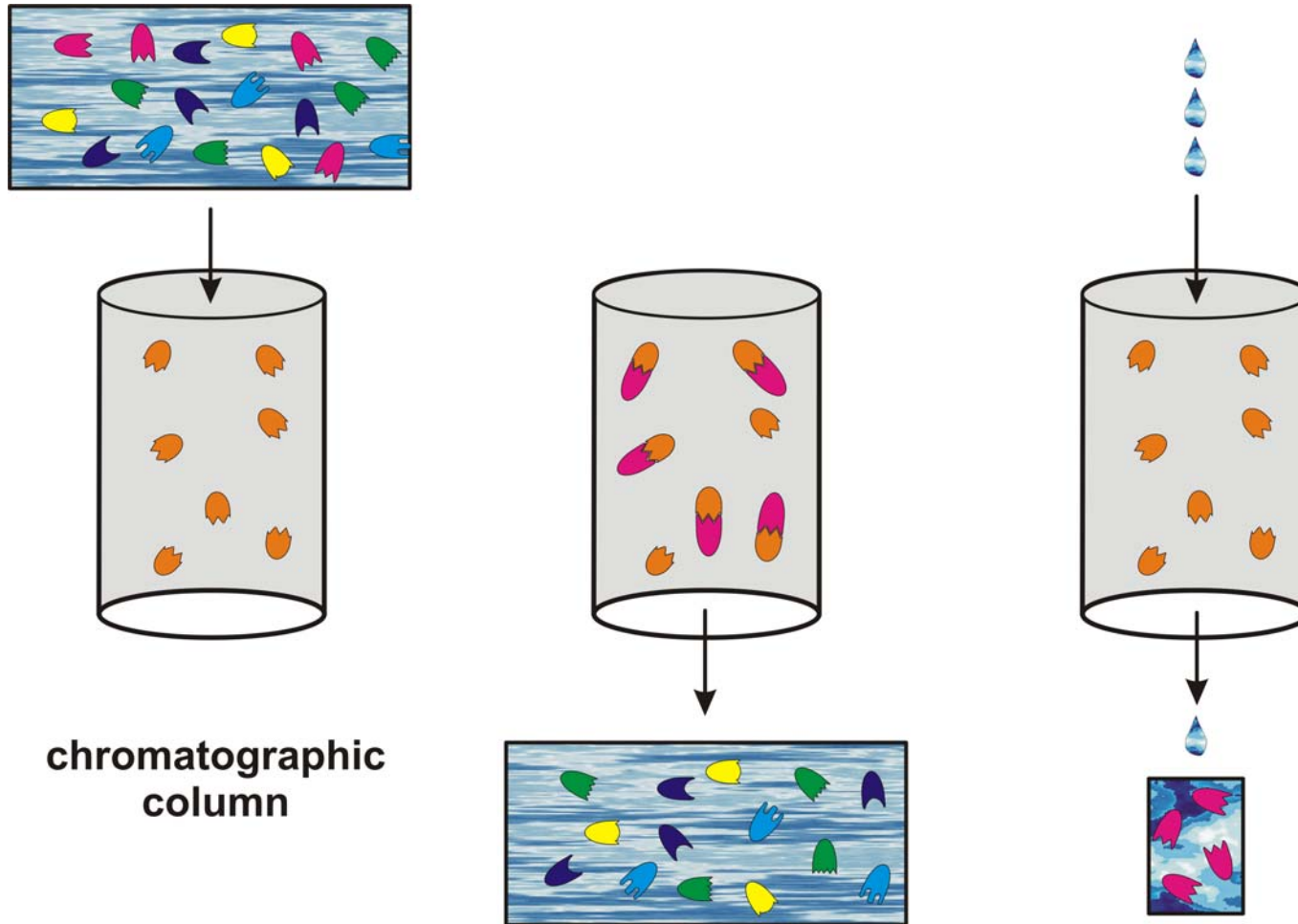
Anwendung der seriellen Überimpfungstechnik auf RNA-Evolution in Reagenzglas



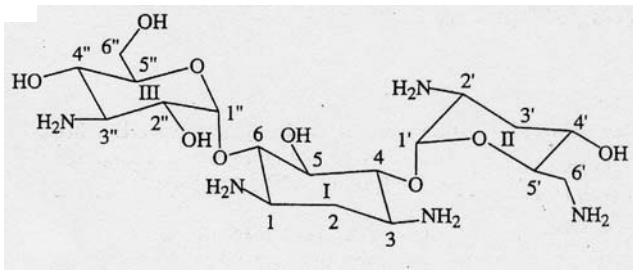
The increase in RNA production rate during a serial transfer experiment



