

# **Strategisches Umweltverhalten**

—

## **Beiträge von Kybernetik und Spieltheorie zur Modellierung umweltökonomischer Fragestellungen**

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Rainer Berkemer

aus Metzingen

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. pol., habil. Ing. Thomas Fischer

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Arnold Kistner

Tag der mündlichen Prüfung 6. September 2007

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf

2007

## **Vorwort des Autors**

Herrn Prof. Dr. Thomas Fischer schulde ich aufrichtigen Dank für die Betreuung meiner Arbeit. Es war entscheidend für den erfolgreichen Abschluss, dass ich mich jederzeit auf die notwendige Unterstützung verlassen konnte. Auch für seine Bereitschaft mir inhaltlich großzügigen Freiraum einzuräumen will ich mich gerne bedanken.

Herrn Prof. Dr. Arnold Kistner danke ich für das Interesse an meiner Arbeit, für seine Diskussionsbereitschaft sowie die Bereitschaft zur Übernahme des Mitberichts.

An der Durchsicht wesentlicher Teile der Arbeit waren viele meiner Freunde beteiligt. Einerseits wollte ich den meisten nicht das Lesen der ganzen Arbeit zumuten. Andererseits gibt mir dies nun die Gelegenheit sie alle zu erwähnen. Dank für wertvolle Hinweise haben also:

Dr. Marie-Christine Alengrin, Karin Berkemer, Christoph Brauckmann, Dr. Ulrich Hägele, Steffen Kohler, Steffi Michel, Dr. Esfandiar Tabari, Michael Tscharotschkin, Prof. Jens Starke, Anja und Jochen Wiedmann und Dr. Marcus Winkler.

Dr. Bruce Allen danke ich für die gewissenhafte Kontrolle der englischen Zusammenfassung.

Meinen Eltern danke ich sowohl für die Finanzierung des Diplomstudiums als auch für ihre geduldige Unterstützung während der Promotionsphase.

Kopenhagen, im Oktober 2007

Rainer Berkemer

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>1</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>6</b>
<b>Summary</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>13</b>
1.1 Ein Beispiel für strategisches Verhalten .....	13
1.2 Bezug zur Kybernetik .....	13
1.3 Gang der Untersuchung.....	15
<b>2 Spieltheorie und Kybernetik</b> .....	<b>17</b>
2.1 Motivation .....	17
2.2 Informations- und Rationalitätsanforderungen der klassischen Spieltheorie.....	20
2.2.1 Instrumentelle Rationalität.....	20
2.2.2 Common Knowledge of Rationality .....	22
2.2.3 Konzept des Nash-Gleichgewichts .....	25
2.3 Kritik der klassischen Spieltheorie.....	28
2.3.1 Politische Kybernetik.....	28
2.3.2 Dezentrale Verteilung von Information .....	31
2.3.3 Konzept der begrenzten Rationalität.....	32
2.4 Grundzüge der Evolutionären Spieltheorie .....	34
2.4.1 Evolutionsstabile Strategien .....	34
2.4.2 Replikatorgleichung.....	36
2.5 Bewertung aus kybernetischer Sicht .....	38

<b>3</b>	<b>Umweltökonomische Grundlagen.....</b>	<b>41</b>
3.1	Öffentliche Güter und externe Effekte.....	41
3.1.1	Externe Effekte und Pareto-Effizienz.....	41
3.1.2	Formen öffentlicher Güter.....	43
3.2	PIGOU-COASE-Kontroverse.....	45
3.3	Umweltprobleme als Kooperationsproblem.....	47
3.3.1	Evolution der Kooperation.....	48
3.3.2	<i>n</i> -Personen-Dilemmata.....	52
3.4	Kritik an der neoklassischen Umweltökonomie.....	56
<b>4</b>	<b>Konzipierung des agentenbasierten Simulationsmodells.....</b>	<b>58</b>
4.1	Anforderungskatalog.....	58
4.2	Modellierung der Problemstrukturen.....	59
4.2.1	Spielstrukturen und Entscheidungssituationen.....	59
4.2.2	Entscheidungsträger.....	63
4.2.3	Aktionen und Strategien.....	65
4.2.4	Weitere Konzepte der Strukturierung.....	66
4.3	Modellierung des Evolutionsprozesses.....	67
4.3.1	Populationen und Matching Prozeduren.....	67
4.3.2	Imitationsmodelle.....	68
4.4	Generelles Ablaufschema der agentenbasierten Simulation.....	71
<b>5</b>	<b>Optimale Kontrollfrequenz von Umweltauflagen.....</b>	<b>75</b>
5.1	Grundmodell des Inspektionsspiels.....	75
5.2	Simulationsergebnisse.....	77
5.3	Modellerweiterungen.....	79
5.4	Analytische Nachbetrachtung.....	81

5.4.1	Verallgemeinerung.....	81
5.4.2	Bezug zur Populationsdynamik von Räuber-Beute-Systemen .....	82
5.5	Sensitivitätsanalyse .....	86
5.5.1	Anzahl der Populationen und Populationsgröße.....	86
5.5.2	Anzahl der Simulationsperioden und Anpassungsrate .....	87
5.5.3	Initialisierung der Strategien.....	87
5.6	Praxisrelevanz und methodische Schlussfolgerung .....	89
5.6.1	Schwankungen als praxisrelevantes Verhalten? .....	89
5.6.2	Methodische Schlussfolgerungen .....	90
<b>6</b>	<b>Strategisches Verhalten bei der Finanzierung einer Kläranlage .....</b>	<b>91</b>
6.1	Formale Darstellung des Grundproblems .....	91
6.2	Bezug des Grundproblems zum Coase-Theorem.....	93
6.3	Anpassungen des Simulationsmodells .....	101
6.3.1	Initialisierungsschritte.....	102
6.3.2	Simulationsschleife.....	104
6.3.3	Sampling Dynamik als Adaptionenverfahren .....	105
6.4	Spontane Organisation .....	109
6.4.1	Ergebnis für den homogenen 3-Spieler-Fall.....	109
6.4.2	Größeneffekte – Einfluss der Spieleranzahl n .....	115
6.4.3	Auswirkungen der Heterogenität .....	120
6.4.4	Sensitivitätsanalyse.....	123
6.4.5	Zwischenfazit.....	126
6.5	Mechanismus-Design und Mechanismus-Simulation.....	127
6.5.1	GROVES-Schemata .....	128
6.5.2	Mechanismus von ROB .....	134
6.5.3	Entwicklung neuer Mechanismen mit Simulationsunterstützung .....	137

<b>7 Zusammenfassende Schlussbetrachtung.....</b>	<b>145</b>
7.1 Generelle Bedeutung der richtigen Bewertung von öffentlichen Gütern .....	145
7.2 Beitrag der Arbeit zur Analyse strategisch motivierten Verhaltens .....	147
7.3 Typische Fallstricke bei strategischer Interdependenz .....	150
7.3.1 Fragwürdige Nützlichkeit zusätzlicher Information.....	150
7.3.2 Potentielle Schädlichkeit zusätzlicher Handlungsoptionen.....	151
7.4 Resümee.....	152
<b>Anhänge .....</b>	<b>154</b>
Anhang 1: Das Softwaretool GAMBIT.....	154
Anhang 2: Weitere Einsatzgebiete des Simulationstools .....	156
Anhang 3: Fischzüchterbeispiel am Fluss .....	159
Anhang 4: Funktionsweise des Pivot-Mechanismus bei binärer Projektentscheidung .....	161
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>164</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Struktur der Arbeit.....	16
Abbildung 2-1: Das Wohngemeinschaftsdilemma .....	18
Abbildung 3-1: Formen öffentlicher Güter .....	44
Abbildung 3-2: Prinzip der Pigou-Steuer.....	46
Abbildung 3-3: Das Gefangenendilemma als Basisspiel .....	48
Abbildung 3-4: Mögliche Spielfolge bei einem iterierten Gefangenendilemma .....	49
Abbildung 4-1: Spielstruktur mit einem öffentlichen Gut .....	60
Abbildung 4-2: Spielstruktur mit mehreren öffentlichen Gütern.....	61
Abbildung 4-3: Ein Agent interagiert in einer Umwelt von Gütern. ....	64
Abbildung 4-4: GRIM und Tit-for-Tat als Moore-Automaten .....	66
Abbildung 4-5: Torus als Konzept zur Realisierung periodischer Randbedingungen.....	67
Abbildung 5-1: Das Inspektionsspiel [Original nach Burger (1994)].....	75
Abbildung 5-2: Simulationsergebnis Inspektionsspiel [Driftparameter = 0].....	78
Abbildung 5-3: Simulationsergebnis Inspektionsspiel [Driftparameter = 0,01].....	78
Abbildung 5-4: Das verschärfte Inspektionsspiel [mit Abweichungspfeildiagramm].....	79
Abbildung 5-5: Simulationsergebnis für die Intervention des Gesetzgebers.....	80
Abbildung 5-6: Das verallgemeinerte Inspektionsspiel .....	81
Abbildung 5-7: Trajektorien für die beiden unterschiedlichen Strafreime .....	88
Abbildung 6-1: Die reduzierte Spielstruktur für das homogene 3-Spieler-Beispiel .....	112
Abbildung 6-2: Simulationsergebnis für drei Fischzüchter und homogene Nutzenverteilung...	114
Abbildung 6-3: Relative Schwächung von Übertreibungsstrategien .....	119
Abbildung 6-4: Diskriminierungsprozess innerhalb der Untertreibungsstrategien.....	121
Abbildung 6-5: Individuelle Strategiewahl in der letzten Simulationsperiode .....	121
Abbildung 6-6: Aufteilung der Gruppen auf die fünf Untertreibungsstrategien.....	122
Abbildung 6-7: GROVES-Mechanismus: Erfolg der einzigen dominanten Strategie .....	129
Abbildung 6-8: GROVES-Mechanismus: Performance der nächst besten Strategien .....	130

Abbildung 6-9: ROB-Mechanismus: Simulationsergebnis für $n=6$ , $m=5$ , $r=0,5$ , $k=3000$ .....	136
Abbildung 6-10: Spannungsdreieck des Mechanismus-Design.....	144
Abbildung 7-1: Umwandlung der Spielstruktur durch Mechanismus-Design.....	149
Abbildung A-1: Eingabe des Inspektionsspiels mit Hilfe von GAMBIT.....	155
Abbildung A-2: Wechsel der Auszahlungswerte für das Inspektionsspiel (Strafverschärfung)	155
Abbildung A-3: Eingabe eines extensiven Spiels mit Hilfe von GAMBIT.....	160
Abbildung A-4: Die strategische Normalform für das Beispiel mit Pipeline-Option.....	160



## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Der reziproke Charakter des Fischzüchterproblems.....	99
<b>Tabelle 2a:</b> Ergebnisse nPBS für $n = 3, r = 0,5$ .....	117
<b>Tabelle 2b:</b> Ergebnisse nPBS für $n = 6, r = 0,5$ .....	117
<b>Tabelle 2c:</b> Ergebnisse nPBS für $n = 12, r = 0,5$ .....	117
<b>Tabelle 2d:</b> Ergebnisse nPBS für $n = 24, r = 0,5$ .....	118

## Abkürzungsverzeichnis

AK	Anreizkompatibilität
bzgl.	bezüglich
C	Kooperation [Cooperation – Aktion im Gefangenendilemma]
ca.	circa
CALTECH	California Institute of Technology
CKR	Common Knowledge of Rationality [Gemeinsames Vorwissen]
CV	Contingent Valuation [kontingente Bewertungsmethode]
D	Nicht-Kooperation [Defection – Aktion im Gefangenendilemma]
d. h.	das heißt
DRM	Demand Revealing Mechanism
durchschn.	durchschnittlich
EPE	Ex-Post-Effizienz
ESS	evolutionsstabile Strategie
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
f	und folgende Seite
ff	und folgende Seiten
FAZ	Frankfurter Allgemeine Zeitung
GAMBIT	Softwaretool entwickelt am CALTECH [siehe Anhang]
ggfs.	gegebenenfalls
hrsg.	herausgegeben
Hrsg.	Herausgeber
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
insb.	insbesondere
IR	Individuelle Rationalität
KFZ	Kraftfahrzeug
Mass.	Massachusetts

NE	Nutzeneinheiten
NPD	N-Personen-Gefangenendilemma
nPBS	naives proportionales Beitragsschema
mPBS	modifiziertes proportionales Beitragsschema
PBS	Proportionales Beitragsschema
PIVOT	Pivotal Mechanism [auch CLARKE-GROVES-Mechanismus]
PKW	Personenkraftwagen
RANDOM	[eine Strategie der zufälligen Kooperation]
TFT	Tit-for-Tat [eine Strategie der bedingten Kooperation]
TGF	Transport and Granular Flow
UK	United Kingdom
vgl.	vergleiche
WEHIA	Workshop on Economics and Heterogeneous Interacting Agents
z. B.	zum Beispiel
ZDF	Zweites Deutsches Fernsehen
zit.	zitiert

## Kurzfassung

Umweltprobleme sind oft durch eine Vielzahl von Beteiligten gekennzeichnet, die sich in ihrem Verhalten gegenseitig beeinflussen. Beispielhaft kann hier die Situation des Straßenverkehrs in einer Großstadt benannt werden. Wenn *ganz* viele Akteure betrachtet werden, verringert sich aber wieder die Relevanz des strategischen Aspekts, denn dann genügt häufig die Kenntnis des durchschnittlichen Verhaltens. Am interessantesten sind also Fälle, bei denen viele, aber nicht ganz viele, betroffen sind – und (damit komplex genug) mehr als zwei Beteiligte vorhanden sind.

Deshalb wird als einleitendes Beispiel eine Situation mit *drei* Fischzüchtern vorgestellt, die sich zu ihrem gemeinsamen Vorteil auf die Errichtung einer Kläranlage verständigen könnten. Das Konzept des *strategischen Verhaltens* wird dann eingeführt, um zu zeigen, dass die Finanzierung häufig scheitern wird, weil die Akteure *private Information* strategisch motiviert zurückhalten. Ein solches Verhalten ist individuell rational, führt aber kollektiv betrachtet zu ineffizienten Resultaten. Solche Situationen werden allgemein als „*social dilemmas*“ bezeichnet, und viele Umweltprobleme haben eine solche Struktur. Zweck der Arbeit ist es, ein Simulationstool zu entwickeln, das zur Untersuchung von Sozialen Dilemmata geeignet ist.

