Spieltheorie und Populationsdynamik

Geschichte

Das Interesse an der Spieltheorie ging anfangs von der **Ökonomie** aus und war ein erster Schritt in der Modellierung von ökonomischem Verhalten (ab 18. Jh.). Der Ansatz setzte sich aber nicht durch, auch wegen einem Mangel an Experimenten.

Nach einer Periode der mathematischen Formalisierung, angestoßen von John von Neumann, breitete sich der Ansatz anfangs der 70er Jahre auch in der **Biologie** aus, insbesondere um **Evolutionsmodelle** zu beschreiben.

Bücher:

John von Neumann & Oskar Morgenstern:
Theory of Games and Economic Behavior, *1944,*

John Maynard Smith:
Evolution and the Theory of Games, 1982

Ulrich Müller: Evolution und Spieltheorie, 1990

Rudolf Schüßler: Kooperation unter Egoisten, 1990

Michael Taylor: The possibility of cooperation, 1987

Richard Dawkins: The Selfish Gene, 1976

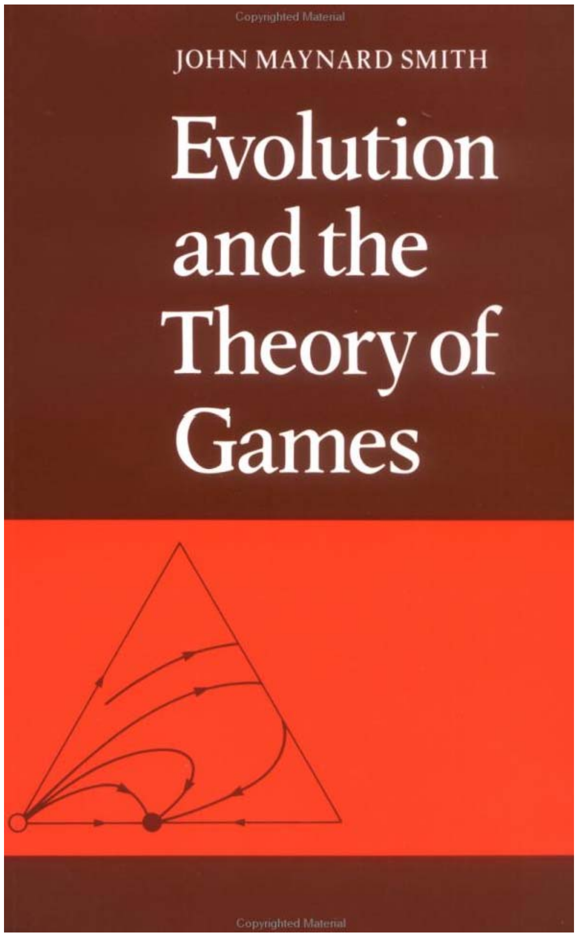
Matt Ridley: The origins of virtue, *1996*

Übersicht:

- Einfache Spiele
- Formalisierung: Matrixspiele
- Einmalige und wiederholte Spiele:
  Das Gefangenendilemma
- Zeitliche Dynamik
- Populationsabhängige Selektion
- Stabile schlechte Lösungen schlagen instabile bessere Lösungen bei der gedächtnisfreier Evolution.
- Spieltheorie in der Ökonomie
- Biologische Extrapolation:
  Das egoistische Gen.
- Molekularer Evolution

Sinn der Vorlesung ist, einen Einblick in die komplexe Dynamik von einfachen Spielen zu gewinnen.

Von der Ökonomie zur Biologie

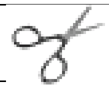
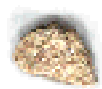
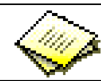
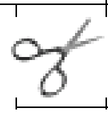
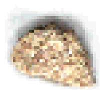
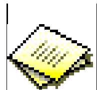


Spieltheorie formalisiert die Beschreibung von Spielen. Wir werden hier die Matrixspiele beschreiben. Damit kann man in stark reduzierter Form eine aufsteigende Komplexität von Strategien und Spielabläufen beschreiben.