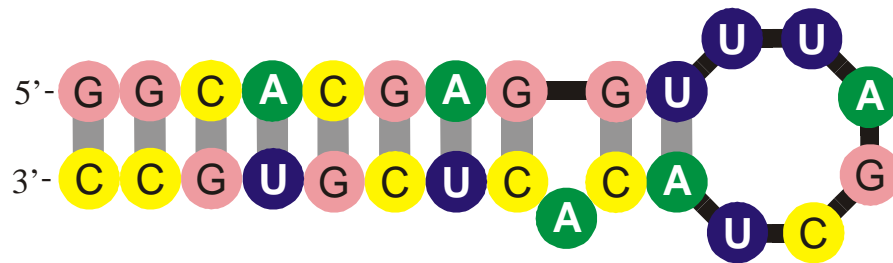
Ein Beispiel für Selektion von Molekülen mit vorbestimmbaren Eigenschaften im Laborexperiment



Die SELEX-Technik zur evolutionären Erzeugung von stark bindenden Molekülen



tobramycin

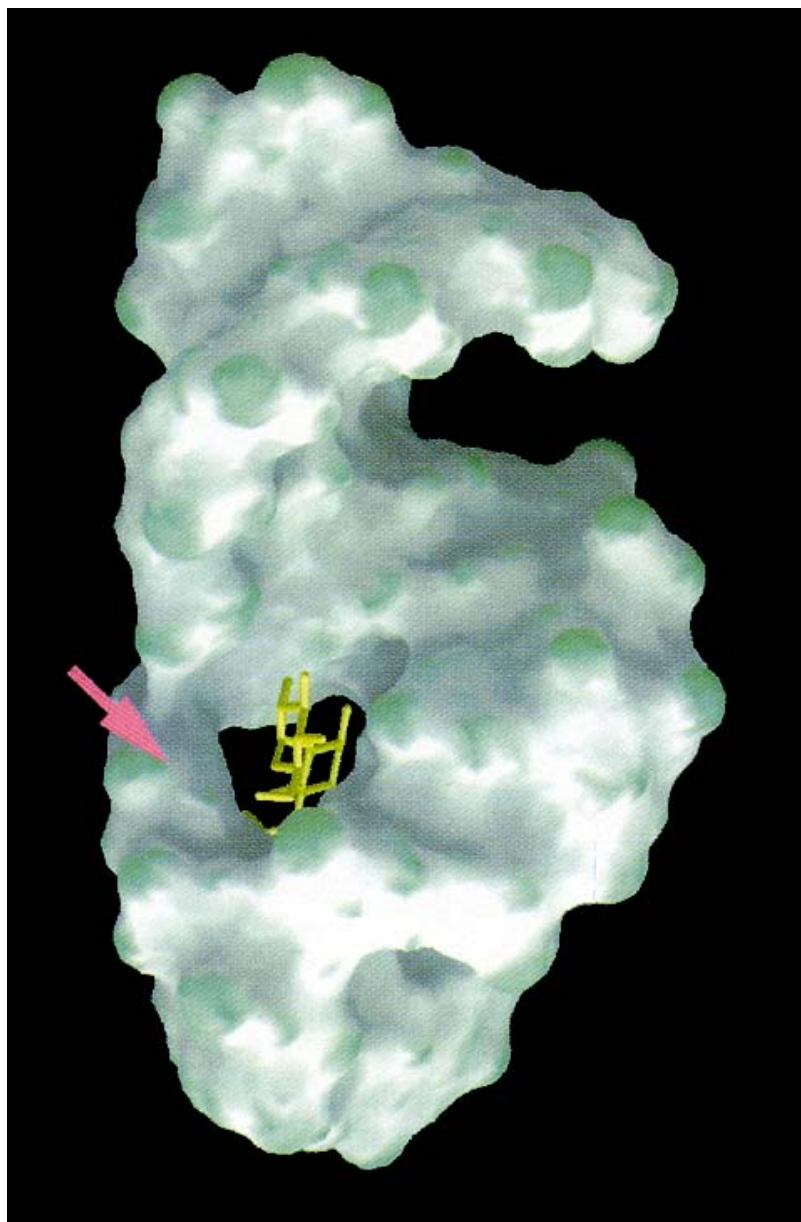


RNA aptamer

Formation of secondary structure of the tobramycin binding RNA aptamer with  $K_D = 9 \text{ nM}$