Zwei Grundlagenkapitel (zu Spieltheorie und Umweltökonomie) beschreiben zunächst die benötigten Begriffe und Konzepte. Das Kapitel zur Spieltheorie beschreibt kritisch die Rationalitätsanforderungen der traditionellen Spieltheorie. Außerdem werden die Grundzüge der *evolutionären Spieltheorie* beschrieben. Das Kapitel zur Umweltökonomie definiert verwendete Begriffe, etwa öffentliche Güter, externe Effekte, Pareto-Effizienz und Coase Theorem.

Im 4. Kapitel findet die Konzipierung des Simulationstools statt. Ausgehend von den Grundlagenkapiteln wird zunächst ein Anforderungskatalog abgeleitet. Dann findet eine Modellierung der Problemstrukturen statt, wobei öffentliche Güter mit ihren Zustandsvariablen im Mittelpunkt stehen. Eine Modellierung der Prozessgesichtspunkte sowie das generelle Ablaufschema der Simulation schließen dieses Kapitel ab.

Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit zwei Anwendungsbeispielen (Kapitel 5 und 6).

Der erste Anwendungsfall (Optimale Kontrollfrequenz von Umweltauflagen) ist ein einfaches Zwei-Personenspiel, das sich daher gut eignet, um die Vorgehensweise beim Einsatz des Simulationstools zu demonstrieren. Das aus der umweltpolitischen Literatur bekannte

Inspektionsspiel besitzt nur ein gemischtes Nash-Gleichgewicht, das leicht berechnet werden kann. Die Simulationsergebnisse zeigen aber, dass eine solche statische Betrachtung nicht ausreicht. Der dynamische Prozess weist starke Fluktuationen auf, was bedeutet, dass die Verschmutzungswerte phasenweise erheblich über dem berechneten Wert liegen. Des Weiteren wird eine mögliche Intervention des Gesetzgebers in die Spielstruktur untersucht. Dabei kommt es zu scheinbar paradoxen Effekten, weil ein dauerhaftes Absenken der Umweltverschmutzung so nicht erreicht wird. Mit Hilfe einer analytischen Nachbetrachtung werden die Simulationsergebnisse plausibel gemacht. Dabei kann auch die Analogie zur Lotka-Volterra-Gleichung aus der Populationsökologie gezeigt werden.

Die eigentliche Herausforderung besteht beim zweiten Anwendungsfall (Strategisches Verhalten bei der Finanzierung einer Kläranlage). Hierzu wird das Beispiel aus der Einleitung wieder aufgegriffen und so verallgemeinert, dass eine beliebig große Anzahl von Fischzüchtern modelliert werden kann. Außerdem wird der Bezug zum Coase Theorem hergestellt. Mit der Simulation werden Größeneffekte (Anzahl der Spieler) sowie die Effekte heterogener Nutzenverteilung untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen von OLSON in seinem Buch „*The Logic of Collective Action*“ (Olson (1965)). Das Hauptproblem besteht darin, dass private Information strategisch eingesetzt werden kann und es deshalb zu verfälschten Nutzenangaben kommt. Dieses Problem wurde seit den 1970er Jahren erkannt und führte zu einem eigenen Theoriezweig „Mechanism Design“. Das Problem strategischer Falschangaben kann mit den dabei entwickelten Methoden zwar theoretisch vollständig gelöst werden, aber es bleibt unklar, wie stark die Funktionsweise der Mechanismen beeinträchtigt wird, wenn Abstriche von der Annahme vollständiger Rationalität gemacht werden. Zwei der aus der Literatur bekannten Mechanismen werden dazu mit Hilfe des Simulationsansatzes untersucht: Der Clarke-Groves-Mechanismus (auch „Pivotal Mechanism“) und der Mechanismus von Rob. In beiden Fällen kommt man zum Ergebnis, dass auch unter der Annahme *begrenzter Rationalität* die prinzipielle Funktionsweise erhalten bleibt. Je mehr Beteiligte aber involviert werden, umso schwieriger wird es zu lernen, dass sich Abweichungen von der wahren Nutzenangabe nicht lohnen. Für den Pivotal Mechanism gibt es hierzu auch experimentelle Untersuchungen, die sehr gut mit den vorgestellten Simulationsergebnissen übereinstimmen. Zusammenfassend kann aus den Anwendungsbeispielen gefolgert werden, dass mit Veränderungen der Spielstrukturen Eingriffe in dynamische Systeme verbunden sind und dass Situationen mit strategischer Interdependenz ihre besonderen Eigenarten haben. Spieltheorie und Kybernetik sollten zusammen zu einem Verständnis solcher Systeme beitragen.

## Summary

The thesis begins by illustrating what is meant by *strategic behaviour*. Consider three fish farmers living by a lake who have to decide whether to go ahead with jointly investing in a wastewater treatment plant. The plant requires an outlay of 210 units, but would keep a tight lid on toxins from a river inlet. Assume that each fish farmer would benefit on average by 100 units. Assume also that the exact valuation of the public good by a particular fish farmer is only known to him. As far as the valuations of the others is concerned, each may have a reasonable idea of what these are but cannot prove it.

We first consider the specific situation where each fish farmer will benefit by exactly 100 units—while each suspects the others benefit to the same extent, none is in a position to dispute a claim made by any of the others to the effect that he only benefits by, say, 50 units. Obviously, in such a situation there is an incentive for each fish farmer to understate his true benefit and to speculate that others' contributions will suffice anyway. Even though it is of mutual benefit for all to contribute an equal share of 70 units, it is quite doubtful if such agreement can be obtained.

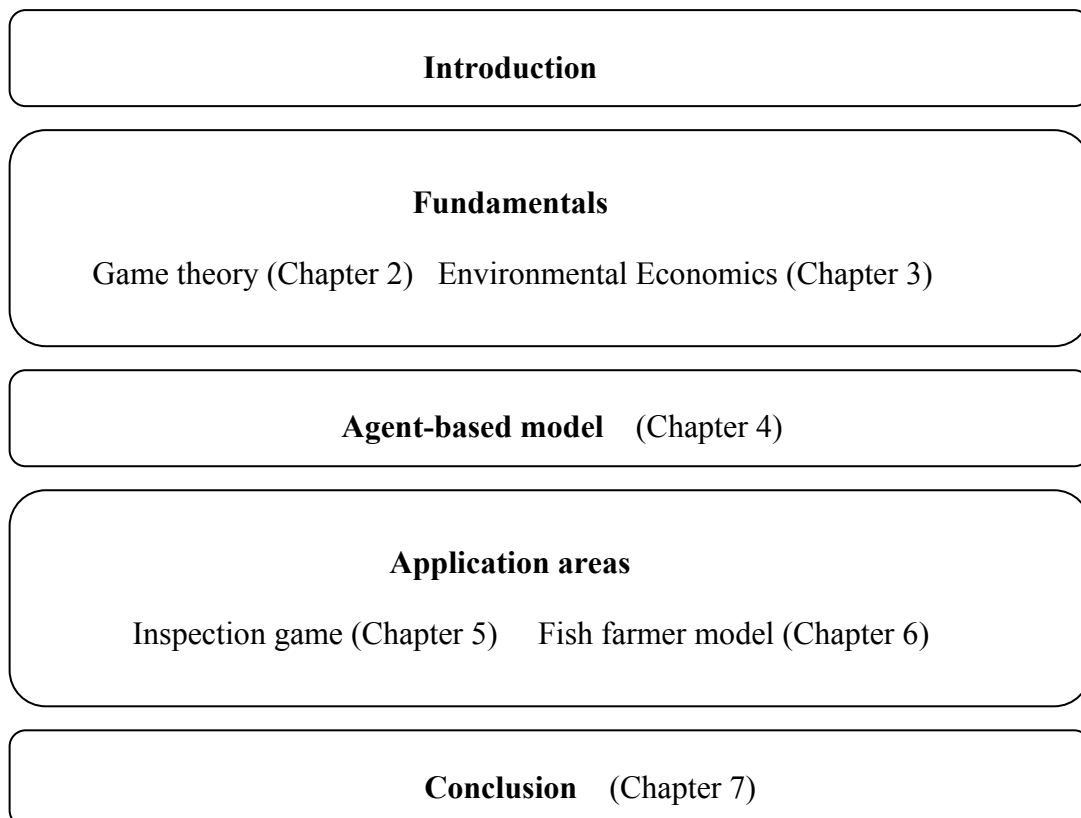
Chapter 6 contains a calculation (using a proportional contribution scheme). We shall now clarify this, before proceeding further, by referring to a particular result. The main result of our calculations is as follows: telling the truth may be a good recommendation - but if the other two do tell the *whole* truth, telling *half the truth* will then result in the best outcome for the third fish farmer. That is, truth-telling cannot be a Nash-equilibrium. We found several asymmetric Nash-equilibria where one of the fish farmers exploits the other two. Furthermore, there is one symmetric Nash-equilibrium in mixed strategies, whose outcome is that the mutually beneficial project fails with a probability of almost 50%. The first-best social surplus of 90 units (300-210) will then shrink to about 49.5 units - for details see Chapter 6.

This is just one instance where the provision of so-called *public goods* is uncertain. There is a vast literature on voluntary public goods provision in similar situations (often labelled *social dilemma* situations). The main lesson is that strategic behaviour in such situations has a high probability of causing inefficient solutions. Much of the literature is based on neoclassical economics, with its core assumption of a *homo oeconomicus* acting fully rationally in a well-defined environment.

This thesis investigates problems of public goods provision and social dilemmas, doing so within a broader context where we can additionally allow for *bounded rationality*. This is achieved by

deploying an agent-based simulation tool. Further, our simulations address the effects of increasing player numbers as well as the effects of heterogeneity.

Figure 1 gives an overview of how the thesis is structured. After introducing the problem of strategic behaviour, it is useful to summarise some fundamental principles from two areas (game theory and environmental economics). The agent-based model will then profit from the insights gained.



**Figure 1 Organization of the thesis**

In Chapter 2, we introduce some concepts from traditional non-cooperative game theory, e.g. dominant (dominated) strategies, Nash equilibrium, mixed equilibria. A motivational example (section 2.1) is used to establish the link between social dilemmas and environmental problems. Section 2.2 is a critical review of the rationality assumptions typifying the traditional game theory approach. Concepts like instrumental rationality and common knowledge of rationality (CKR) are explained. We demonstrate that these rationality requirements are even more demanding in the context of strategic interdependence than they are in the typical neoclassical approach, where such interdependence is usually neglected. One example using the concept of

iterated elimination of dominated strategies indicates possible pitfalls of the traditional approach, as does another example using the concept of backward induction. Often strange results are obtained that fly in the face of daily experience. In section 2.3, we confront the above-mentioned rationality assumptions with the reality of socio-economic systems. Our point of departure is the work of KARL WOLFGANG DEUTSCH (“*The Nerves of Government*” – in German “*Politische Kybernetik*”), who criticises the *static* game theory approach as based on the notion of equilibrium. Further, we stress that information is usually decentralised within a socio-economic system. Finally, we discuss the concept of bounded rationality as introduced by HERBERT ALEXANDER SIMON. Section 2.4 reviews the field of *evolutionary game theory*, explaining two of its core concepts: evolutionary stable strategies (ESS) and replicator dynamics. Section 2.5 evaluates which of the concepts discussed above lends itself best to the agent-based simulation approach.

By close of Chapter 2 we know which tools are available. Chapter 3 focuses on the problem types we wish to investigate. In section 3.1, we introduce basic notions of environmental economics such as external effects, public goods, Pareto efficiency, etc. The need for internalisation strategies will be obvious by now. In section 3.2, we briefly describe two of these internalisation strategies, namely the Pigou tax and the property rights approach. The latter approach is related to the Coase Theorem, which claims that agents may solve the problem through bilateral negotiations. Section 3.3 demonstrates that many environmental problems can be viewed as cooperation problems. We refer to AXELROD’s celebrated work (“*The Evolution of Cooperation*”) and venture some comments on the more general  $n$ -person dilemmas. Section 3.4 contains a critique of the neoclassical approach to environmental economics.

Chapter 4 treats the conceptual design of the agent-based simulation tool. From the foundational Chapters 2 and 3 we derive a list of requirements (section 4.1). Section 4.2 introduces the essential object classes for modelling the *problem structures*, the former being e.g. decision situations, decision makers, actions, and strategies. We highlight the advantage of transforming an original game model into a model where ultimately only *state variables* are relevant. More precisely, we define a class of public-good games in such a way that from the state of each (public) good it is possible to deduce whatever is going on in the simulations. Section 4.3 presents the modelling of an *evolutionary process*. Here the concepts of evolutionary game theory recur. Important classes are populations and matching procedures for assigning agents to decision situations. Moreover, we discuss methods whereby agents can adapt their behaviour.



We introduce, for instance, imitation models and briefly mention how they relate to the evolutionary concepts discussed in chapter 2. Section 4.4 sets out the general procedure by which a simulation run is performed.

Chapter 5 demonstrates on a simple two-player example how the simulation tool can be deployed. Section 5.1 introduces the so-called inspection game which has no equilibrium in pure strategies. Section 5.2 uses a concrete payoff scenario taken from BURGER (1994) to obtain a first simulation result. It turns out that a traditional approach is of limited usefulness for understanding dynamic behaviour. Even though the game has a unique Nash equilibrium (in mixed strategies), this equilibrium has almost no predictive power. We observe no convergence but instead significant fluctuations. In section 5.3, we extend the model and investigate potential interventions by the legislator, establishing that such interventions may have counterintuitive effects. Section 5.4 is taken up with analysing some of these findings. Further, a relationship to models drawn from population ecology is pinpointed. We demonstrate that Lotka-Volterra equations may be derived for specific parameter settings. This reconfirms the close connection between imitation models and the aforementioned replicator dynamics. Section 5.5 presents a sensitivity analysis and section 5.6 discusses similarities with the dynamic behaviour exhibited by some technical systems (e.g. oscillating circuits).