Angefangen hat die Spieltheorie in der Ökonomie, wo insbesondere mit Geld oder Spielsteinen direkt eine Formalisierung von Erfolg und Mißerfolg gegeben ist.

Wir werden sehen, wie das Punktsystem in eine biologischen Interpretation der Spieltheorie transformiert wird, nämlich als **Fitness** eines Individuums, was letztlich direkten Einfluß auf seine Reproduktion hat. Dies verbindet Spieltheorie mit Evolutionsbiologie. John Maynard Smith hat diesen Gedanken sehr weit vorangetrieben und wir werden oft seiner Darstellung folgen.

Matrixspiele

Auszahlungs Matrix		Spieler B		
				
		0	-1	1
Spieler A		1	0	-1
		-1	1	0

$$V = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Nullsummenspiel hier: $V_{ij} = V_{ji}$

Eine breite Klasse von Spielen kann mit einer Auszahlungsmatrix (payoff matrix) beschrieben und werden Matrixspiele genannt.

Wir schauen uns einmal **Knobeln** an (engl: to toss). Jeder Spieler kann **Schere**, **Stein** oder **Papier** zeigen. Die Auszahlung hängt davon ab, was der andere Spieler zeigt (siehe links).

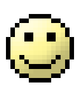
Die Matrix muß entlang der Zeilen gelesen werden. Wenn Ich Spieler A bin und die Strategie Schere spiele, gewinne ich 0 gegen die Strategie Schere von Spieler B, -1 gegen Stein und +1 gegen Papier.

(Spiele, bei denen die Auszahlung nur von der Strategie des anderen Spielers abhängt, nicht von seiner Person, werden **symmetrische Spiele** genannt und können in einer einfachen Matrix beschrieben werden.)

Knobel ist ein Beispiel eines **Nullsummenspiels**: was ein Spieler bekommt, verliert der andere. Im Falle von zwei Spielern ist die Auszahlungsmatrix symmetrisch.

Das Gefangenen-Dilemma

Zwischen Personen, die ihre Vorlieben beim Knobeln kennen, kann es ein psychologisch sehr komplexes Spiel sein. Diese Abhängigkeit vom Verhalten in vorherigen Spielen kann formal in reduzierter Form am Gefangenen Dilemma studiert werden.

Auszahlungs Matrix V		Spieler B	
			
Spieler A		1	5
		0	3

serendip.brynmawr.edu/playground/pd.html

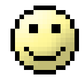
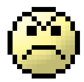
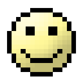
Im **Gefangenen-Dilemma** mit folgendem Szenario: Zwei Spieler kämpfen um eine Ressource. (Im Original: zwei Gefangenen werden am Tatort aufgegriffen und angeklagt, ein Verbrechen getan zu haben). Sie wählen erst ihre Strategie. Anthropomorph formuliert: sie können entweder **freundlich** (kooperativ) sein (sich der Tat bezichtigen) **oder aggressiv** (kompetitiv) wählen (den anderen beschuldigen) mit der folgenden Auszahlungsmatrix:

Wenn beide aggressiv sind, erhalten sie nur 1, wenn beide freundlich sind, erhalten sie 3. interessant wird es im asymmetrischen Fall. Wenn freundlich auf aggressiv trifft, gewinnt der freundlichen nichts und der aggressive erhält 5. Welche Strategie sollte gewählt werden?

Interessanterweise hängt es von der Vorschichte ab, d.h. wie oft das Spiel gespielt wird. Wenn das Spiel nur einmal gespielt wird, ist die Antwort ziemlich klar: man spielt aggressiv. Im Mittel wird man (1+5)/2=3 gewinnen. Freundlich zu spielen ist gefährlich mit einem Erwartungswert von (3+0)/2=1.5.

Ist es also ein langweiliges Spiel?