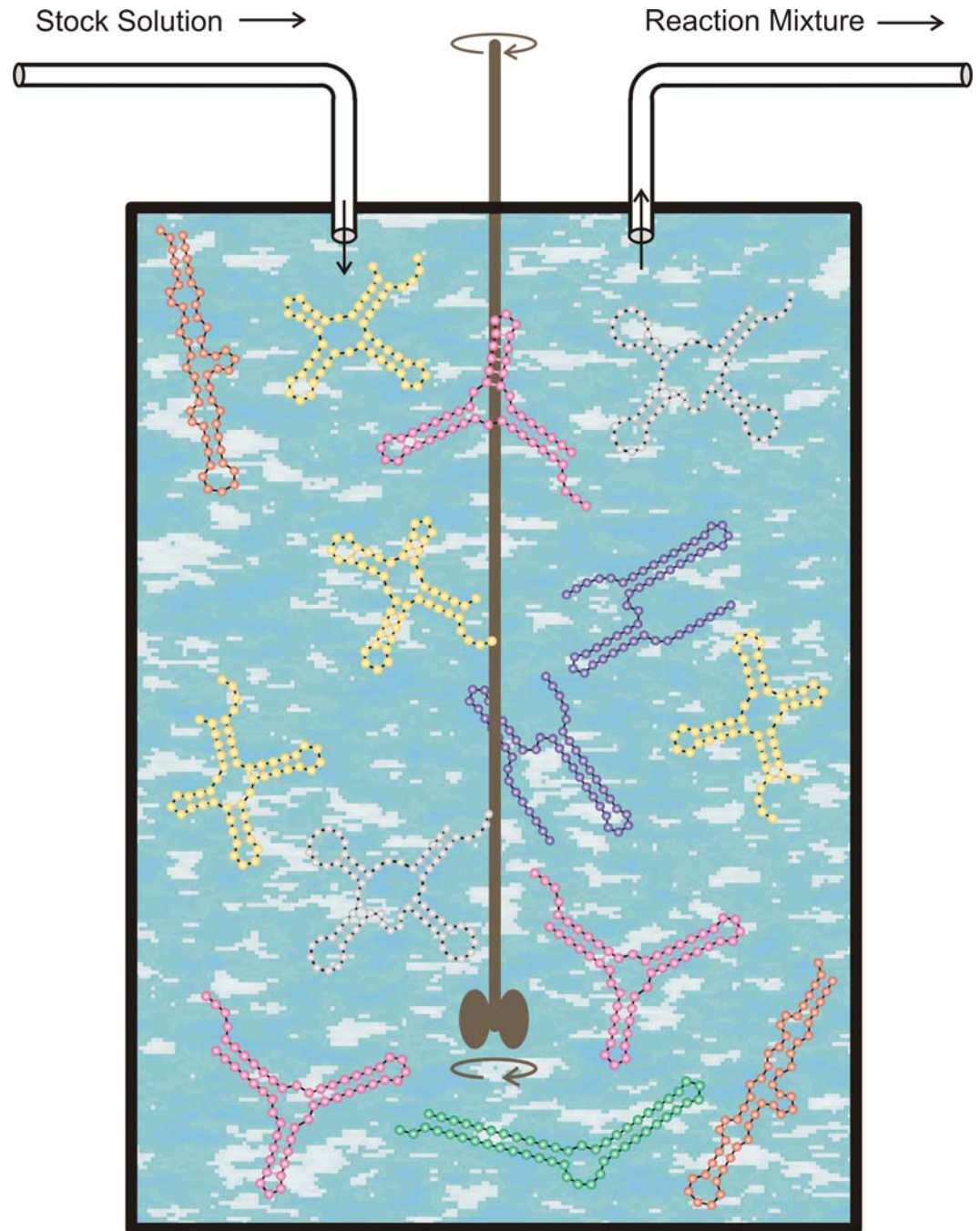
L. Jiang, A. K. Suri, R. Fiala, D. J. Patel, *Saccharide-RNA recognition in an aminoglycoside antibiotic-RNA aptamer complex*. *Chemistry & Biology* 4:35-50 (1997)