Chapter 6 resumes where we left off in the introductory example. So far the problem has involved just three fish farmers. Since it is of specific interest to investigate size effects (increasing player numbers) we first need a more general problem description, and this is provided in section 6.1. The formal description of the general model is related to the Coase Theorem in section 6.2. Section 6.3 outlines necessary adjustments to the simulation tool. Section 6.4 investigates if it is likely that the fish farmers can solve the problem on a voluntary basis. In other words: the question is if a spontaneous organisation of agents might result in a more or less efficient solution. Our results accord pretty well with suggestions made by Olson (1965). With a larger number of fish farmers, it is almost inevitable that the project will fail. In which case, the potential surplus will completely dissipate. On the other hand, some relief is found with increasing heterogeneity. Apart from the OLSON's work and our own simulations, these results were tabled in experiments by Chan et. al. (1998) (cf. also *The Elgar companion to public choice*, p. 500). In short, the overall findings for large and medium player numbers remain discouraging. As long as there is no way to curtail the tendency towards understatement, no improvement can be expected. Therefore we turn in section 6.5 to "mechanism design" and to

the simulation of suchlike mechanisms. Indeed, it was a great achievement in the 1970s when Clarke (1971), Groves (1973), and others found *incentive compatible mechanisms* for public goods provision. The crucial idea was to make the telling of one's true preference the dominant strategy for each participant. Green & Laffont (1977) managed to integrate these earlier studies, therefore we can say that from the 1970s the platform for the mechanism design approach was in place. However, this approach requires that someone defines the mechanism, i.e. a social planner or some auctioneer. We should not expect that any fish farmer will take such a position. By the following trick – introducing a firm – we can transform the fish farmers' problem into a mechanism-design task. By thus proceeding, we come close to an approach by Rob (1989), who treated one firm as a mechanism designer dealing with a number of residents. One important feature of the Rob mechanism is that it also satisfies the *individual rationality* condition, which was not the case with the aforementioned mechanism from the 1970s. One common problem of the Groves schemes, as well as the Rob mechanism and indeed most other mechanisms, is that they induce a truth-telling equilibrium only *in theory*. Moreover, the compensation (or tax) schemes are often quite complicated. Thus it does not surprise to find that *in experiments* subjects often fail to find these equilibria. Kawagoe & Mori (1999) demonstrate this “understanding problem” for the pivotal mechanism. When mechanisms or other procedures taken from game theory are found to “work”, we must not forget that the idea of a fully rational individual is usually an underlying assumption. To what extent will a mechanism “work” under conditions of bounded rationality? That is the question we then try to answer by means of *simulation*.

In the concluding Chapter 7, the need for correct evaluations of public goods is emphasised. We revert to the notion of strategic behaviour. We finally adduce two striking thought experiments to show that decision-making in the context of strategic interdependence is quite different to individual decision-making. The first experiment highlights the *ambiguity of additional information*, whereas the second demonstrates how *additional options* can be harmful. Reconsidering the motivation example in section 2.1, we see that these problems are ever-present in social dilemma situations.

## 1 Einleitung

### 1.1 Ein Beispiel für strategisches Verhalten

Drei Fischzüchter, die an einem See angesiedelt sind, stehen vor der Frage, ob sie gemeinsam eine Kläranlage finanzieren sollen, welche potentielle Schadstoffe aus dem einleitenden Fluss zurückhält. Wird das Projekt realisiert, so beträgt der erwartete Nutzen für jeden einzelnen jeweils 100 Nutzeinheiten (NE). Die Realisierungskosten für den Bau der Kläranlage betragen insgesamt 210 NE.

Objektiv betrachtet stellt sich die Situation vollkommen klar und unproblematisch dar: Angenommen jeder Fischzüchter trägt 70 NE bei, so verbleibt jeder mit einem erwarteten Gewinn von 30 NE. Aufsummiert für alle drei ergibt das einen Vorteil von 90 NE. Dieser mögliche Vorteil von 90 NE wird im Folgenden als *gesamtwirtschaftliches Potential* bezeichnet und entspricht exakt der Differenz zwischen dem gesamtwirtschaftlichen Nutzen (300 NE) einer realisierten Kläranlage und den gesamtwirtschaftlichen Kosten (210 NE).

Leider zeigt sich, dass ein beträchtlicher Anteil dieses gesamtwirtschaftlichen Potentials ungenutzt verpufft, sobald **strategisches Verhalten** ins Spiel kommt. Hierbei wird versucht, **private Information** strategisch einzusetzen und gegebenenfalls zurückzuhalten, um für sich persönliche Vorteile aus der Situation herauszuziehen. Im hier betrachteten Beispiel könnte ein Fischzüchter seinen tatsächlichen individuellen Vorteil aus der Realisierung der Kläranlage untertreiben, um dadurch die anderen beiden Fischzüchter zur Übernahme eines höheren Finanzierungsanteils zu bewegen. Bei einer Aufteilung der Baukosten auf 50 : 80 : 80 NE würde sich der individuelle Nutzengewinn des Untertreibenden gegenüber einer fairen Finanzierung der Kläranlage von 30 NE auf 50 NE erhöhen.

### 1.2 Bezug zur Kybernetik

Aus kybernetischer Sicht handelt es sich um ein System bestehend aus drei Entscheidungsträgern (Agenten), wobei Informationsverteilung und Anreizsystem so kombiniert sind, dass kein effizienter Informationsfluss stattfindet. Um das Ausmaß der Problematik zu verdeutlichen, sei

## Einleitung

ein Ergebnis der Arbeit schon an dieser Stelle vorweggenommen: In Abschnitt 6.4.1 wird gezeigt, dass bei dem eben geschilderten Beispiel damit zu rechnen ist, dass statistisch ungefähr die Hälfte des gesamtwirtschaftlichen Potentials von 90 NE nicht realisiert werden kann (es verbleibt ein Erwartungswert von ca. 49,5 NE). Außerdem kann gezeigt werden, dass bei einer noch höheren Anzahl von Beteiligten es schnell zu einer Situation kommt, bei der praktisch das gesamte Nutzenpotential verloren geht. Mit Hilfe eines Simulationsansatzes wird dazu die Zahl der Beteiligten mehrmals verdoppelt. Im Rahmen dieses Ansatzes können auch Prozesse der Adaption von Entscheidungen modelliert werden.

In einer früheren Arbeit wurde vom Autor bereits ein Modell zur Simulation von Entscheidungsprozessen vorgestellt – das Wesentliche hierzu hat FISCHER zusammengefasst<sup>1</sup>. Bei den simulierten Prozessen handelte es sich um Planungsprozesse in Unternehmen, und es wurde implizit unterstellt, dass durch Koordinationsmechanismen gegensätzliche Interessen weitgehend ausgeräumt werden können. Der Anwendungsbereich dieses Modellansatzes beschränkte sich also auf Situationen, in welchen dem Widerspruch zwischen Einzel- und Allgemeininteresse eine eher untergeordnete Bedeutung zukam<sup>2</sup>.

Diese Einschränkung sollte jedoch sowohl beim Spezialfall einer Unternehmensorganisation als auch bei einem sozio-ökonomischen System im Allgemeinen besser hinterfragt werden. Völlig unangemessen ist die Vernachlässigung des Aspektes bei Fragen umweltökonomischer Relevanz. Bei sogenannten *sozialen Dilemmata*<sup>3</sup> jedenfalls wären elementare Eigenschaften ausgeblendet.

Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit der Modellansatz erweitert. Dies geschieht durch explizite Berücksichtigung strategischer Aspekte mit dem Instrumentarium der Spieltheorie. Die Spieltheorie ist zur formalen Beschreibung von Interessenkonflikten zwar bestens geeignet, aber die verwendeten Lösungskonzepte stellen mitunter äußerst unrealistische Anforderungen an Rationalität und Informationsverarbeitungskapazität der Entscheidungsträger. Deshalb würde eine zu oberflächliche Übertragung spieltheoretischer Konzepte zu kurz greifen. Statt dessen hat zunächst eine sorgfältige Auswahl der geeigneten Modelle stattzufinden.

---

<sup>1</sup> Vgl. Berkemer (1991), sowie Fischer (1994), S. 180ff.

<sup>2</sup> Insbesondere war es nicht notwendig den *Opportunismusaspekt* von Entscheidungsträgern einzubeziehen.

<sup>3</sup> Umweltprobleme haben typischerweise einen derartigen Charakter.

### 1.3 Gang der Untersuchung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein agentenbasiertes Modell zur Simulation von strategischem Entscheidungsverhalten zu entwickeln und die Leistungsfähigkeit dieses Modells anhand von konkreten Beispielen mit umweltökonomischer Relevanz unter Beweis zu stellen. Können Kybernetik sowie Spieltheorie besondere Beiträge zu umweltrelevanten Problemstellungen leisten? Wie kann verhindert werden, dass die Umweltökonomik auf der Stelle tritt wegen zu geringer Berücksichtigung des dynamischen Systemverhaltens bzw. wegen Vernachlässigung der strategischen Interdependenz? Diese Leitfrage deutet sich auch im Untertitel der Arbeit an:

**Beiträge von Kybernetik und Spieltheorie  
zur Modellierung umweltökonomischer Fragestellungen.**

Aus beiden Bereichen, Spieltheorie und Kybernetik, kommt jeweils vorzugsweise ein Instrument zum Einsatz: Mit der sogenannten *evolutionären Spieltheorie* wird der strategische Strukturaspekt erfasst, ohne mit überzogenen Rationalitätsannahmen arbeiten zu müssen. Die Kybernetik steuert mit der *Simulationsmethode* das Instrument für die dynamische Betrachtung bei. Somit kann auch dem Prozess-Charakter des Entscheidungsverhaltens Rechnung getragen werden.

Diese Arbeit ist in erster Linie kybernetisch-systemtheoretisch orientiert und weniger spieltheoretisch. Die wesentliche Leistung besteht in der Entwicklung eines Simulationsmodells sowie in der Modellbildung des Imitations- bzw. Lernverhaltens. Der Beitrag der Spieltheorie beschränkt sich im Wesentlichen darauf,

- einen strukturierten Rahmen für die Analyse verschiedener umweltrelevanter Interaktionsbeziehungen zu liefern,
- mit analytischen Mitteln vorab solche Parameterkonstellationen zu bestimmen, die für Simulationsläufe interessant sind (und entsprechende Hypothesen zu generieren), sowie
- die Plausibilität der Simulationsergebnisse analytisch zu kontrollieren, zumindest für bestimmte Parameterkonstellationen, bei denen dies möglich ist.

## Einleitung

Der detaillierte Aufbau der Arbeit kann der Gliederung entnommen werden. An dieser Stelle ist der Argumentationsgang nur grob dargestellt. Nach dieser Einleitung wird in Kapitel 2 erklärt, warum vorwiegend Konzepte der *evolutionären Spieltheorie* zum Einsatz kommen sollen. Kapitel 3 beschreibt den Stand der aktuellen Literatur zu den relevanten Teilbereichen der *Umweltökonomie*. Dabei zeigt sich, dass Umweltprobleme in den meisten Fällen als Kooperationsprobleme dargestellt werden können. Kooperationsprobleme wiederum werden dann auf Informationsprobleme zurückgeführt. Im 4. Kapitel wird das *agentenbasierte Simulationsmodell* konzipiert. In den Kapiteln 5 und 6 werden Simulationsergebnisse für zwei Anwendungsbeispiele präsentiert, bevor dann in Kapitel 7 die Schlussbetrachtung stattfindet.

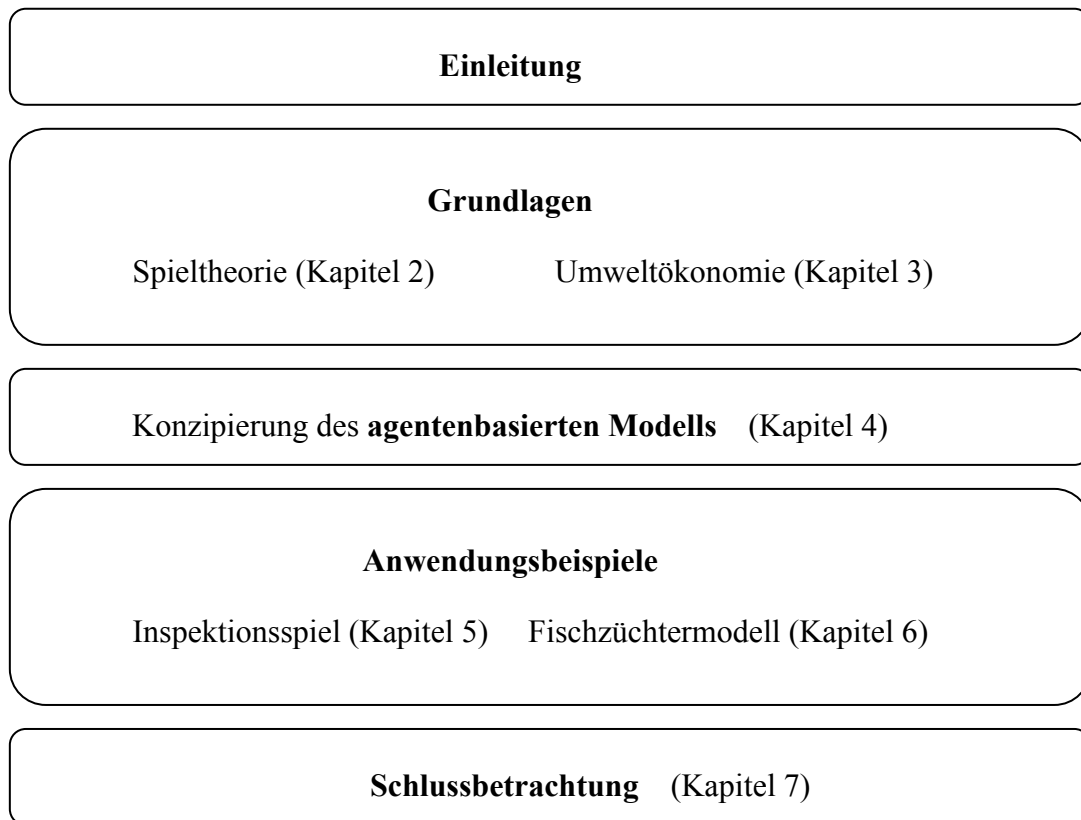


Abbildung 1-1: Struktur der Arbeit

## 2 Spieltheorie und Kybernetik

»Manchmal zählt man die Spieltheorie zum mathematischen Apparat der  
Kybernetik«

(N.N. Worobjew)<sup>4</sup>

Mit diesem Kapitel werden zwei Hauptanliegen verfolgt. Zum einen werden die für die Arbeit relevanten Fachbegriffe definiert. Zum zweiten wird entschieden, welche der spieltheoretischen Konzepte für den agentenbasierten Simulationsansatz geeignet sind.

In Abschnitt 2.1 wird motiviert, worin der Bezug zur Umweltproblematik besteht. Abschnitt 2.2 beschäftigt sich mit den Informations- und Rationalitätsanforderungen, die für die *klassische Spieltheorie* konstitutiv sind. In Abschnitt 2.3 werden diese (sehr weitreichenden) Voraussetzungen kritisch unter die Lupe genommen und der Realität sozio-ökonomischer Systeme gegenübergestellt. Ausgangspunkt hierfür ist zunächst die Kritik in der *Politischen Kybernetik* von KARL WOLFGANG DEUTSCH. Ebenfalls thematisiert werden die dezentrale Verteilung von Information sowie das Konzept der *begrenzten Rationalität* im Sinne von HERBERT ALEXANDER SIMON. In Abschnitt 2.4 werden die Grundzüge der *evolutionären Spieltheorie* erläutert. Dabei wird gezeigt, dass für diese weitaus schwächere Rationalitätsannahmen ausreichen. In Abschnitt 2.5 erfolgt die Bewertung aus kybernetischer Sicht, welche der genannten Konzepte zu welchem Zweck weiterverfolgt werden sollen.