Das Gefangenen-Dilemma

Auszahlungs Matrix V		Spieler B	
			
Spieler A		1	5
		0	3

Die Situation ändert sich allerdings, wenn man das Spiel mehrfach zwischen den gleichen Spielern spielt.

Robert Axelrod hat einen Wettbewerb initiiert, in dem Computerprogramme das Gefangenen-Dilemma mehrfach spielten. Nach zwei Wettbewerben setzte sich eine recht einfache Strategie gegen komplexe Mitbewerber durch. Es hatte den Namen "**TIT for TAT**" ("wie du mir, so ich dir").

www.brembs.net/ipd/ipd.html
Axelrod, R. (1981). Science, 211(4489):1390-6

TIT for TAT ist sehr einfach. Es fängt mit einem riskanten Zug an und spielt freundlich. In allen nachfolgenden Runden kopiert es die Strategie des anderen Spielers im letzten Zug. Das bedeutet, TIT for TAT spielt freundlich, wenn der Gegenspieler dies das letzte mal gemacht hat und aggressiv, wenn der andere Spieler zuvor aggressiv spielte.

Axelrod argumentierte anthropomorph, daß diese Strategie **"nett", "provozierbar" und "verzeihend"** ist. "Nett", weil sie mit einem freundlichen Zug anfängt, "provozierbar", weil sie sehr schnell auf eine permanent aggressive Strategie reagieren kann und - gleichermaßen wichtig - "verzeihend", weil sie auf einen Umschwung auf "freundlich" selbst sofort wieder "freundlich" reagiert.

Im Falle des Gefangenen-Dilemmas ist es also zum einen wichtig, sich den Spieler und seinen letzten Zug zu merken, wenn man ihn wieder antrifft. **Gedächtnis** ist also wichtig, um eine erfolgreiche Strategie zu stabilisieren.

Wir wollen die Stabilität von Spielstrategien in Populationen im folgenden genauer ansehen.

Das Gefangenen-Dilemma

Update: en.wikipedia.org/wiki/Prisoners_dilemma

Although Tit-for-Tat is considered to be the most robust basic strategy, a team from Southampton University in England (led by Professor Nicholas Jennings) introduced a new strategy at the 20th-anniversary Iterated Prisoner's Dilemma competition, which proved to be more successful than Tit-for-Tat. This strategy relied on cooperation between programs to achieve the highest number of points for a single program. The University submitted 60 programs to the competition, which were **designed to recognize each other** through a series of five to ten moves at the start. Once this recognition was made, **one program would always cooperate and the other would always defect**, assuring the maximum number of points for the defector. If the program realized that it was playing a non-Southampton player, it would continuously defect in an attempt to minimize the score of the competing program. As a result, this strategy ended up taking the top three positions in the competition, as well as a number of positions towards the bottom.

See: http://www.prisoners-dilemma.com/results/cec04/ipd_cec04_full_run.html

Häufigkeitsabhängige Selektion: Evolutionär stabile Strategie (ESS)

Evolutionär stabile Strategie (ESS):

"Eine Strategie, welche, wenn alle Mitglieder einer Population sie übernehmen, kein Mutant in die Population eindringen kann."
(John Maynard Smith)

Wir nehmen an, eine Population benutzt rein die Strategie p und die minoritäre Mutandenstrategie m hat sich gerade entwickelt. Die Strategie p bleibt stabil die Majoritätsstrategie, wenn sie einen höheren Auszahlungswert hat, wenn die Mutante gegen sie spielt: $V_{pp}>V_{mp}$.

Im Falle der Gleichheit ($V_{pp}=V_{mp}$) bleibt die Strategie stabil, wenn die Majorität im Spiel gegen sich selbst (V_{pp}) höhere Auszahlungen erzielt als wie die Mutante untereinander (V_{mm}).