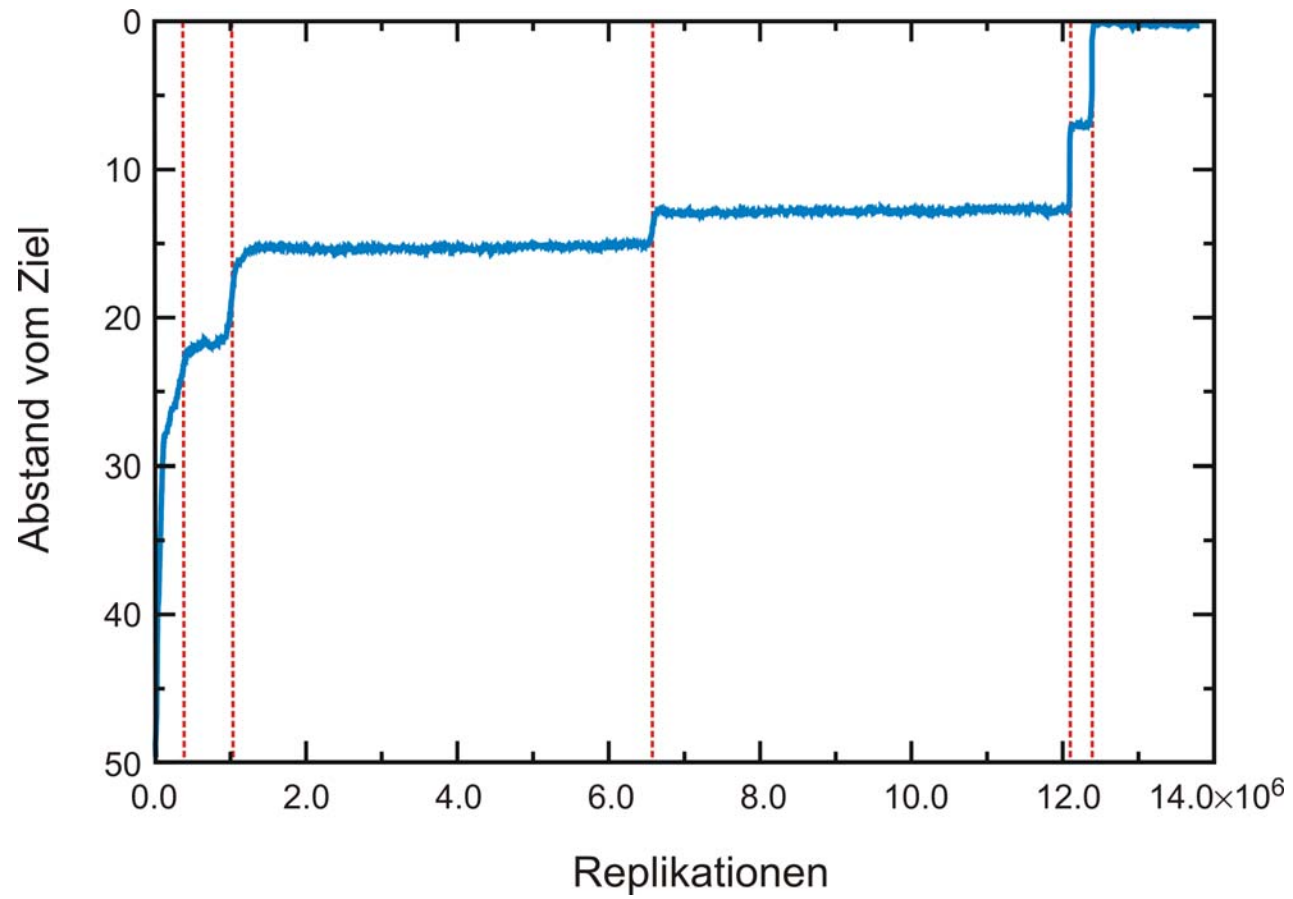


The three-dimensional structure of the tobramycin aptamer complex

L. Jiang, A. K. Suri, R. Fiala, D. J. Patel,  
*Chemistry & Biology* **4**:35-50 (1997)

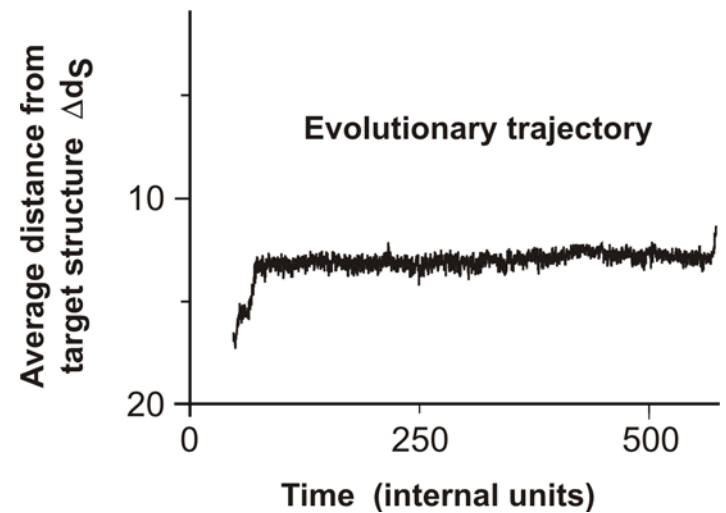


Der Flussreaktor zur  
Optimierung von  
Strukturen im  
Computereperiment



Computersimulation eines SELEX-Experiments im Flussreaktor

**28 neutral point mutations** during a long quasi-stationary epoch



entry	GGUAUGGGCGUUGAAUAGUAGGGUUUAAACCAAUCGG	CAACGAUCUCGUGUGCGCAUUUCAUAUCCCGUACAGAA
8	.(((((((((((((. . . . . (((. . . . .)) . . . . .)))) . . . . .(((((. . . . .)))))))))) . . . . .	
exit	GGUAUGGGCGUUGAAUA	AJAGGGUUUAAACCAAUCGGCCAACGAUCUCGUGUGCGCAUUUCAUAU
entry	GGUAUGGGCGUUGAAUA	AUAGGGUUUAAACCAAUCGGCCAACGAUCUCGUGUGCGCAUUUCAUAU