### 2.1 Motivation

Der Zugang zur Spieltheorie lässt sich durch die Modellierung eines Alltagsbeispiels vermitteln. In einer Studenten-WG haben Andi und Bernd ein Problem mit der gemeinsam genutzten Küche. Solange im offen zugänglichen Geschirrschrank noch saubere Teller vorhanden sind, bedient sich jeder der beiden ganz selbstverständlich. Würden beide mit gleicher Selbstverständlichkeit die Teller nach Benutzung wieder spülen und ordentlich in den Schrank zurückstellen, so gäbe es kein Problem. Die Küche wäre ständig in sauberem Zustand, und beide hätten einen hohen Nutzen bei geringem Aufwand. Da aber weder Andi noch Bernd gerne spülen, nutzen sie die

---

<sup>4</sup> N.N. Worobjew, in Laux (1981), Lexikon der Kybernetik [4], S. 117.

andere, eher unkooperative Option: Sie stellen das Geschirr einfach dreckig in die Spüle. Das Endergebnis ist in so mancher Studenten-WG zu besichtigen: Das Geschirr sammelt sich an, bis es sich irgendwann nicht mehr weiter stapeln lässt und eine aufwendige Großspülaktion notwendig wird.

Mit Hilfe der folgenden **Bimatrix**-Darstellung ist der Sachverhalt spieltheoretisch bereits vollständig beschrieben.

		<b>Bernd</b>	
		Abspülen	Nicht abspülen
<b>Andi</b>	Abspülen	3 , 3	1 , 4
	Nicht abspülen	4 , 1	2 , 2

**Abbildung 2-1: Das Wohngemeinschaftsdilemma**

Die beteiligten Spieler sowie ihre Handlungsoptionen werden links neben die Bimatrix bzw. für den zweiten Spieler über die Bimatrix geschrieben. In jeder Zelle befinden sich zwei Einträge – daher der Name Bimatrix – wobei der erste Eintrag per Konvention eine Nutzenkennziffer für den ersten Spieler angibt; der andere Eintrag bezieht sich auf den zweiten Spieler. Im vorliegenden Beispiel reicht es aus, den Nutzen eines Spielers ordinal zu interpretieren. *Ordinale Nutzenkennziffern* werden in dieser Arbeit immer so verwendet, dass die höhere Kennziffer einem höheren Nutzen entspricht<sup>5</sup>. Wählt also etwa Andi die unkooperative Aktion und verhält sich Bernd gleichzeitig kooperativ, so ist die Zelle links-unten relevant. Das Ergebnis ist, dass Andi nicht abzuspülen braucht und die Küche dennoch sauber bleibt (entspricht dem höchsten Nutzen für Andi = 4). Bernd hat dagegen die doppelte Menge an Geschirr zu bewältigen (schlechtestes Ergebnis für ihn = 1).

Die Struktur in Abbildung 2-1 entspricht übrigens exakt der des bekannten **Gefangenendilemmas**. Es genügt an dieser Stelle festzuhalten, dass ein Gefangenendilemma dadurch konstituiert ist, dass beide Spieler eine *strikt dominante* Strategie besitzen – im obigen

---

<sup>5</sup> Wird irrtümlicherweise eine ordinale Nutzenkennziffer kardinal interpretiert, so bleibt das Wesen der Spielstruktur völlig unverändert. Damit sind mögliche Missverständnisse von vornherein ausgeräumt.



Beispiel das Geschirr nicht abzuspuhlen. Verfolgen jedoch beide diese Strategie, so schneiden sie am Ende schlechter ab als im Falle einer beidseitigen Kooperation. Eine Entscheidung, die also sowohl für Andi als auch für Bernd individuell rational ist, führt somit kollektiv betrachtet zu einem suboptimalen Ergebnis. Derartige Rationalitätsfallen, bei denen es zu einem klaren Widerspruch zwischen *individueller Rationalität* und *kollektiver Rationalität* kommt, werden in der Literatur auch allgemein als *soziale Dilemmata* (social dilemmas) bezeichnet.

*Warum aber verfangen sich unsere WG-Bewohner in einer derartigen Rationalitätsfalle und worin besteht der Bezug zur Umweltproblematik?*

Im obigen Beispiel entsteht ein *individueller* Aufwand (das Abspülen) – der Nutzen (die saubere Küche) fällt jedoch *allgemein* an. Bei der Küche handelt es sich eben um ein *gemeinsam genutztes Gut*, womit der Bezug zur Umweltökonomie mit ihrer *Theorie der öffentlichen Güter* auf der Hand liegt. Sehr häufig entstehen Umweltprobleme auch im spiegelbildlich analogen Fall, wenn einzelne Wirtschaftssubjekte *individuellen Nutzen* realisieren können, dabei aber *Aufwendungen auf die Allgemeinheit* abwälzen.

In beiden Fällen liegt eine problematische Anreizstruktur vor, denn

- es gibt immer den Anreiz, auf Kosten anderer *Trittbrett zu fahren* (in der umweltökonomischen Terminologie bedeutet dies: Falls der andere kooperiert, wird eine „*free rider*“-Position eingenommen).
- es gibt immer die Befürchtung, von dem Anderen ausgenutzt zu werden, weshalb auf *Schadensbegrenzung* hinzuarbeiten ist. Im Falle eines unkooperativen Verhaltens des Anderen wird wenigstens die schlechteste Alternative vermieden, indem man selbst nicht kooperiert.

Aus diesen beiden Triebkräften folgt, *unabhängig vom Verhalten des Anderen*, dass auf gar keinen Fall kooperiert werden sollte – in der spieltheoretischen Terminologie wird eben die Nicht-Kooperation zur *strikt dominanten Strategie*! Dies impliziert übrigens, dass einer rigiden Auslegung der Spieltheorie folgend (wobei strikt dominante Strategien gewählt werden müssen) die Untersuchung schnell abgeschlossen werden könnte – mit negativem Befund! Nicht die geringste Spur kooperativen Verhaltens dürfte zu erwarten sein. Die Empirie und eine Vielzahl experimenteller Studien rücken dieses pessimistische Bild jedoch zurecht.

Die Untersuchung kann also weiter gehen, allerdings muss dazu eine vertiefte Auseinandersetzung mit realem Entscheidungsverhalten erfolgen. Es genügt nicht zu beschreiben, wie sich Menschen unter zuweilen recht unrealistischen Voraussetzungen optimal verhalten würden. Statt dessen sind die menschlichen *Grenzen von Rationalität* und Rechenfähigkeit zu berücksichtigen und Entscheidungsprozesse explizit zu modellieren.

## 2.2 Informations- und Rationalitätsanforderungen der klassischen Spieltheorie<sup>6</sup>

### 2.2.1 Instrumentelle Rationalität

Hat eine Person zwischen unterschiedlichen Alternativen zu wählen, welche im Folgenden mit  $A_1, A_2, A_3$  usw. bezeichnet werden, so lässt sich eine **Präferenzordnung** definieren, für die folgende Notation vereinbart wird:

$A_i \geq A_j$  bedeutet, dass die Person die Alternative  $i$  der Alternative  $j$  vorzieht **oder** indifferent zwischen den beiden Alternativen ist.

$A_i > A_j$  bedeutet, dass die Person die Alternative  $i$  der Alternative  $j$  vorzieht.

$A_i \approx A_j$  bedeutet, dass die Person indifferent zwischen den Alternativen  $i$  und  $j$  ist.

Eine Person wird als **instrumentell rational** bezeichnet, falls ihre Präferenzordnung folgende Bedingungen erfüllt:

1. **Reflexivität:**  $(A_i \geq A_i), \quad \forall i$
2. **Vollständigkeit:**  $(A_i \geq A_j) \vee (A_j \geq A_i), \quad \forall i, j$
3. **Transitivität:** falls  $(A_i \geq A_j) \wedge (A_j \geq A_k)$  so gilt  $(A_i \geq A_k), \quad \forall i, j, k$
4. **Kontinuität:** falls  $(A_i > A_j > A_k)$  so gibt es eine Kombination von  $A_i$  und  $A_k$  ( $Z_{ik} = p \cdot A_i + (1-p) \cdot A_k$ ) für die gilt  $(Z_{ik} \approx A_j) \quad \forall i, j, k, \quad p \in (0,1)$

---

<sup>6</sup> In dieser Arbeit werden nur die Konzepte der *nicht-kooperativen Spieltheorie* behandelt – vgl. auch Fußnote 16.

Sind die ersten drei Voraussetzungen erfüllt, so spricht man von einer *wohldefinierten Präferenzordnung*. Falls zusätzlich die Kontinuitätsbedingung gilt, so kann die Präferenzordnung durch eine *Nutzenfunktion* dargestellt werden. Insbesondere erlaubt die probabilistische Interpretation der Kontinuitätsbedingung – wie sie hier eben eingeführt wurde – die Ableitung einer *kardinalen von-Neumann-Morgenstern-Nutzenfunktion (VNM-Nutzenfunktion)*<sup>7</sup>.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird für sämtliche Auszahlungsmatrizen vorausgesetzt, dass die dort eingetragenen Zahlenwerte als VNM-Nutzenwerte interpretiert werden können. Damit befindet man sich auf der sicheren Seite, denn kritische Gesichtspunkte wie etwa die der *Risikofreude, -aversion bzw. -neutralität* werden bereits bei der Konstruktion der VNM-Nutzenfunktion berücksichtigt. Aus diesem Grund wird im Folgenden auch konsequent die Angabe von *Geldeinheiten* vermieden und statt dessen der Begriff *Nutzeneinheiten* verwendet.

Sobald aber *kardinale Bewertungen* sämtlicher Alternativzustände vorliegen und der Person auch die (möglicherweise statistischen) Zusammenhänge zwischen Entscheidungen und Alternativzuständen bekannt sind, können die *Erwartungswerte* kalkuliert werden, die mit jeder Entscheidung verbunden sind.

Die damit zusammenhängende Annahme vollständiger Rationalität ist für Ökonomen nichts Ungewöhnliches. Der *homo oeconomicus* ist vollständig informiert über sämtliche Alternativen und kennt alle relevanten Randbedingungen. Ferner kann er all diese Informationen in beliebig kurzer Zeit verarbeiten und die *optimalen* Entscheidungen treffen, welche seinen Erwartungsnutzen maximieren. Das Problem mit der *klassischen Spieltheorie* ist nun, dass zu diesen unrealistischen Annahmen noch weitere realitätsferne hinzukommen. Der traditionelle *homo oeconomicus* kennt zwar seine eigenen Präferenzen, er muss jedoch überhaupt nichts über die *Nutzenwerte anderer*<sup>8</sup> wissen. Bei der Spieltheorie ist das anders.

---

<sup>7</sup> Man kann etwa der am meisten erwünschten Alternative den Nutzenwert 1 zuweisen, der am wenigsten erwünschten Alternative den Nutzenwert 0 und dann für jede beliebige andere Alternative mit Hilfe der Kontinuitätsbedingung die Nutzenwerte konstruieren. Dazu müssen nur die aufgrund eines Indifferenzvergleiches ermittelten Wahrscheinlichkeiten eingesetzt werden. Hat man auf diese oder andere Weise eine VNM-Nutzenfunktion konstruiert, so ist jede durch positiv affine Transformation daraus hervorgehende Funktion ebenfalls eine von-Neumann-Morgenstern-Nutzenfunktion.

<sup>8</sup> Eben deshalb konnte ADAM SMITH bei seinem Bäcker unterstellen, dass dieser nicht aus Nächstenliebe sein Brot backt. Es wird noch gezeigt, dass bei sogenannten *privaten Gütern* (wie etwa Brot) unter Annahme weiterer Bedingungen ein dezentraler Marktmechanismus erlaubt, die Interdependenz zum Nutzen seiner Kunden zu ignorieren.

### 2.2.2 Common Knowledge of Rationality<sup>9</sup>

Die klassische Spieltheorie setzt voraus, dass alle Spieler die Regeln des Spiels kennen, und dazu gehört eben auch: Sämtliche Spieler kennen die gesamte Spielmatrix<sup>10</sup>. Auch genügt es nicht anzunehmen, dass jeder einzelne Spieler rational handelt. Vielmehr weiß jeder Spieler, dass auch **alle anderen rational** handeln werden und kalkuliert dies als **Tatsache** ein. Er weiß sogar noch mehr, nämlich dass auch alle anderen ihrerseits Rationalität bei ihm voraussetzen werden.

HARGREAVES HEAP und VAROUFAKIS kennzeichnen die CKR-Annahme wie folgt<sup>11</sup>:

- (a) Jede Person ist instrumentell rational
- (b) Jede Person weiß (a)
- (c) Jede Person weiß (b)
- (d) Jede Person weiß (c) usw. **ad infinitum**.

Die konsequente Anwendung der CKR-Annahme führt zuweilen zu paradoxen Erscheinungen. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist das von SELTEN eingeführte Chainstore-Paradox<sup>12</sup>, bei dem eine Handelskette sukzessive den Markteintritt von konkurrierenden Gegenspielern abzuwenden hat. Wegen der zeitlichen Abfolge der Entscheidungen wird der *Aufbau von Reputation*<sup>13</sup> zu einem wichtigen Thema – ein Aspekt der bei Situationen mit Wiederholungscharakter immer relevant ist. Ein weiterer Aspekt ist die damit verbundene Möglichkeit von Sanktionen, also etwa durch “Bestrafung“ im Wiederholungsspiel.

### Wiederholte Spiele

Sehr häufig finden wirtschaftliche und soziale Interaktionen wiederholt statt. Auch im Beispiel des Wohngemeinschaftsdilemmas kann man sich dieses gut vorstellen. Angenommen Andi und

---

<sup>9</sup> In deutschsprachigen Arbeiten: “Gemeinsames Wissen“ oder auch “Gemeinsames Vorwissen“ – der Begriff bleibt jedoch meist unübersetzt. Sehr häufig werden in spieltheoretischen Arbeiten auch entsprechende Abkürzungen (etwa CKR-Annahme für Common Knowledge of Rationality) verwendet.

<sup>10</sup> Für die Klasse der Spiele mit unvollständiger Information bedarf diese Aussage noch etwas Präzisierung. Diese wird in Abschnitt 2.3.2 nachgeliefert.