Nota bene: Die Definition des ESS liegt sehr nahe an der Definition eines Nash-Gleichgewichts: $V_{pp}>=V_{mp}$. Nash erlaubt damit neutrale Minoritäts-Alternativen. Jedes ESS ist damit auch ein Nash-GG.

$$\boxed{\begin{array}{c} V_{pp} > V_{mp} \\ \text{or} \\ V_{pp} = V_{mp} \text{ and } V_{pm} > V_{mm} \end{array}}$$

$$V_{pp} < V_{mm}$$

Stabil versus Optimal

Solche Evolutionär stabile Strategien können möglicherweise schlechter sein, als eine gegen Mutationen instabile Strategie. Dies ist dann der Fall, wenn $V_{mm} > V_{pp}$, sich aber nicht gegenüber der Mehrheit durchsetzen kann ($V_{mp} < V_{pp}$).

Wir sehen das zum Beispiel beim Gefangenen-Dilemma. Hat sich als Majoritätsstrategie “permanent aggressiv” durchgesetzt (V=1), kommt eine freundliche Strategie (V=0) nicht dagegen an und die aggressive Strategie bleibt dominant.

Wenn von allen die freundliche Strategie benutzt würde, wäre der **Gewinn weit höher** (V=3). Allerdings würde dieser Zustand von einer **aggressiven Strategie (V=5) angegriffen** werden und auf permanent aggressiv (V=1) absinken.

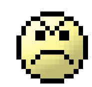
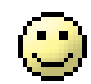
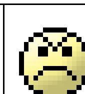
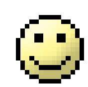
Allerdings: Wie gesehen, gibt es aber komplexere Strategien (TIT for TAT), welche dynamisch und mit Gedächtnis es erreichen, welche im Mittel sehr nahe an V=3 herankommen.

Ein Fall ohne Gedächtnis, wo wir Mischungen von Strategien auftreten, folgt im Falken-Tauben Spiel.

$$\boxed{\begin{gathered} V_{pp} > V_{mp} \\ \text{or} \\ V_{pp} = V_{mp} \text{ and } V_{pm} > V_{mm} \end{gathered}}$$

$$V_{pp} < V_{mm}$$

Example: Prisoner Dilemma

Payoff Matrix V		Player B	
			
Player A		1	5
		0	3

Häufigkeitsabhängige Selektion:
Das Falken-Tauben Spiel

Auszahlungs Matrix V		Spieler B	
		F	T
Spieler A	F	(V-C)/2	V
	T	0	V/2

$$V_{pp} > V_{mp}$$

$$\text{or}$$

$$V_{pp} = V_{mp} \text{ and } V_{pm} > V_{mm}$$

Im Kampf um eine Ressource benutzen zwei Gegner zwei typische Strategien.

- **Strategie “Falke”** kämpft bis er verletzt wird oder der Gegner sich zurückzieht.
- **Strategie “Taube”** zieht sich zurück, wenn der Gegner anfängt zu kämpfen.

Wir parametrisieren die Auszahlungsmatrix mit den Parametern **V für den Wert der Ressource** und **C für die Kosten der Verletzung**. Damit ergibt sich die Matrix links.

Unten sind die Bedingungen für eine evolutionär stabile Strategie nochmals aufgeführt.

Wenn alle “Taube” anwenden, gewinnt jeder V/2 und ein Falke kann immer mit der Auszahlung V sich in der Population durchsetzen. Strategie “Taube” allein ist kein ESS.

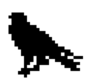
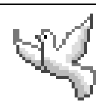
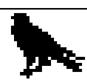
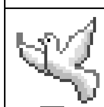
Wenn alle “Falken” anwenden, kann die Taube sich durchsetzen wenn der Kampf zwischen Falken (V-C)/2 < 0. Wenn die **Ressource wertvoller als die Verletzung** ist, setzt sich “Falke” in der Population durch.

Der wahrscheinlich häufige Fall, wenn C>V ist, also sich die Verletzung nicht direkt lohnt erscheint also interessant, da direkt kein ESS ablesbar ist.