9	.((((((.( . . . . .(((((. . . . .)) . . . . .)))) . . . . .(((((. . . . .)))))) . . . . .	
exit	UGGAUGGACGUUGAAUAACAAGGUAUCGACCAAACAACCAACGAGUAAGUGUGUA	CGCCCCACACACCGUCCCAAG
entry	UGGAUGGACGUUGAAUAACAAGGUAUCGACCAAACAACCAACGAGUAAGUGUGUA	CGCCCCACACACCGUCCCAAG
10	.(((((. . . . .(((((. . . . .)) . . . . .)))) . . . . .(((((. . . . .)))))) . . . . .	
exit	UGGAUGGACGUUGAAUAACAAGGUAUCG	ACCAAACAACCAACGAGUAAGUGUGUA

**Transition inducing point mutations** change the molecular structure

**Neutral point mutations** leave the molecular structure unchanged

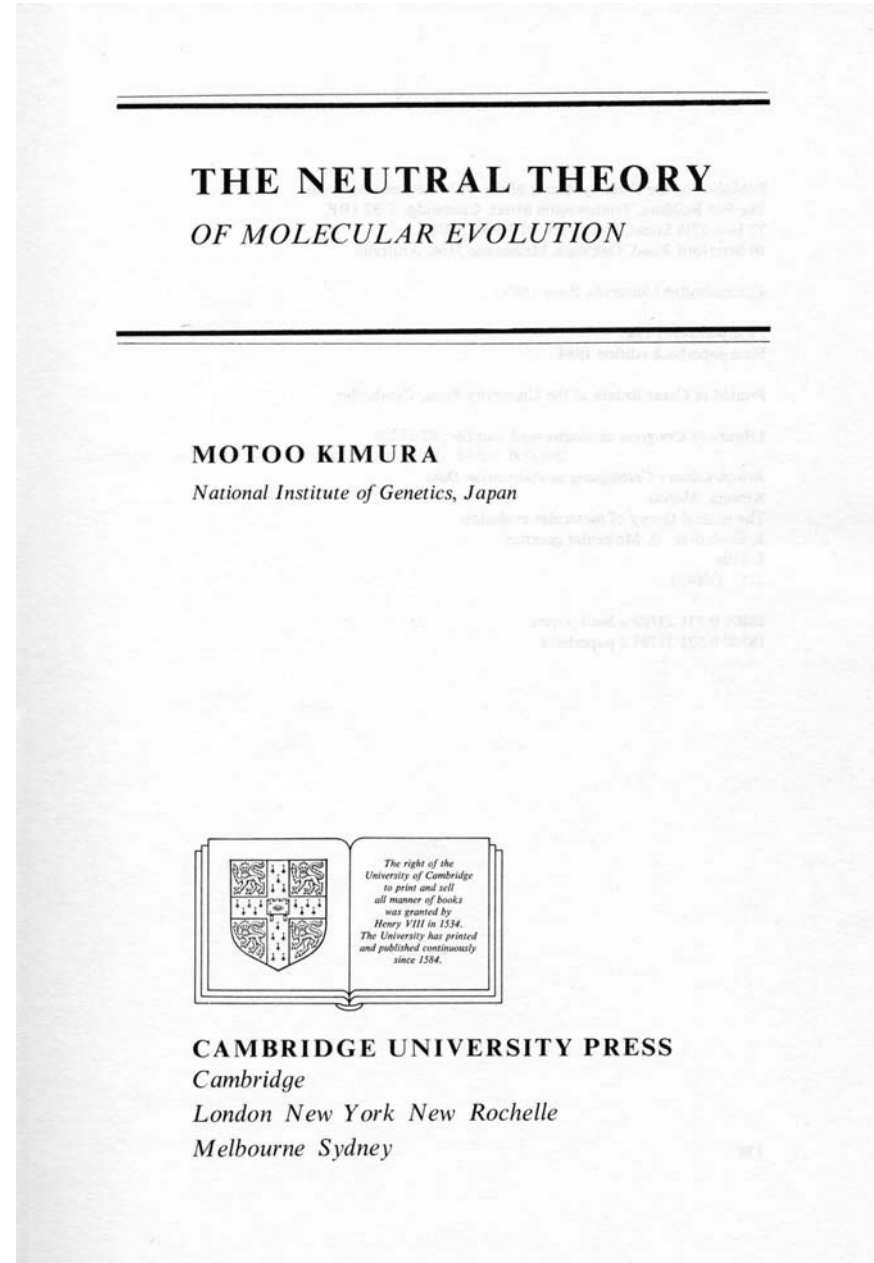
**Neutral genotype evolution** during phenotypic stasis



Motoo Kimuras Populationsgenetik der neutralen Evolution.