<sup>11</sup> Vgl. Hargreaves Heap und Varoufakis (2004), S. 8.

<sup>12</sup> Vgl. Selten (1978).

<sup>13</sup> Vgl. Fischbach (2006), S. 40. Dort wird Reputation als *aggregierte Information über das bisherige Verhalten* bezeichnet.

Bernd sind jeden Morgen in derselben Situation. Während die Strategie der Nicht-Kooperation im sogenannten *Einmal-Spiel* (one-shot-game) noch dominant war, muss diese im wiederholten Spiel nicht dominant bleiben. Insbesondere können *Lernvorgänge* stattfinden, bei denen die Studenten feststellen, dass es im langfristigen Interesse beider ist, die Großspülaktionen zu vermeiden. Ferner können *konditionale Strategien* verfolgt werden, die das Verhalten zu einem bestimmten Zeitpunkt vom Verhalten des anderen in den Vorperioden abhängig machen. Überhaupt muss zwischen Aktionen und Strategien unterschieden werden – wobei letztere einen umfassenden Aktionsplan spezifizieren. Hierauf wird in Kapitel 4 näher eingegangen, wenn das agentenbasierte Simulationsmodell konzipiert wird.

Eine plausible konditionale Strategie besteht beispielsweise darin, dass Andi immer mit der Aktion antwortet, welche Bernd am Vortag angewendet hat. Unter Spieltheoretikern ist dieses Vorgehen als *Tit-for-Tat* (TFT) bekannt<sup>14</sup>. Allerdings bleibt fraglich, ob sich die Studenten mit Hilfe einer TFT-Strategie aus ihrem Dilemma befreien können. Nachfolgend wird gezeigt, dass sie es *nicht* können, falls die Zahl der Wiederholungen (Spielrunden) endlich ist und diese Zahl zum “Gemeinsamen Wissen“ gehört.

*Wie geht nun die klassische Spieltheorie das Problem an – und welche Rolle spielen dabei die Rationalitätsannahmen?*

Angenommen Andi und Bernd bekommen jeweils ein kleines *Zimmer zur privaten Nutzung* und eben *eine Küche zur gemeinsamen Nutzung* vom Studentenwerk zugewiesen. Der Vertrag laufe jeweils genau bis zum 31. März 2009. Es wird auf keinen Fall eine Verlängerungsmöglichkeit geben, denn danach müssen die Wohnheimplätze für die Studenten nachfolgender Semester zur Verfügung stehen.

Aus spieltheoretischer Sicht kann das entstehende mehrstufige Spiel zunächst wie folgt definiert und anschließend mittels der CKR-Annahme gelöst werden:

Am ersten Tag des Vertrages (angenommen 1. Oktober 2007) werden die beiden Studenten erstmalig mit dem sogenannten *Basisspiel* (dargestellt in Abbildung 2-1) konfrontiert. Dies ist die erste Stufe eines sogenannten *Superspiels*<sup>15</sup>. Am 2. Oktober können sie die Ergebnisse des

---

<sup>14</sup> Es bleibt freilich noch zu klären, welches Verhalten in der jeweils ersten Spielrunde stattzufinden hat, denn zu diesem Zeitpunkt können noch keine Beobachtungen über das Verhalten der Gegenseite vorliegen. ANATOL RAPOPORT hat Tit-for-Tat so definiert, dass es in der ersten Spielrunde kooperiert.

<sup>15</sup> Bei einem *Superspiel* wird ein bestimmtes *Basisspiel* endlich oder unendlich oft wiederholt.

ersten Tages beobachten – nämlich in der Spüle. An diesem Tag wird das Basisspiel dann das zweite Mal gespielt. D. h. die Studenten entscheiden erneut und unabhängig voneinander<sup>16</sup>, ob sie sofort abspülen oder nicht. Nachdem diese zweite Spielstufe abgeschlossen ist, sehen beide wieder das Ergebnis am 3. Oktober. Für ihre Entscheidung in der dritten Spielstufe kann das Verhalten in den ersten beiden Spielstufen berücksichtigt werden, und so entwickelt sich das Spiel Stufe für Stufe weiter, bis mit dem 31. März 2009 die definitiv letzte Spielstufe abgeschlossen ist.

Zur vollständigen Definition des Superspiels gehört noch die Festlegung, wie die Nutzenwerte der beiden Spieler für das gesamte Spiel zu bestimmen sind. An dieser Stelle wird nur der einfachste Fall betrachtet, bei dem schlicht der Nutzen der Einzelperioden über den Gesamtzeitraum aufsummiert<sup>17</sup> wird – im Fall von  $T$  Spielstufen also:

$$U_i = \sum_{t=1}^T u_i(t)$$

Gelöst wird das mehrstufige Problem vom klassischen Spieltheoretiker überraschend einfach – mit Hilfe einer Rückwärtsinduktion ausgehend von der letzten Spielstufe  $T$  (dieses entspricht dem bekannten Bellmann-Prinzip der dynamischen Optimierung).

Am 31. März 2009 (Stufe  $T$ ) liegt das Basisspiel zum allerletzten Mal vor und sollte deshalb genauso wie ein Einmal-Spiel behandelt werden. Es wurde bereits begründet, warum sich in einem Einmal-Spiel keiner der beiden Studenten kooperativ verhalten wird. Nun kommt die wechselseitige Rationalitätsannahme zum Tragen: Bernd rechnet damit, dass Andi rational handelt. Andis Verhalten in der letzten Periode wird sich also nicht beeinflussen lassen. Dann ist jedoch Nicht-Kooperation für Bernd eine strikt dominante Strategie auch in Stufe  $T - 1$ .

---

<sup>16</sup> Die Darstellung dieser Situation ist zugegebenermaßen recht künstlich. So könnte man etwa fragen, warum Andi und Bernd nicht explizit miteinander kommunizieren, um eine für beide Seiten akzeptable gemeinsame Strategie zu finden. In der Tat gibt es auch einen Zweig der Spieltheorie (*die kooperative Spieltheorie*), welche eine solche Sichtweise zulassen würde. Wenn jedoch in dieser Arbeit von klassischer Spieltheorie die Rede ist, so sind ausschließlich Konzepte der *nicht-kooperativen* Spieltheorie gemeint. Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt wird, wäre jeder andere Ansatz methodisch ungeeignet. Deshalb soll an dieser Stelle eben auch ausschließlich die Vorgehensweise der nicht-kooperativen Spieltheorie illustriert werden.

<sup>17</sup> Spätestens ab jetzt sind freilich kardinale Nutzenkennziffern auch dann erforderlich, wenn das Basisspiel etwa ein Gefangenendilemma sein sollte. Übrigens müssen bei einem verallgemeinerten Ansatz die Nutzenwerte verschiedener Perioden nicht zwingend gleich gewichtet werden (vgl. die Ausführung zu zeitlicher Diskontierung in Abschnitt 3.3.1).

Weil Andi damit rechnet, dass Bernd rational handeln wird, gelten für ihn dieselben Schlussfolgerungen. Außerdem kann sich Andi ausrechnen, dass es hoffnungslos sein wird, Bernds Verhalten in der vorletzten Stufe  $T-1$  zu beeinflussen, denn Andi weiß, dass Bernd berücksichtigen wird, dass Andi rational ist. Somit wird Andi auf keinen Fall in Stufe  $T-2$  kooperieren. Aus Symmetriegründen gelten sämtliche Überlegungen immer für beide Studenten und mit der immer tiefer verschachtelten Begründungsformel .... *A weiß, dass B weiß, dass A weiß, dass B weiß ..... dass A rational handelt* kann somit für jede Spielstufe hergeleitet werden, dass beide Studenten nicht kooperieren *sollten*.

Dies bedeutet also, dass bei *bekannter endlicher* Anzahl von Spielrunden die Tit-for-Tat-Strategie nicht aus dem Dilemma befreien kann. Dies gilt in gleicher Weise für beliebige andere konditionale Strategien, unter welchen Bedingungen auch immer diese eine Kooperation vorsehen. Außerdem ist es irrelevant, wie hoch die Anzahl der Spielrunden ist – solange diese Zahl endlich und allen Spielern bekannt ist.

### 2.2.3 Konzept des Nash-Gleichgewichts

Die eben verwendete Formulierung, dass Spieler nicht kooperieren *sollten*, darf nicht als moralische Handlungsanweisung missverstanden werden<sup>18</sup>. Allerdings möchte der klassische Spieltheoretiker für die Beteiligten in einer strategisch interdependenten Situation Handlungsempfehlungen entwickeln, die *in sich widerspruchsfrei* sind. Es darf also nicht vorkommen, dass dann, wenn sich alle anderen gemäß diesen Empfehlungen verhalten, irgend jemand einen Anreiz hat, von der Handlungsempfehlung abzuweichen<sup>19</sup>.

Dies ist bereits das Wesentliche, was dem Konzept des *Nash-Gleichgewichts* zugrunde liegt.

Die allgemeinen Bedingungen für ein Nash-Gleichgewicht lassen sich wie folgt formalisieren:

Es werden  $n$  Spieler betrachtet. Eine Strategienkombination sei mit  $\mathbf{s} \equiv (s_1, s_2, \dots, s_n)$  bezeichnet.

$\mathbf{s}_{-i} \equiv (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_n)$  bezeichne die Strategienkombination aller Spieler mit Ausnahme von Spieler  $i$ .

---

<sup>18</sup> Zur Abgrenzung von normativen, präskriptiven und deskriptiven Theorien, vgl. Rieck (1993), S. 76ff.

<sup>19</sup> In Übereinstimmung mit LUCE und RAIFFA sollte die Spieltheorie als *bedingt normativ* eingestuft werden: „Sie stellt weder fest, wie sich Menschen verhalten, noch enthält sie *absolute* Verhaltensmaßstäbe, sie weist vielmehr darauf hin, wie sich Menschen verhalten sollen, wenn sie bestimmte Ziele erreichen wollen.“, vgl. Luce und Raiffa (1957), S. 63.

Der Auszahlungsvektor  $\mathbf{u}(\mathbf{s}) \equiv (u_1, u_2, \dots, u_n)$  gebe komponentenweise die Erwartungsnutzenwerte für die Spieler an, falls diese die Strategienkombination  $\mathbf{s}$  auswählen.  $\mathbf{u}(s_i', \mathbf{s}_{-i})$  gebe die Auszahlungswerte an, falls in der Strategienkombination  $\mathbf{s}$  für Spieler  $i$  die Strategie  $s_i$  durch die Strategie  $s_i'$  ersetzt wird.

Eine Strategienkombination  $\mathbf{s}^*$  ist dann und nur dann ein Nash-Gleichgewicht, falls für sämtliche Spieler  $i$  gilt:

$$u_i(s_i^*, \mathbf{s}_{-i}^*) \geq u_i(s_i', \mathbf{s}_{-i}^*), \quad \forall s_i' \quad (1)$$

### Gemischte Strategien und der Existenzsatz für Nash-Gleichgewichte

Nun stellt sich die wichtige Frage, ob es denn überhaupt für jedes Spiel ein solches Nash-Gleichgewicht gibt. Mit anderen Worten:

*Kann der Spieltheoretiker für jede interdependente Entscheidungssituation widerspruchsfreie Handlungsanweisungen angeben?*

Die Frage kann positiv beantwortet werden – zumindest für jedes endliche Spiel – allerdings ist vor der Formulierung des folgenden Existenzsatzes zunächst ein weiteres Konzept einzuführen, das der **gemischten Strategien**. Im Gegensatz zu **reinen Strategien**, bei denen Spieler sich definitiv für eine der zur Verfügung stehenden Aktionen entscheiden, muss bei gemischten Strategien eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über den möglichen Aktionsraum angegeben werden. Nun ist es zunächst schwer zu vermitteln, dass eine *optimale* Strategie den Einsatz eines Zufallsmechanismus empfehlen soll. In der Realität wird man auch selten auf Akteure treffen, bei denen ständiges Münzwerfen beobachtbar ist. Ganz sicher stellt man sich rationale Entscheidungsträger nicht so vor<sup>20</sup>.

Wie beim ersten Anwendungsbeispiel in Kapitel 5 gezeigt wird, gibt es jedoch Spielstrukturen, bei denen ein Nash-Gleichgewicht in reinen Strategien nicht existiert. Mit anderen Worten: Die klassische Spieltheorie kann in diesem Beispiel nur dann eine konsistente Strategieempfehlung geben, wenn auf das Konzept gemischter Strategien zurückgegriffen wird.

---

<sup>20</sup> Man macht sich aber leicht klar, dass etwa beim Pokern weder die Strategie, bei der ständig geblufft wird, noch die Strategie, bei der nie geblufft wird, optimal sein kann. Bei manchen Spielen ist also eine adäquate Mischung der Strategien entscheidend, weil es sonst dem Gegner zu einfach gemacht wird.



Unter Berücksichtigung gemischter Strategien gilt der folgende Existenzsatz von Nash<sup>21</sup>:

*Zu jedem endlichen Spiel existiert ein Nash-Gleichgewicht in gemischten Strategien.*

Gemischte Nash-Gleichgewichte haben noch eine besondere Eigenschaft, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit mehrfach zurückgegriffen wird:

*Alle in einem gemischten Nash-Gleichgewicht verwendeten Strategien führen zu derselben Auszahlung, falls sich die anderen Spieler entsprechend dem Gleichgewicht verhalten.*

Daraus folgt, dass die Spieler bei einem gemischten Nash-Gleichgewicht *indifferent* sind, was die im Gleichgewicht verwendeten Strategien betrifft. Dieser Sachverhalt lässt sich ausnutzen, um ein gemischtes Gleichgewicht schnell zu berechnen. Bei beiden Anwendungskapiteln erweist sich diese Indifferenzbedingung als nützlich. Eine weitere Folgerung ist, dass gemischte Nash-Gleichgewichte niemals *strikte* Gleichgewichte sein können.

### **Nash-Gleichgewichte und die iterative Elimination dominierter Strategien**

Will man ein Nash-Gleichgewicht ermitteln, so ist es – vor allem bei sehr vielen Strategien – hilfreich, wenn man von vornherein einige der Strategien als unplausibel ausschließen kann. Nun sind im Nash-Gleichgewicht die gewählten Strategien wechselseitig beste Antworten aufeinander. Deshalb ist es unmittelbar einsichtig, dass eine *strikt dominierte* Strategie niemals als Kandidat für eine Nash-Gleichgewichtsstrategie in Frage kommt – diese ist eben unter keinen Umständen die beste Antwort. Da bei allen Spielern wechselseitig Rationalität vorausgesetzt wird, können die Gegenspieler fest damit *rechnen*, mit einer solchen Strategie niemals konfrontiert zu werden. Die strikt dominierte Strategie verschwindet gewissermaßen als zulässige Alternative. Somit kann etwa im Fall eines Bimatrixspiels die entsprechende Spalte oder Zeile komplett gestrichen werden. Das Konzept lässt sich im Prinzip erneut auf das derart reduzierte Spiel anwenden. Auf diese Weise gelangt man zur iterativen bzw. wiederholten Elimination von strikt dominierten Strategien.