Davis, Spieltheorie für Nichtmathematiker
en.wikipedia.org/wiki/Hawk-dove_game
Maynard Smith, J. (1982) Evolution and the Theory of Games.

Übergang zur Populationsdynamik
Das Falken-Tauben Spiel

$$\begin{aligned} W(F) &= W_0 + pV(F,F) + (1-p)V(F,T) \\ W(T) &= W_0 + pV(T,F) + (1-p)V(T,T) \\ p(t+1) &= p(t)W(F)/\overline{W} \\ \overline{W} &= pW(F) + (1-p)W(T) \end{aligned}$$

Auszahlungs Matrix V		Spieler B	
		F 	T 
Spieler A	 F	(V-C)/2	V
	 T	0	V/2

Um den Fall V<C zu studieren, ist es vernünftig, den Übergang zur Populationsdynamik zu vollziehen.

Wir machen den **Übergang von Matrixspielen** hin zur **Populationsdynamik**, wie von Maynard Smith vorgeschlagen:

1. Die Wahrscheinlichkeit p gibt an, wie oft von die Strategie “Falke” angewandt wird.
2. Die Fitness W einer Strategie ist durch die Auszahlungen der Spiele gegeben...
3. ... und determiniert linear die zeitliche Dynamik einer Strategie.

Links aufgeführt die Fitness der Strategie Falke W(F) und der Strategie Taube W(T) mit einer unerheblichen, grundlegenden Fitness W_0.

Diese Fitness W gibt an, wie die Strategie sich zeitlich ausbreitet. Diese **Evolutionsgleichung** wird auch “Replicator” Gleichung genannt, da Gleichungen ähnlicher Form die Dynamik von Populationen beschreibt (z.B. Räuber-Beute Verhalten). Es ergibt sich hier also zwanglos ein **Übergang zwischen Spieltheorie und Populationsdynamik**.

Gemischte Population als ESS

Das Falken-Tauben Spiel

$$W(F) = W_0 + pV(F,F) + (1-p)V(F,T)$$

$$W(T) = W_0 + pV(T,F) + (1-p)V(T,T)$$

$$p(t+1) = p(t)W(F)/\overline{W}$$

$$\overline{W} = pW(F) + (1-p)W(T)$$

Wir untersuchen auf Fixpunkte der Dynamik:

$$p(t+1) = p(t)$$

$$W(F) = \overline{W} = pW(F) + (1-p)W(T)$$

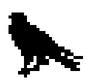
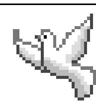
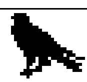
Dies gilt also, wenn die Fitness der beiden Strategien gleich sind.

$$W(F) = W(T)$$

$$p(V-C)/2 + (1-p)V = (1-p)V/2$$

$$p = V/C$$

Setzen wir die Matrixelemente ein, folgt daß die Relation der Auszahlung bei Verletzung zu der Auszahlung der Ressource die Wahrscheinlichkeit p angibt, die Strategie Falke zu spielen.

Auszahlungs Matrix V		Spieler B	
		F 	T 
Spieler A	 F	(V-C)/2	V
	 T	0	V/2

Bei **ansteigendem Wert der Ressource V** gegenüber des **Verlusts durch Verletzung C** steigt die Wahrscheinlichkeit an, **die Falkenstrategie anzuwenden**.

Gemischte Population als ESS

Das Falken-Tauben Spiel

$$W(F) = W_0 + pV(F,F) + (1-p)V(F,T)$$

$$W(T) = W_0 + pV(T,F) + (1-p)V(T,T)$$

$$p(t+1) = p(t)W(F)/\overline{W}$$

$$\overline{W} = pW(F) + (1-p)W(T)$$

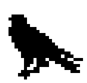
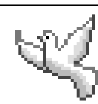
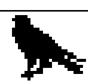
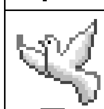
$$p(t+1) = p(t)$$