Evolutionary rate at the molecular level.  
*Nature* **217**: 624-626, 1955.

*The Neutral Theory of Molecular Evolution.*  
Cambridge University Press. Cambridge,  
UK, 1983.

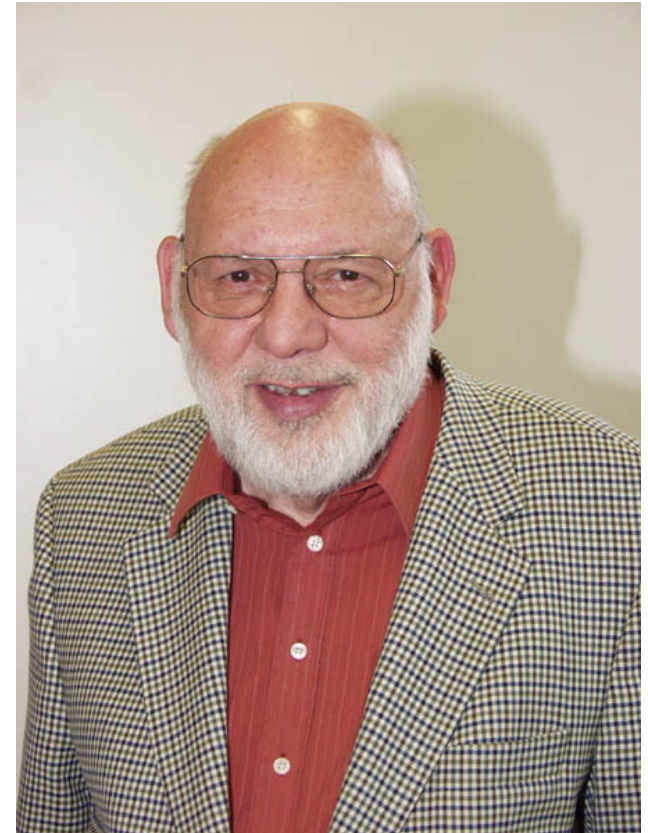


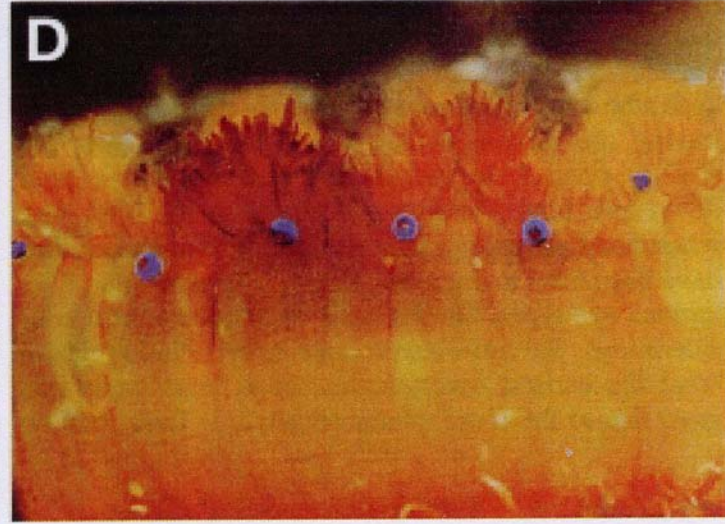
1. Geschichte der Evolutionstheorie
2. Wahrscheinlichkeit und Zufall in der Biologie
3. Komplexes Verhalten aus einfachen Regeln
4. Evolutionsexperimente
- 5. Evolutionäres "Basteln" und Komplexität**
6. Schlußbemerkungen

Walter Gehring, Biozentrum, Universität Basel

Die Molekulargenetik zeigt, dass die Entwicklung aller verschieden geformten Augen denselben evolutionären Ursprung hat, welcher bis zu einer einfachen lichtempfindlichen Vorstufe eines Organs zurückverfolgt werden kann, das bereits in primitiven Bakterienstämmen gefunden wird.

W. J. Gehring. The genetic control of eye development and its implications for the evolution of the various eye-types. *Zoology* **104**:171-183, 2001





**Fig. 1.** Different types of eyes. (A) Camera-type eye from the Lemur *Propithecus verreauxi*. (B) Compound eye of the praying Mantis. (C) Camera-type eye from the Cephalopod *Sepia erostrata*. (D) Mirror eye from the clam *Chlamys nobilis*. (Courtesy of Dr. Kazuto Kato; photographs kindly provided by Masahiro Iijima, Susumu Yamaguchi and Isamu Soyama).