Schwieriger gestaltet sich die Argumentation bei der Elimination *schwach dominierter* Strategien. Diese sind nämlich unter Umständen *alternativ* beste Antworten auch wenn sie niemals *alleinig* beste Antworten sind. Andererseits ist aus Sicht der klassischen

---

<sup>21</sup> Vgl. Holler und Illing (2005), S. 64.

Entscheidungstheorie auch das Streichen schwach dominierter Strategien angeraten<sup>22</sup>. Falls schwache Dominanz als Ausschlusskriterium akzeptiert wird, so sollte man nach Ansicht von RIECK konsequenterweise die Elimination auch wiederholt zulassen.

Im Anschluss an diese Argumentation zeigt RIECK jedoch anhand eines Beispiels in welche Schwierigkeiten man dabei kommen kann: Bei *asymmetrischen* Spielen kann nämlich die Reihenfolge der Elimination ausschlaggebend sein. Trotz dieser Vorbehalte ist die iterative Elimination schwach dominierter Strategien häufig ein praktikables Mittel, und sie wird im Verlauf dieser Arbeit auch angewendet werden – allerdings bei einer *symmetrischen* Situation. Auch ohne sich weiter in die Untiefen der Debatte vorzuwagen, bereits das oberflächliche Anreißen der Problematik deutet schon an, dass spieltheoretische Modelle äußerst empfindlich reagieren können, was aber nur einer der oft vorgebrachten Kritikpunkte ist.

## 2.3 Kritik der klassischen Spieltheorie

### 2.3.1 Politische Kybernetik

In seiner Arbeit *Politische Kybernetik* begibt sich KARL WOLFGANG DEUTSCH auf die Suche nach geeigneten Modelltypen<sup>23</sup>. Zu diesem Zweck untersucht er zunächst einige klassische Denkmodelle wie etwa den Mechanismus, den Organismus usw. Im Anschluss daran widmet er ein ganzes Kapitel der Spieltheorie. Um es kurz zu machen: Obwohl DEUTSCH ausdrücklich das Potential der Spieltheorie hervorhebt, fällt sein Gesamturteil eher negativ aus.

Insbesondere bemängelt DEUTSCH den *statischen* Charakter der klassischen Spieltheorie, und hierbei kann er sich auf wichtige Kronzeugen berufen:

» *Wir betonen mit allem Nachdruck, daß unsere Theorie durch und durch statisch ist [...] Eine statische Theorie beschäftigt sich mit Gleichgewichtszuständen.*

---

<sup>22</sup> Vgl. im Folgenden die Argumentation bei Rieck (1993), S. 163.

<sup>23</sup> Das Interesse von DEUTSCH besteht darin, die Bedingungen für eine sich selbst steuernde Gesellschaft herauszuarbeiten (vgl. Deutsch (1973), S. 22). In diesem Zusammenhang beschäftigt er sich auch mit der Modellierung des Regierungshandelns. Dieses begreift er aber weniger als ein Problem der *Macht*, sondern in erster Linie als ein Problem der *Steuerung* sowie der *Kommunikation*. Der Bezug zur Kybernetik liegt bei dieser Betrachtungsweise auf der Hand. Der amerikanische Originaltitel lautet: *The Nerves of Government*.

*Das wesentliche Merkmal eines Gleichgewichtszustandes ist, daß er keine Neigung zur Veränderung hat. «*

(von Neumann und Morgenstern)<sup>24</sup>

Außerdem beschreibt DEUTSCH die Schwierigkeiten, welche sich aus der Mehrdeutigkeit von Nash-Gleichgewichten ergeben. Mit Hilfe des Existenzsatzes kann zwar garantiert werden, dass mindestens ein solches Gleichgewicht existiert. Es lässt sich jedoch nicht ausschließen, dass es eventuell eine Vielzahl unterschiedlicher Gleichgewichte gibt. Falls eine derartige Mehrdeutigkeit vorliegt, so benötigt der klassische Spieltheoretiker zusätzliche Kriterien, um zu einer eindeutigen Vorhersage zu kommen. Nun gibt es mittlerweile eine Vielzahl sogenannter Verfeinerungskonzepte (Refinements), wodurch aber keinesfalls das Problem gelöst ist. Häufig führen nämlich unterschiedliche Nash-Refinements zu völlig unterschiedlichen Lösungen.

Im Zusammenhang mit seinem Interesse an Selbststeuerung ist für DEUTSCH auch der Aspekt des Lernens elementar. Konsequenterweise beklagt er die Starrheit von Spielregeln<sup>25</sup>:

*» Genauso wenig [...] rechnet die Spieltheorie im allgemeinen mit einer Veränderung der Spielregeln. Diese [...] Einschränkung dürfte die Spieltheorie zur Beschreibung von Lernprozessen weitgehend untauglich machen. «*

### **Weitere Kritikpunkte aus den Sozialwissenschaften**

Ausgehend von den Überlegungen DEUTSCHS ist die Spieltheorie vielfach unter Beschuss genommen worden. Dies gilt vor allem für die Arbeiten von Soziologen und Politikwissenschaftlern, die ihre Disziplinen gegen *Übergriffe* aus der sozialwissenschaftlichen Nachbardisziplin, der Ökonomie, verteidigen wollen<sup>26</sup>. Beim näheren Lesen stellt sich dann oft heraus, dass gar nicht die Spieltheorie *an sich* gemeint ist, sondern nur bestimmte Anwendungen

---

<sup>24</sup> John von Neumann und Oskar Morgenstern (1947), S. 44 f. zitiert nach Deutsch (1973), S. 103.

<sup>25</sup> Vgl. Deutsch (1973), S. 102.

<sup>26</sup> Sie wenden sich vor allem gegen den Anspruch, so ziemlich alle Aspekte menschlichen Handelns mit wirtschaftswissenschaftlichen Methoden zu erklären. Unter dem Schlagwort „Ökonomischer Imperialismus“ ist von GARY BECKER dieser Anspruch offensiv vertreten worden.

der Spieltheorie. Exemplarisch hierfür ist etwa die Arbeit von JUNNE<sup>27</sup>. Auch wenn viele der Kritikpunkte durch die rasante theoretische Entwicklung der Spieltheorie ausgeräumt werden konnten, findet sich dort eine Reihe mehr oder weniger konstruktiver Überlegungen, welche nach wie vor von Interesse sind.

Nach der Auffassung von JUNNE besteht bei spieltheoretisch geprägten Arbeiten eine beträchtliche Gefahr in eine oder mehrere der folgenden "Fallen" zu geraten:

- Nullsummen-Falle
- Zwei-Personen-Falle
- Symmetrie-Falle

Aus heutiger Sicht ist die Relevanz der erst genannten (Nullsummen-)Falle kaum mehr gegeben<sup>28</sup>. Die beiden anderen Gefahren sind jedoch nach wie vor von großer Bedeutung. Nun soll freilich nicht behauptet werden, dass man bei spieltheoretischen Modellen entsprechende Fehler zwangsläufig begeht – nicht einmal JUNNE ging soweit. Allerdings ist zuzugeben, dass wegen der notwendigen Abstraktion, die bei jeder Modellbildung stattfindet, sehr häufig zu stark vereinfacht wird. Da Zweier-Beziehungen *einfacher zu analysieren* sind als solche mit sehr vielen Beteiligten, lässt sich leicht nachvollziehen, warum nach wie vor der Großteil spieltheoretisch geprägter Abhandlungen Zwei-Personenspiele behandelt. Noch entscheidender: Zwei-Personenspiele können *einfach illustriert* werden.

Die Symmetrie-Falle ist eine doppelte, wie JUNNE richtig erkannt hat. Zum einen kann es vorkommen, dass Situationen die eigentlich als symmetrisch zu behandeln wären, dadurch *gelöst* werden, dass willkürlich eine Seite bevorzugt wird<sup>29</sup>. Zum anderen – und im Rahmen dieser Arbeit wichtiger – besteht die Gefahr, dass aus Vereinfachungsgründen Symmetrie unterstellt wird, obwohl in Wirklichkeit keine vorliegt. Auf diese Weise kann man dann zwar mit der Analyse weiterkommen, aber man analysiert schlicht fehlerhaft, falls beispielsweise der *Heterogenität* von Akteuren eine wesentliche Bedeutung zukommt.

---

<sup>27</sup> Vgl. Junne (1972).

<sup>28</sup> Der Focus bei spieltheoretischen Arbeiten hat sich in den letzten Jahrzehnten sehr stark auf die Analyse von mixed-motive-Spielen verschoben, bei welchen sowohl gegensätzliche als auch gemeinsame Interessen der Spieler relevant sind (vgl. Schelling (1960) als eine Arbeit, die in dieser Hinsicht der Zeit voraus war).

<sup>29</sup> JUNNE kann auch belegen, dass bei einigen der von ihm kritisierten Arbeiten genau dieses vorgekommen *ist*, und zwar insbesondere dort, wo es um die Analyse des Supermacht Konflikts zwischen den USA und der damaligen UdSSR ging. Vgl. Junne (1972), S. 154ff.

Wie viele andere Sozialwissenschaftler kritisiert JUNNE zudem, dass nur die Nutzenbewertungen derjenigen Akteure Eingang in die spieltheoretischen Modelle finden, welche aktiv Entscheidungen treffen. Hiermit verbunden sind meist Angriffe auf die moralische Substanz der gesamten wissenschaftlichen Methodik<sup>30</sup>. Auf diesen Punkt wird im Zusammenhang mit der Umweltproblematik noch zurückzukommen sein, denn in der Tat kann man unter dem Stichwort Generationengerechtigkeit problematisieren, dass zukünftige Generationen die Entscheidungen von heute ausbaden müssen<sup>31</sup>.

### 2.3.2 Dezentrale Verteilung von Information

Würde die Spieltheorie im strengen Sinne erfordern, dass alle Spieler sämtliche Auszahlungen kennen (somit auch die Auszahlungen der jeweils anderen Spieler), so könnte bereits das einleitend skizzierte Beispiel mit den drei Fischzüchtern nicht mit den Mitteln der Spieltheorie untersucht werden. Durch die sogenannte *Harsanyi-Transformation* ist dieses Hindernis aus dem Weg geräumt. Der Trick besteht darin, dass man mit einem initialen Zufallszug jedes Spiel mit *unvollständiger* Information in ein Spiel mit vollständiger, aber *unvollkommener* Information<sup>32</sup> umwandeln kann.

#### Illustriert am Beispiel mit den drei Fischzüchtern:

Angenommen, es seien genau *fünf Typen* von Fischzüchtern möglich und diese hätten aus der Kläranlage jeweils einen Nutzen von 0 NE, 50 NE, 100 NE, 150 NE oder 200 NE. Jeder der drei Fischzüchter soll nur seinen eigenen Typ kennen. Nach dem Prinzip des unzureichenden Grundes wird für jeden der Typen dieselbe a priori-Wahrscheinlichkeit von 20% angenommen.

---

<sup>30</sup> Hier handelt es sich allerdings um ein Missverständnis auf Seiten der Kritiker. Sofern es Erkenntnisinteresse einer spieltheoretischen Analyse ist, zu prognostizieren wie sich Entscheidungsträger in einer gegebenen Situation verhalten werden, *dürfen* nur die Nutzenbewertungen dieser Entscheidungsträger Eingang in das Modell finden. Davon unbenommen ist die Möglichkeit, dass der Modellierer *von außen* die Spielergebnisse bewertet, etwa um Spielsituationen zu klassifizieren, die aus seiner Sicht besser vermieden werden sollten, da sie voraussichtlich zu nicht wünschbaren Ergebnissen führen werden (wie etwa beim Gefangendilemma).

<sup>31</sup> Vgl. die Ausführungen in Abschnitt 3.3 zum Diskontfaktor.

<sup>32</sup> Bei unvollkommener Information werden nicht alle Spielzüge beobachtet. Es besteht deshalb evtl. Unsicherheit, in welchem Teil eines Spielbaumes sich ein Spieler befindet (zum Spielbaum vgl. die extensive Darstellungsform im Anhang). Bei der Harsanyi-Transformation wird das ursprüngliche Spiel, bei dem die Spieler 1, ..., n beteiligt sind, um einen Spieler 0 erweitert (oft als "*Nature*" oder "*Chance*" bezeichnet). Dieser Spieler 0 führt dann den initialen Zufallszug aus. Aus dem ursprünglichen Spiel, bei dem Unsicherheit über die Auszahlungen bestand, wird so ein *vollständiges* Spiel, denn nun sind alle Auszahlungen bekannt. Allerdings ist das transformierte Spiel *unvollkommen*, denn der Zug des Spielers 0 wird von den anderen Spielern nicht beobachtet.

Ein initialer Zufallszug würde in diesem Fall jede der 125 ( $= 5 \cdot 5 \cdot 5$ ) möglichen Konstellationen mit gleicher Wahrscheinlichkeit auswählen. Statt einem Spiel mit *unvollständiger* Information wären dann 125 Teilspiele mit jeweils vollständiger Information zu betrachten. Keiner der Fischzüchter wüsste jedoch mit Sicherheit in welchem der Teilspiele er sich befindet, und deshalb wäre das transformierte Spiel in seiner Gesamtheit ein Spiel mit *unvollkommener* Information. Weil jeder Fischzüchter seinen eigenen Typ kennt, könnte die genannte Unsicherheit aber auf jeweils 25 mögliche Konstellationen begrenzt werden, die wegen der angenommenen a priori-Wahrscheinlichkeiten alle gleich wahrscheinlich sind<sup>33</sup>.

**Zusammengefasst:** Um modellieren zu können, dass Spieler *nicht alles genau wissen*, muss ihnen letzten Endes noch viel mehr Information mitgegeben werden, die zudem äußerst schwierig handhabbar ist. Einerseits kann also der Sachverhalt *dezentral verteilter Information* formal völlig korrekt behandelt werden. Andererseits werden die Aufgaben, die ein Spieler zu bewältigen hat, nicht einfacher. Es müssen zwar nicht alle Charakteristika der Gegenspieler bekannt sein. Dafür müssen aber die *Wahrscheinlichkeitsverteilungen* über die Typen bekannt sein. Erschwerend kommt hinzu, dass nun *Bayes-Nash-Gleichgewichte* zu berechnen sind. Wie üblich wird vorausgesetzt, dass alle Spieler diese Techniken beherrschen und folgerichtig einkalkulieren, dass die jeweils anderen Spieler die genannten Techniken gleichfalls einsetzen werden.