$$W(F) = \overline{W} = pW(F) + (1-p)W(T)$$

$$W(F) = W(T)$$

$$p(V-C)/2 + (1-p)V = (1-p)V/2$$

$$p = V/C$$

Auszahlungs Matrix V		Spieler B	
		F 	T 
Spieler A	 F	(V-C)/2	V
	 T	0	V/2

Wir müssen noch nachweisen, ob diese gemischte Strategie sich durchsetzen kann gegenüber den den reinen Strategie Falke

$$V_{IF} > V_{FF}$$

$$V_{IF} = p(V-C)/2 > (V-C)/2 = V_{FF}$$

oder der reinen Strategie Taube

$$V_{IT} > V_{TT}$$

$$V_{IT} = pV + (1-p)V/2 > V/2 = V_{TT}$$

was beides der Fall ist. Damit ist die gemischte Strategie ein ESS. Offen bleibt, ob wir zwei Spezies mit festgelegter Strategie haben, oder ob eine Spezies mit einer Wahrscheinlichkeit p zwischen den Strategien “Falke” oder “Tauben” wählt.

Nota bene: Das Antreffen solcher gemischter Strategien war aus dem Nash-Gleichgewicht zu erwarten gewesen.

Ausblick: Spieltheorie in der Ökonomie

Anwendbarkeit. Man könnte erwarten, daß Spielgleichgewichte vorhersagen, wie sich menschliche Populationen verhalten. Allerdings zeigen Spielexperimente, daß dies unter bestimmten Umständen nicht zutrifft. Zum Beispiel neigen Menschen dazu, den nicht rational zu handeln oder sie verhalten sich oft zum Wohle einer Gruppe.

Abweichungen ergeben sich insbesondere, wenn das Nash-Gleichgewicht das Gleichheitsempfinden verletzen, Menschen nicht der Spieltheorie folgen (Diktator Spiel) oder das Nash-Equilibrium nicht vollends rational bestimmt wird (Centipede Spiel, guess-2/3-of-the-average Spiel).

Ähnlich wie die Sprache dem Menschen mit einer gewissen Struktur angelegt ist, scheint es zu sein, daß auch das ökonomische Verhalten gewissen "**Vorurteilen**" folgt. Diese aufzudecken ist die Motivation für Spielexperimente über kulturelle Grenzen hinweg.

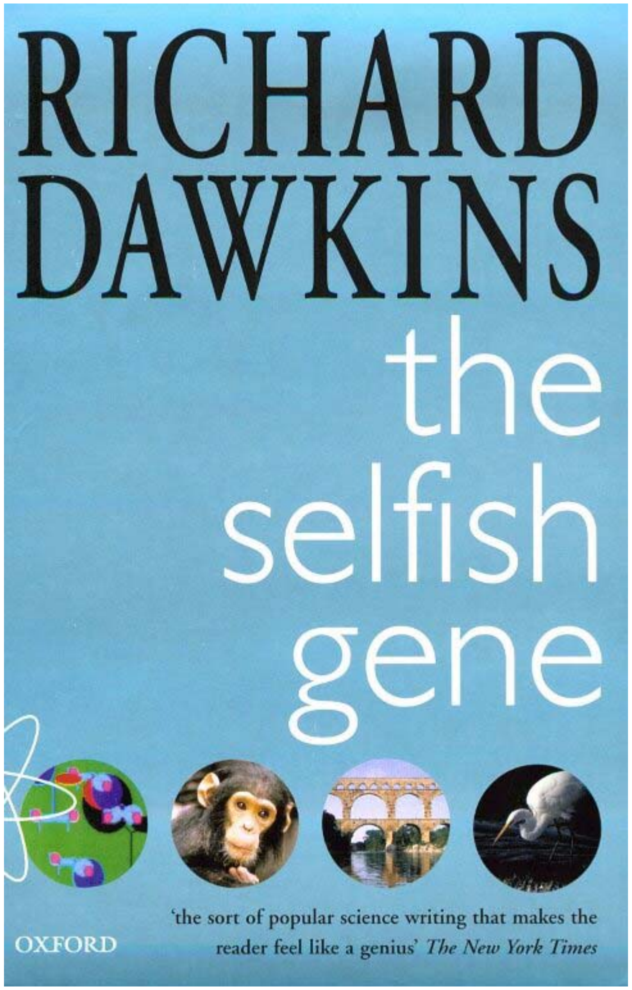
Spiele bei denen **Informationen** nur teilweise oder asymmetrisch offenliegen sind eine weitere wichtige Subklasse der Spieltheorie.