Walter J. Gehring, The genetic control of eye development and its implications for the evolution of the various eye-types. *Zoology* **104** (2001), 171-183



# Eye Formation in

## Cephalopods

## Vertebrates

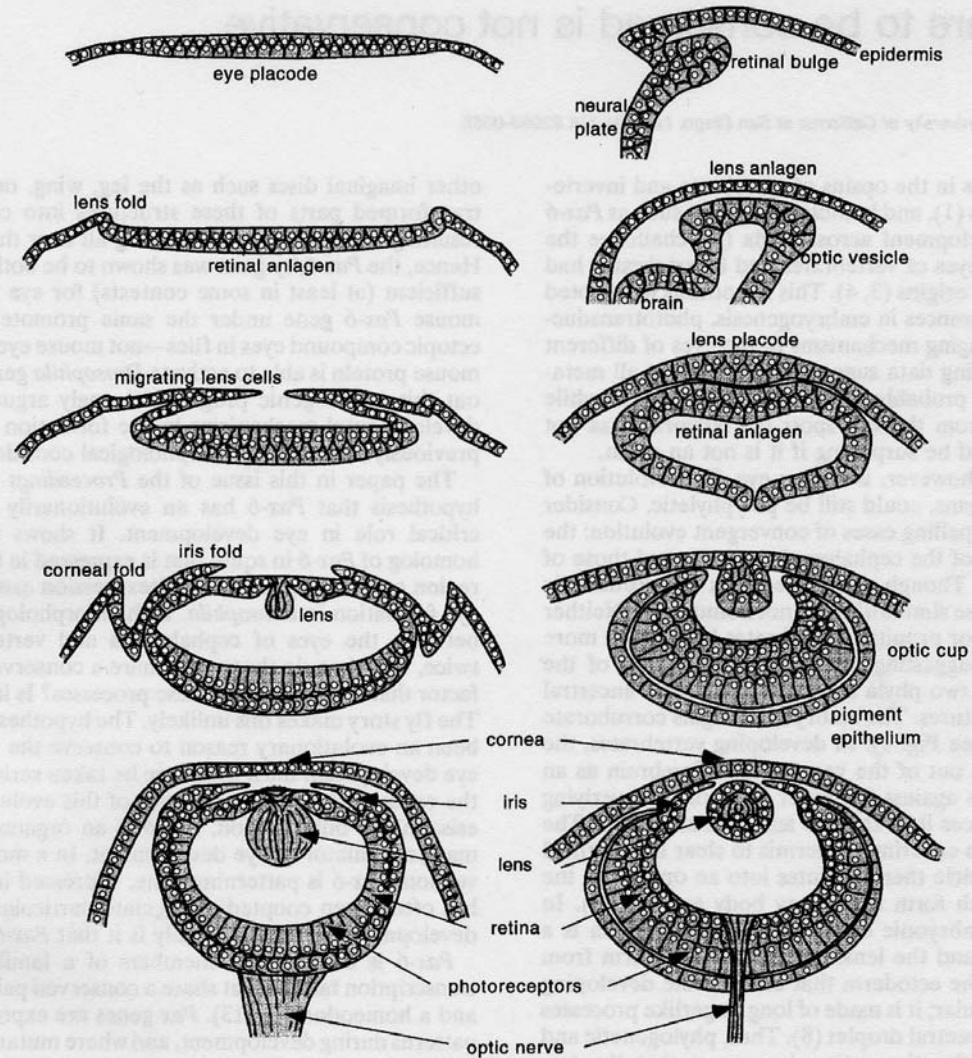


FIG. 1. Schematic diagram of cephalopod eye development (*Left*) and vertebrate eye development (*Right*) as explained in more detail in refs. 7 and 8. Development proceeds from top to bottom. Even though the adult structures are fairly similar, excepting certain obvious features such as the placement of the photoreceptors and lentigenic cells, the development is very different. The cephalopod eye forms from an epidermal placode through a series of successive infoldings, while the vertebrate eye emerges from the neural plate and induces the overlying epidermis to form the lens.



1. *Geschichte der Evolutionstheorie*
2. *Wahrscheinlichkeit und Zufall in der Biologie*
3. *Komplexes Verhalten aus einfachen Regeln*
4. *Evolutionsexperimente*
5. *Evolutionäres "Basteln" und Komplexität*
6. **Schlußbemerkungen**

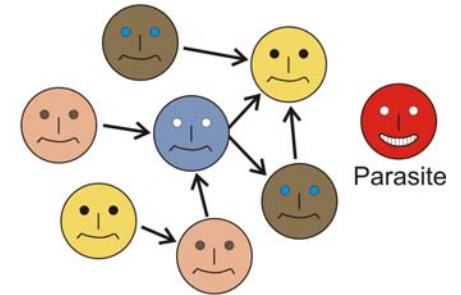
## Die großen Evolutionssprünge (nach John Maynard Smith und Eörs Szathmáry)