Auch wenn aufgrund der Harsanyi-Transformation sparsamere Informationsanforderungen ausreichen, mit Blick auf die *Rationalitätsanforderungen* kommt man so gewiss zu keiner Erleichterung. Diese Anforderungen bleiben immens, und deshalb drängt sich die Frage nach Alternativen geradezu auf.

### 2.3.3 Konzept der begrenzten Rationalität

Wenn in der Realität Entscheidungen zu treffen sind, so verbietet es sich oft bereits aus Zeitgründen, sämtliche Alternativen einer ausführlichen Bewertung zu unterziehen. Bereits bei

---

<sup>33</sup> Es kann noch komplizierter werden, denn bei vollständig rationalem Verhalten müssten die Spieler ihre a-priori-Wahrscheinlichkeiten aktualisieren, sobald sie Züge ihrer Gegenspieler beobachten. Dazu wäre dann der Satz von Bayes anzuwenden. Auf eine detaillierte Beschreibung des Sachverhalts wird hier verzichtet, denn dazu müsste erst das Konzept des Informationsbezirks eingeführt werden (vgl. dazu Rieck (1993), S. 92ff, sowie allgemein Holler und Illing (2005), S. 12ff zur extensiven Spielform).

einer halbwegs komplexen Entscheidungssituation ist die Informationsverarbeitungskapazität schnell überfordert, würde man alle theoretischen Eventualitäten berücksichtigen wollen.

Jeder Schachspieler weiß, wovon die Rede ist: Im Prinzip stehen dem Spieler nämlich alle Informationen zur Verfügung, die er zur optimalen Entscheidung benötigt. Alle möglichen Zugfolgen sind bekannt. Es gibt keine Zufallsereignisse. In der Praxis ist es jedoch unmöglich, sämtliche Informationen schnell genug zu verarbeiten und dies gilt nicht nur für menschliche Entscheidungsträger, denn bekannterweise scheitern auch die modernsten Rechenmaschinen an der Aufgabe mittels der Brute-Force-Methode Normalstellungen im Schach zu lösen. In der Praxis ist man also gezwungen, irgendwann das Sammeln weiterer Informationen und das Abwägen weiterer Alternativen einzustellen. Man muss dann trotz unvollständigem Informationsstand entscheiden. In diesem Sinne können Entscheidungsträger also lediglich in der Theorie vollständig rational handeln und *optimale* Alternativen auswählen. In der Praxis ist oft nur eine *befriedigende* Lösung erreichbar. HERBERT ALEXANDER SIMON hat in diesem Zusammenhang den Begriff der „*bounded rationality*“ eingeführt (*beschränkte Rationalität*).

GIGERENZER und SELTEN weisen darauf hin, dass beschränkt rationales Verhalten auf keinen Fall mit irrationalem Verhalten verwechselt werden darf. Ebenfalls verfehlt ist aus ihrer Sicht der Versuch, das übliche Optimierungskalkül im Grunde beizubehalten und dieses dann dadurch zu modifizieren, dass zusätzlich explizit die Entscheidungskosten mit einbezogen werden<sup>34</sup>. Vielmehr zeichnen sich Modelle beschränkter Rationalität dadurch aus, dass simple Suchregeln, Stoppregeln und Entscheidungsregeln angewendet werden<sup>35</sup>.

Nun gestaltet sich aber eine adäquate Modellierung eines solchen Rationalitätskonzepts im Rahmen der traditionellen Spieltheorie als fast unmöglich. HOLLER und ILLING gingen daher noch in der 3. Auflage ihres Buches (1996) so weit zu behaupten, dass auf die ökonomische Theorie »*Simons Ansatz bisher keinen nachhaltigen Einfluss*« gehabt habe. In den neueren Auflagen fehlt dieser Satz, und HOLLER und ILLING bemerken, dass sich »*Spieltheoretiker [...] zunehmend mit Modellen beschränkter Rationalität beschäftigen*«, und zwar vor allem im Bereich der »*evolutionären Spieltheorie*«<sup>36</sup>

---

<sup>34</sup> Gigerenzer und Selten (2001), S. 4f.

<sup>35</sup> Gigerenzer und Selten (2001), S. 8.

<sup>36</sup> Vgl. Holler und Illing (2005), S. 164. Statt *evolutionär* findet genauso häufig das Beiwort *evolutionär* Verwendung. In analoger Weise werden in dieser Arbeit die Begriffe *begrenzte* bzw. *beschränkte* Rationalität als beliebig austauschbar betrachtet.

## 2.4 Grundzüge der Evolutionären Spieltheorie

Im Bereich der *Theoretischen Biologie* findet man ebenfalls Anwendungen der Spieltheorie, etwa um das Verhalten von Tieren in Konfliktsituationen zu erklären – ein zunächst erstaunlicher Sachverhalt, denn wie soll rationales Verhalten im Falle nicht vernunftbegabter Wesen angenommen werden? Noch nicht einmal begrenzte Rationalität eignet sich als Verhaltensannahme. Statt dessen kann für das *individuelle Verhalten* eines Tieres im einfachsten Fall angenommen werden, dass dieses Verhalten genetisch determiniert ist und dass dabei keinerlei strategische Erwägungen von Bedeutung sind.

Interessant wird der Ansatz erst, wenn eine *Population* von Tieren ins Blickfeld genommen wird. Auf dieser Ebene der Population(en) finden dann *evolutionäre Anpassungsprozesse* statt. Unangepasste Verhaltensmuster werden aus dem Genpool ausgeschieden, und es setzen sich solche Strategien durch, die am besten mit ihrer Umwelt zurechtkommen. Obwohl der Auswahl von Strategien keinerlei rationales Kalkül zugrunde liegt, kann es zu *quasirationalem* Verhalten der Gesamtpopulation kommen<sup>37</sup>.

Spätestens seit Mitte der 1990er Jahre ist auch von Seiten der wirtschaftswissenschaftlichen Spieltheoretiker die Relevanz der evolutionären Spieltheorie erkannt worden, was sich etwa in den Arbeiten von BINMORE, SAMUELSON, ZHANG oder WEIBULL niederschlägt<sup>38</sup>. Zu den bekanntesten Konzepten gehören die evolutionsstabilen Strategien sowie die Replikator-Gleichung.

### 2.4.1 Evolutionsstabile Strategien

Ganz generell haben evolutionäre Prozesse immer zwei Aspekte: *Mutation* und *Selektion*. Das Konzept der *evolutionsstabilen Strategie (ESS)* betont dabei einseitig den *Mutationsaspekt*. Ausgangspunkt ist die Vorstellung einer Population, für deren Verhalten der Genpool eine bestimmte (möglicherweise gemischte) Strategie  $p$  vorschreibt.

Die entscheidende Fragestellung lautet nun:

---

<sup>37</sup> Vgl. Rieck (1993), S. 192.

<sup>38</sup> Binmore (1992), Samuelson und Zhang (1992), Samuelson (1993), Weibull (1995).



*Könnte eine kleine Gruppe von Mutanten mit der Strategie  $q$  in diese Population eindringen oder nicht?*

Eine Strategie bzw. eine Strategiemischung wird als *evolutionsstabil* bezeichnet, falls sich *keine andere Strategie* erfolgreich im gegebenen Umfeld durchsetzen kann. Zur Illustration der Idee geht man meist von einem speziellen symmetrischen Zwei-Personenspiel aus<sup>39</sup>.

Als Erste haben MAYNARD SMITH und PRICE die Bedingung für eine ESS wie folgt formalisiert: Eine Strategie  $p$  kann von einer geringen Anzahl von  $q$ -Spielern (Populationsanteil  $\varepsilon \ll 1$ ) nicht verdrängt werden, falls gilt:

$$(1 - \varepsilon) \cdot u(p, p) + \varepsilon \cdot u(p, q) > (1 - \varepsilon) \cdot u(q, p) + \varepsilon \cdot u(q, q) \quad (2)$$

Mit  $u(p, p)$  wird dabei die erwartete Fitnessauszahlung<sup>40</sup> eines  $p$ -Spielers bezeichnet, falls dieser auf einen weiteren  $p$ -Spieler trifft. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist  $(1 - \varepsilon)$ . Entsprechend bezeichnet  $u(p, q)$  die Auszahlung für den  $p$ -Spieler, falls dieser auf einen  $q$ -Spieler trifft. Somit beschreibt die linke Seite der Ungleichung (2) den Gesamterwartungswert für die Fitness eines  $p$ -Spielers. Die rechte Seite von (2) fasst entsprechend die Fitnessauszahlung für den  $q$ -Spieler zusammen. Nun ist die Strategie  $p$  evolutionsstabil, falls sich für jede mögliche Mutanten-Strategie  $q$  eine Schranke  $\bar{\varepsilon}_q$  angeben lässt, so dass für jedes  $\varepsilon \in (0, \bar{\varepsilon}_q)$  die Ungleichung (2) erfüllt ist.

WEIBULL zeigt die Äquivalenz dieser Forderung zu den folgenden beiden Bedingungen<sup>41</sup>:

$$u(p, p) \geq u(q, p), \quad \forall q \quad (3)$$

$$\text{und: falls } u(p, p) = u(q, p) \text{ dann } u(p, q) > u(q, q), \quad \forall q \neq p \quad (4)$$

---

<sup>39</sup> Vgl. Maynard Smith und Price (1973). Dort wurde mit Hilfe des sogenannten Falke-Taube-Spiels das Konzept der ESS eingeführt. Bei dem Spiel handelt es sich um eine symmetrische Konfliktsituation, bei der zwei Tiere um eine Ressource (etwa eine Wasserstelle) konkurrieren. "Falke" bzw. "Taube" bezeichnen dabei nicht unterschiedliche Typen, sondern geben die beiden zulässigen Strategien an (aggressives Verhalten entspricht der Falkenstrategie, nachgiebiges Verhalten der Taubenstrategie).

<sup>40</sup> Es mag als störend empfunden werden, dass hier ergänzend zur Nutzensauszahlung auch noch das Konzept einer *Fitnessauszahlung* eingeführt wird. Wenigstens ist aber die Fitnessauszahlung im Kontext der Theoretischen Biologie völlig unmissverständlich definiert: Es handelt sich um die *erwartete Zahl von Nachkommen*.

<sup>41</sup> Vgl. Weibull (1995), S. 37.

Interessant sind noch die folgenden Beziehungen zum Nash-Gleichgewicht, die zeigen, dass mit der ESS zumindest *implizit* eine *dynamische* Vorstellung verbunden ist.

Gleichung (3) entspricht der Nash-Gleichgewichtsbedingung (1) und Gleichung (4) einer Stabilitätsbedingung. Deshalb kann die ESS auch als eine Verschärfung des Nash-Gleichgewichts betrachtet werden. Beim Vorliegen mehrerer Gleichgewichte kann man sich dieses als Refinement-Konzept zunutze machen. Den Refinementprozess überstehen dann nur solche Gleichgewichte, die zumindest eine lokale Überlegenheit aufweisen. Liegt eine solche Überlegenheit vor, so ist Ungleichung (4) erfüllt, und bei geringfügigen Abweichungen vom Nash-Gleichgewicht kann man sich einen dynamischen Prozess vorstellen, der die Gesamtpopulation wieder zu dem Gleichgewichtszustand zurückführt, indem die eindringenden Mutanten abgewehrt werden.

## 2.4.2 Replikatorgleichung

Die Replikatorgleichung vernachlässigt andererseits den Gesichtspunkt der Mutation und betont einseitig den *Selektionsaspekt*. Der Selektionsprozess wird dabei *explizit dynamisch* beschrieben, indem die Fitnessauszahlung als *Zahl von Nachkommen* interpretiert wird. Folgerichtig gelangt man so zu Verschiebungen der Populationsanteile im zeitlichen Ablauf, die mit Hilfe von Differenzen- oder Differentialgleichungen modelliert werden.

Am Beispiel eines symmetrischen Spiels mit  $k$  Strategien lässt sich die Grundidee in Anlehnung an WEIBULL wie folgt skizzieren:

Die Strategiemischung der betrachteten Population, lässt sich zu jedem Zeitpunkt durch einen Vektor  $p = (p_1, \dots, p_k)$  im  $(k-1)$ -dimensionalen Simplex beschreiben<sup>42</sup>. Die Ecken dieses Simplex sind durch die  $k$  reinen Strategien definiert, welche den Einheitsvektoren  $e^i$ , ( $i = 1, \dots, k$ ), entsprechen.

Für die durchschnittliche Fitnessauszahlung der Population gilt:

$$u(p, p) = \sum_{i=1}^k p_i \cdot u(e^i, p) \quad (5)$$

---

<sup>42</sup> Ein Simplex ist ein konvexes Polyeder. Da die  $p_i$  Wahrscheinlichkeiten entsprechen, müssen alle  $p_i$  nichtnegativ sein. Zudem muss die Summation über alle Wahrscheinlichkeiten 1 ergeben, womit die um 1 verringerte Dimension des Simplex erklärt ist (vgl. Weibull (1995), S. 3).

Jede reine Strategie  $i$ , welche eine überdurchschnittliche Fitnessauszahlung realisieren kann, wird im Zeitablauf ihren Populationsanteil  $x_i$  erhöhen. Nochmals sollte betont werden, dass dieser Zusammenhang evident ist. Die *Währung*, in der gemessen wird, ist die Zahl der Nachkommen. SIGMUND verweist in diesem Zusammenhang auch auf die gemeinsame Wurzel der Wörter *success* und *successor* im Englischen<sup>43</sup>. Umgekehrt muss deshalb auch der Populationsanteil im Falle einer unterdurchschnittlichen Auszahlung sinken. Die Replikatorgleichung (6) beschreibt genau diesen Sachverhalt:

$$\dot{p}_i = [u(e^i, p) - u(p, p)] \cdot p_i \quad , \quad i = 1, \dots, k \quad (6)$$

WEIBULL zeigt, dass die Trajektorien der Replikatordynamik den Strategiensimplex nicht verlassen<sup>44</sup>. Außerdem sind alle Nash-Gleichgewichte stationäre Punkte dieser Dynamik, denn falls  $p$  ein Gleichgewicht darstellt und die Strategie  $i$  in diesem Gleichgewicht verwendet wird, so muss  $u(e^i, p)$  gerade der durchschnittlichen Auszahlung  $u(p, p)$  entsprechen. Für alle anderen Strategien  $j$ , welche im Gleichgewicht *nicht* verwendet werden, dagegen gilt  $p_j = 0$  und damit  $\dot{p}_j = 0$ .