Es ist zu vermuten, daß Geld und Strafen es erlauben, **bessere Strategiefelder zu nutzen**, ähnlich wie Spielstrategien mit Gedächtnis ansonsten instabile Lösungen erreichbar machen (s. TIT for TAT).

Geld spielt in der Ökonomie die Rolle eines sehr simplen zeitlichen **Gedächtnisses** und erlaubt komplexe Spielstrategien über die Zeit.

Spieltheorie zeigt auch, daß egoistische Individuen auch **kooperative Strategien** entwickeln können. Diese Idee wurde von Richard Dawkins in der Biologie auf die Spitze getrieben:

Ausblick: Das egoistische Gen



Basierend auf Arbeiten von George Williams und William Hamilton benutzte Richard Dawkins den antropomorphen Begriff des “egoistischen gens” um Ergebnisse der Biologie zusammenzufassen, in denen Gene, nicht Lebewesen gegeneinander kämpfen: "A chicken is just an egg's way of making more eggs.".

Das Lebewesen ist nur ein Vehikel, um das Gen zu replizieren: *"Replicators began not merely to exist, but to construct for themselves containers, vehicles for their continued existence. The replicators that survived were the ones that built survival machines for themselves to live in."*

Der Begriff des egoistischen Gens ist prägnant, es wurde aber argumentiert, man solle es ersetzen durch “die Eigenschaft, von einem Darwinschen Selektionsprozess copiert zu werden” (Andrew Brown).

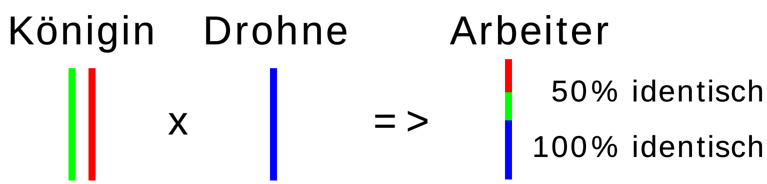
Da die erste Auflage (1976) noch keine Ergebnisse über kooperative Strategien beinhaltete, wurde es auch für sein einfaches Verständnis von “egoistisch” kritisiert und verstanden als Angriff die Gesellschaft aus der Evolutionsbiologie.

Zwei Beispiele, welche den Standpunkt Dawkins unterstützen.

Ausblick: Das egoistische Gen

“Soziale” Ameisen

Die Arbeiter der meisten sozialen Insekten haben einen **einfachen Gensatz** im Gegensatz zur Königin mit diploiden Genen. Damit sind sie zu 75% miteinander verwandt, wären aber nur 50% verwandt mit ihren eigenen Kindern:



Aus Sicht des egoistischen Gens macht es also Sinn, seinen “**Superschwestern**” zu helfen, um seine eigenen Gene voranzubringen, als eigene Kinder zu zeugen. Ameisen sind selbstlos eben wegen den egoistischen Genen.

Diese Phänomen wird Eusozialität genannt, wenn also eine besondere “Kaste” die Reproduktion übernimmt und von nichtreproduzierenden Tieren dabei unterstützt werden. [’Ausnahmen bestätigen die Regel’: Termiten].

Der egoistische Embryo

Der Fötus teilt nur 50% der mütterlichen Gene. David Haig hat gefunden, daß sich der Fötus und die Placenta eher wie ein **interner Parasit** verhält als wie ein Freund:

Der Fötus zerstört Muskelzellen, welche die zentralen Arterien zum Fötus kontrolliert.