Replizierende Moleküle	⇒	Membranen, organisierte Teilung Moleküle in Kompartments
Unabhängige Replikatoren	⇒	Molekülverkettung, gemeinsame Replikation Chromosomen
RNA als Gen und Enzyme	⇒	genetischer Code, Ribosom DNA und Protein
Prokaryoten	⇒	Zusammenschluß durch Endosymbiose Eukaryoten
Asexuell vermehrende Klone	⇒	Ursprung der sexuellen Vermehrung Sexuell vermehrende Populationen
Protisten	⇒	Zelldifferenzierung und Entwicklung Pflanzen, Pilze und Tiere
Einzel lebende Individuen	⇒	Entstehung nicht-reproduktiver Kasten Tierkolonien
Primatengesellschaften	⇒	Sprache, Schrift, Kultur, ... menschliche Gesellschaften

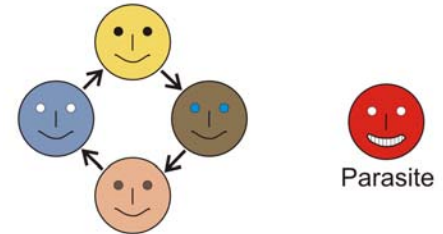
Stufe I:  
Unabhängige Replikatoren  
in Konkurrenz



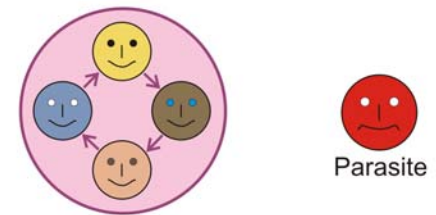
Stufe II:  
Katalyse und Konkurrenz  
bei der Replikation



Stufe III:  
Funktionell verknüpfte  
Replikatoren



Stufe IV:  
Neue Einheit der  
Selektion



Ein Modell für die Integration  
von Konkurrenten in einer  
höheren hierarchischen Einheit

Stufe V:  
Unabhängige Einheiten  
in Konkurrenz



Darwin hatte in folgenden Punkten **nicht recht**:

- Der Darwinsche **Vererbungsmechanismus** war falsch. Mendel hatte die korrekte Lösung.
- Mutation und Rekombination können keine, kleine und große Auswirkungen haben und es besteht kein Grund, dass die biologische Evolution quasikontinuierlich oder anders ausgedrückt **nur in verschwindend kleinen Schritten** erfolgt.
- Im Verlaufe der biologischen Evolution gab es auch **katastrophenartige Ereignisse** terrestrischen und extraterrestrischen Ursprungs.
- Die Komplexität der höheren Lebewesen ist so groß, dass ihre Eigenschaften nicht **voll optimiert** sein können.

Darwins Theorie wurde in folgenden Punkten **voll bestätigt**:

- Das **Auftreten von Varianten** bei der Reproduktion wurde durch die Aufklärung der molekularen Mechanismen von Rekombination und Mutation auf eine solide wissenschaftliche Basis gestellt.
- Das Darwinsche **Prinzip der Optimierung durch Variation und Selektion** in endlichen Populationen gilt nicht nur in der Biologie sondern auch in der unbelebten Welt.
- Die natürliche Entstehung der Arten und die daraus resultierenden **phylogenetischen Stammbäume** wurde durch die Vergleiche der genetischen Informationsträger heute lebender Organismen voll bestätigt.

- Das Referat beschränkte sich auf die heutigen naturwissenschaftlichen Ergebnisse.
- Die Vorstellung der biologischen Evolution ist eine empirisch begründete, naturwissenschaftliche Theorie.
- Die Evolutionstheorie ist in einigen wesentlichen Aussagen experimentell prüfbar und überprüft und baut auf Tatsachen aus mehreren Teildisziplinen auf.
- Die Evolutionstheorie ist daher vom selben Rang wie physikalische Theorien, etwa die Newtonsche Mechanik, die Relativitätstheorie oder die Quantentheorie.
- Wie die meisten naturwissenschaftlichen Theorien kann die biologische Evolutionstheorie nicht alle beobachteten Einzelheiten erklären insbesondere, da die Biologie zur Zeit in einer faszinierenden und raschen Entwicklung steht.
- Die Molekularbiologie führt die biologischen Befunde auf Gesetzmäßigkeiten aus Physik und Chemie zurück, ohne dadurch die Eigenständigkeit der Biologie in Frage zu stellen.



Weitere Informationen auf der Web-Page

<http://www.tbi.univie.ac.at/~pks>

und in den Manuskripten

[Complexity 11\(1\):12-15](#) und [Castelgandolfo Lecture](#)

unter den Preprints.