Der Fötus emittiert auch Hormone zum Anstieg des Blutdrucks um so viel Blut als möglich für sich abzuzweigen.

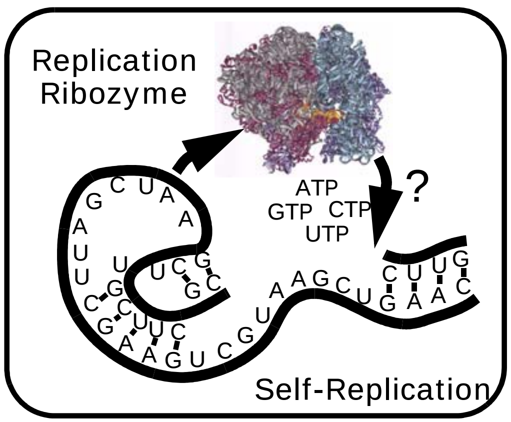
Ein ähnlicher Hormonkampf findet um den Blutzuckerspiegel statt.

Die Beziehung Mutter-Fötus scheint also nicht pure Liebe und gegenseitige Hilfe zu sein - erklärbar durch das “egoistische” Gen des Fötus, welches **nur zur Hälfte die gleiche Interessenslage** wie die Mutter hat.

Ausblick: Zellbiologie, Evolution & Physik

Wenn das Verhalten von Lebewesen Anzeichen der Spieltheorie zeigen, ist eigentlich auch zu erwarten, ähnliche Komplexität bei **einzelnen Zellen** zu finden - sei es bei Bakterien oder den vielen Zelltypen eines Säugetiers wie uns. Die **Systembiologie** wird mit Sicherheit noch auf die Spieltheorie zurückkommen.

$$\dot{n}_i = (k_{pi}q_i - k_{mi})n_i + \sum_{i \neq j} k_{m,ji}n_j$$



RNA
World

Evolutionsgleichung:
Die Zahl der Moleküle n_i mit Basensequenz i, auch Spezies genannt werden folgender _linearer_ Populationsdynamik unterworfen :

k_{pi} Fortpflanzungsgeschwindigkeit, d.h. die Fähigkeit zur Selbstreplikation
k_{mi} Sterblichkeit
$q_i<1$ Replikationsgenauigkeit
$k_{m,ji}$ Wahrscheinlichkeit der Mutation von Spezies j nach i.

Angefangen haben muß das heutige Leben mit einfachen, **replizierenden Molekülen**. Ein Standardmodell dieser Situation ist das Eigen Modell (s. oben), motiviert aus linearen chemischen Ratengleichungen. Wie wir jetzt gesehen haben - und wie Eigen es auch in den Hyperzyklen angedeutet hat - ist es sehr interessant, die komplexeren Spiele zwischen den Molekülspezies zu analysieren. Deren Spiele sind sicher ungleich komplexer gewesen.

Game Theory Comments

Stephen Jay Gould:
“One day, at the New York World’s Fair in 1964, I entered the Hall of Free Enterprise to escape the rain. Inside, prominently displayed, was an ant colony bearing the sign: ’**Twenty million years of evolutionary stagnation. Why? Because the ant colony is a socialist, totalitarian system.**”

A **society with memory** and ways to **punish** its members can very well **enforce an evolutionary unstable strategy with higher profit** for all its participants.

In this sense, **memory-enabled and state-supporting human beings** can be superior to a **state-less fully competing pool of individuals**.

Note that **money** is a very important **memory element** in modern societies.

We probably have to **adjust our meaning of “egoistic”** along the lines of game theory. In such a sense, **really egoistic societies** might **not at all look like egoistic societies** in the popular meaning of the word.

Concerning **molecular evolution**, we are only at the beginning of harvesting the **evolutionary scope of game theory**. It is not improbable that we find imprints if **game theory even down to the molecular level**. Proteins and DNA most probably play a very intricate and complex game. **Life might be indeed the game of selfish genes.**