Die Umkehrung dieser Aussage gilt nicht. Stationäre Punkte müssen kein Nash-Gleichgewicht sein. Insbesondere folgt aus (6) unmittelbar, dass alle Ecken  $e^i$  des Simplex trivialerweise ebenfalls stationäre Punkte sind, denn für alle  $j \neq i$  gilt dann  $p_j = 0$  und damit  $\dot{p}_j = 0$ .

Von Interesse sind noch die vielfältigen Bezüge der Replikatorgleichung zur klassischen Spieltheorie, aber auch zu anderen Wissenschaftsbereichen. So zeigt etwa WEIBULL, dass alle strikten Nash-Gleichgewichte asymptotisch stabile Punkte des dynamischen Systems (6) sein müssen. HOFBAUER und SIGMUND belegen den engen Zusammenhang zu den Volterra-Lotka-Gleichungen. Besonders wichtig sind die Beziehungen zu Modellen menschlichen Imitationsverhaltens. In Abschnitt 5.4.2 werden diese Aspekte wieder aufgegriffen.

---

<sup>43</sup> Vgl. Sigmund (1995), S. 123.

<sup>44</sup> Vgl. Weibull (1995), S. 74.

## 2.5 Bewertung aus kybernetischer Sicht

Um es vorwegzunehmen: Die Beurteilung der Brauchbarkeit wird sich *nicht* am Realitätsgehalt der jeweiligen Modelle orientieren! Weder die nicht-kooperative noch die evolutionäre Spieltheorie sind “*realistisch*“. Die nicht-kooperative Spieltheorie operiert mit einem Konzept der Hyper-Rationalität. Die evolutionäre Variante unterstellt z. B. unendlich große Populationen. Die Vertreter beider Richtungen wissen, dass derartige Annahmen lediglich gedankliche Hilfskonstruktionen sind. Wenn damit bewusst umgegangen wird, so ist die Realitätsferne nicht zu kritisieren. Statt dessen ist zu fragen, wie *zweckdienlich* die Hilfskonstruktionen jeweils sind, um spezifische Fragestellungen zu bearbeiten.

So schafft es etwa die klassische Spieltheorie nur mit Hilfe ihrer weitreichenden Rationalitätsanforderungen, den *unendlichen Regress* zu zerschlagen, der zu entstehen droht, wenn Spieler A die optimale Antwort auf Spieler B's Verhalten sucht, dabei aber berücksichtigen muss, dass bei der Abschätzung von B's Verhalten wiederum A's Strategie einzufließen hat. Aufgrund des Gesetzes der großen Zahlen erreicht die evolutionäre Spieltheorie mit Hilfe der Annahme unendlich großer Populationen, dass letzten Endes kein stochastischer Prozess untersucht werden muss. Statt dessen kann eine *deterministische* Dynamik, etwa in Form der Replikator-Gleichung, abgeleitet werden. Beide *Spielarten* – die klassische und die evolutionäre Spieltheorie – haben also etwas für sich und die jeweils damit verbunden Hilfsannahmen haben einige Berechtigung.

Um zu entscheiden, welche Konzepte für den *mit dieser Arbeit verfolgten Zweck* passend sind, wird im Folgenden der Blick auf die jeweiligen Defizite gelenkt:

- **Replikator-Gleichung:** Ein wesentlicher Nachteil besteht darin, dass der *Mutationsaspekt* bei der Standardform ausgeblendet ist. Wenn also eine Strategievariante im evolutionären Prozess einmal ausgeschieden ist, so hat sich die Variantenvielfalt unwiederbringlich reduziert. In Kapitel 5 wird gezeigt, dass bei *Imitationsmodellen* typischerweise genau dieselben Probleme auftreten – aber auch, wie man diese Probleme beheben kann.
- **ESS:** In vielen Fällen erweist sich die ESS als ein nützliches Konzept zur Verfeinerung von Nash-Gleichgewichten. Dieses hat aber folgende Schattenseite: Zwar hat jedes Spiel – wie beschrieben – mindestens ein Nash-Gleichgewicht, aber nicht jedes Spiel hat eine Lösung in evolutionsstabilen Strategien. Wäre dem anders, so hätte möglicherweise die

ESS das Nash-Gleichgewicht in seiner Bedeutung abgelöst. Des Weiteren kann es vorkommen, dass eine ESS zwar *dynamisch stabil* ist und dennoch im evolutionären Prozess praktisch *nicht erreicht* werden kann<sup>45</sup>.

- **Nicht-kooperative Konzepte** (etwa Nash-Gleichgewicht, Bayes-Nash-Gleichgewicht): In erster Linie bleibt unklar, *wie* beispielsweise das Nash-Gleichgewicht von den beteiligten Spielern gefunden werden soll. Reale Entscheidungsträger werden bei ihrer Entscheidungsfindung nämlich häufig überfordert sein, wenn sie so vorgehen müssten, wie der klassische Spieltheoretiker.

Insgesamt fällt die Entscheidung über den *Baukasten* für den Simulationsansatz wie folgt aus: Die hauptsächlich verwendete *Werkzeugart* sind dynamische Anpassungsprozesse, bei denen unterschiedliche Teilmodelle (Replikatorgleichung, Imitationsmodelle, etc.) zur Verfügung gestellt werden. Damit während des dynamischen Prozesses die Vielfalt von Strategien nicht verloren geht, wird zusätzlich (wie bei der ESS) eine *Mutationskomponente* hinzugefügt. Die nicht-kooperativen Konzepte werden für analytische Zwecke der Vor- und Nachbetrachtung eingesetzt.

Um Modelle der evolutionären Spieltheorie anwenden zu können, muss kein Spieler irgendwelche Vorstellungen bezüglich der Präferenzen anderer Spieler bilden. Die Spieler müssen sich nicht einmal ihrer eigenen Präferenzen bewusst sein. Es genügt im Grunde, wie WEIBULL gezeigt hat<sup>46</sup>, dass Spieler einen Level der Zufriedenheit haben und in Abhängigkeit von diesem mehr oder weniger oft nach Alternativen suchen. Mit anderen Worten: Präferenzen (oder zumindest Interessen bzw. Fitnesskennziffern) sind zwar vorhanden, müssen aber von den Spielern nicht bewusst reflektiert werden. Nur deshalb kann übrigens die evolutionäre Spieltheorie auch in der theoretischen Biologie eingesetzt werden. Werden die Präferenzen (Interessen) schlecht erfüllt, so führt dies zu verstärkter Adaption des Verhaltens.

Insgesamt kommt die evolutionäre Spieltheorie also mit weitaus sparsameren Rationalitätsannahmen aus als die nicht-kooperative Spieltheorie. Dies ist durchaus als

---

<sup>45</sup> Vgl. Sigmund (1995), S. 302f für dieses paradoxe Resultat.

<sup>46</sup> Vgl. Weibull (1995), S. 153f.

erheblicher Vorteil<sup>47</sup> zu werten, was den derzeit anhaltenden Boom bei der Entwicklung evolutionärer Modelle weitgehend erklären mag. Indessen ist zu prüfen, ob dieser Enthusiasmus nicht verfrüht ist, denn man handelt sich zusätzliche Arbeit ein, weil Entscheidungs- bzw. Anpassungsprozesse explizit zu modellieren sind.

In dem Zusammenhang sei noch abschließend bemerkt, dass evolutionäre und nicht-kooperative Spieltheorie keineswegs gegeneinander in Stellung gebracht werden müssen. Gerade in jüngerer Zeit sind vielversprechende Versuche unternommen worden, die unterschiedlichen Sichtweisen in geeigneter Weise zu verbinden. So argumentieren etwa GÜTH und STADLER, dass bei einer klassischen nicht-kooperativen Analyse für das augenblickliche Verhalten eines Spielers ausschließlich der *“Schatten der Zukunft“* relevant ist<sup>48</sup>. Eine pur evolutionäre Betrachtung lässt dagegen gar keinen Raum für zweckgerichtete Erwägungen, sondern erklärt das gesamte Verhalten aus dem *“Schatten der Vergangenheit“*. Weil beide Erklärungsformen unvollständig sind, spricht vieles für eine Kombination der Modelle.

---

<sup>47</sup> Positiv zu vermerken ist zudem, dass die evolutionäre Spieltheorie eine unkomplizierte Interpretation gemischter Strategien erlaubt.

<sup>48</sup> Vgl. Güth und Stadler (2007). Der Terminus *“Schatten der Zukunft“* wurde von AXELROD geprägt (vgl. dazu auch S. 51f in dieser Arbeit). Was damit gemeint ist, kann aber auch unmittelbar der Diskussion zur Vorgehensweise bei wiederholten Spielen entnommen werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Dort wurde rückwärts, ausgehend vom Ende des Spiels, die rationale Gesamtstrategie im wiederholten Wohngemeinschaftsdilemma kalkuliert.

### 3 Umweltökonomische Grundlagen

» *Selten haben wir [Ökonomen] uns so sehr als Vorreiter profiliert wie gerade in Umweltfragen; selten ein Problem so vollständig gelöst, selten aber auch in so fruchtloser Weise.* «

(Erich Streissler)<sup>49</sup>

In der Tat hat der Ökonom ARTHUR CECIL PIGOU bereits in den 1920er Jahren eine wegweisende Arbeit in diesem Kontext vorgelegt<sup>50</sup>, zu einer Zeit, als Umweltfragen in der öffentlichen Debatte so gut wie keine Rolle spielten. In Abschnitt 3.2 wird unter der Überschrift PIGOU-COASE-Kontroverse darauf noch detailliert eingegangen. Zuvor werden in Abschnitt 3.1 die Begriffe der externen Effekte und des öffentlichen Gutes präzisiert. In Abschnitt 3.3 wird gezeigt, dass typische Aspekte vieler Umweltprobleme deren Behandlung als Kooperationsproblem erfordern. Im Anschluss werden die betrachteten Kooperationsprobleme wiederum auf ein Informationsproblem zurückgeführt. Mit einer Kritik der neoklassischen Umweltökonomie (Abschnitt 3.4) schließt dieses Kapitel ab.

#### 3.1 Öffentliche Güter und externe Effekte

##### 3.1.1 Externe Effekte und Pareto-Effizienz

Um zu erklären, was ein externer Effekt ist, bemüht WEIMANN ein Beispiel, bei dem ebenfalls die Fischzucht eine Rolle spielt<sup>51</sup>. Anders als in der Einleitung dieser Arbeit ist jedoch nur *ein* Fischzüchter betroffen. Auf der anderen Seite kommt ein Papierfabrikant ins Spiel. Anstatt von prinzipiell gleich gerichteten Interessen (wie in der Einleitung) sind nun also zunächst *gegensätzliche* Interessen von Bedeutung.

Durch den Betrieb der Papierfabrik wird nämlich der Fischzüchter in seiner Tätigkeit beeinträchtigt. Zu Illustrationszwecken genügt die vereinfachende Annahme, dass beide Unternehmen jeweils nur den Faktor Arbeit als Produktionsfaktor einsetzen müssen. Die jeweils

---

<sup>49</sup> Streissler (1993), S. 87, zitiert nach Hinterberger, Luks und Stewen (1996), S. 157.

<sup>50</sup> Vgl. Pigou (1923).

<sup>51</sup> Vgl. Weimann (1990) sowie Weimann (2006), S. 378ff.

eingesetzte Menge an Arbeit wird mit  $l_p$  bzw.  $l_F$  bezeichnet und die als Produktionsergebnis resultierenden Ausbringungsmengen mit  $X_p$  bzw.  $X_F$ .

Formal beschreibt die folgende Produktionsfunktion die Ausbringungsmenge der Papierfabrik:

$$X_p = X_p(l_p) \quad (7)$$

Die Ausbringungsmenge des Fischzüchters hängt jedoch nicht nur vom eigenen Arbeitseinsatz  $l_F$  ab, sondern auch von der Abwasserbelastung  $a(X_p)$  durch die Papierfabrik:

$$X_F = X_F(l_F, a(X_p)) \quad (8)$$

Umweltökonomien sprechen dann von einem externen Effekt, wenn sich die Wirkungen am Preissystem vorbei entfalten.

*Weshalb kommt es aus Sicht des Ökonomen dann zu einem Problem?*

Die Entscheidung, wie viel vom Faktor Arbeit in der Papierproduktion eingesetzt werden soll, trifft alleine der Papierfabrikant, und er wird auch nicht bereit sein, den Fischzüchter an dieser Entscheidung zu beteiligen. In sein Kalkül muss der Papierfabrikant nur drei Informationen einbeziehen: Er muss die Produktionsfunktion (7) kennen. Außerdem berücksichtigt er jeweils die Preise für eine Einheit Arbeit bzw. eine Einheit Papier. Weil das Abwasser keinen Preis hat, spielt es keine Rolle. Der Papierfabrikant trägt also nicht *alle* Folgen seines Handelns, sondern nur die mit Preisen bewerteten. Erfordert eine Ausweitung seiner Produktion einen erhöhten Arbeitseinsatz, so wird er die damit verbundenen Zusatzkosten abwägen, die zusätzliche Beeinträchtigung der Fischproduktion dagegen nicht.

Dem Fischzüchter wiederum bleibt bei erster Betrachtung nichts anderes übrig, als diese Beeinträchtigung in der Form von  $a(X_p)$  als Faktum hinzunehmen. Ansonsten wird er völlig analog vorgehen: Er hat die Produktionsfunktion (8) zu kennen und berücksichtigt den Preis für eine Einheit Arbeit und diesmal den Preis für eine Einheit Fisch<sup>52</sup>.

Diese idealtypische Darstellung hat den Vorteil, das Wesen des Externalitätenproblems auf das notwendige Minimum reduziert zu haben. An der Entscheidung über das Ausmaß der Externalität  $a(X_p)$  ist genau einer *beteiligt*: der Papierfabrikant. *Betroffen* von der Externalität

---

<sup>52</sup> Diese hochgradig vereinfachte Beschreibung gibt das neoklassische Standardmodell wieder. Es sollte noch erwähnt werden, dass dabei alle genannten Preise als gegeben betrachtet werden. Zudem wird atomistische Konkurrenz unterstellt und somit ist keine strategische Einflussnahme die Preise möglich.



ist ebenfalls genau einer: der Fischzüchter. Der *Beteiligte hat keinen Anreiz* zu der Reduktion von  $a(X_p)$ . Der *Betroffene hat keine Möglichkeit* dazu<sup>53</sup>.

### Das Kriterium der Pareto-Effizienz

Die gesamte wirtschaftswissenschaftliche Richtung der Neoklassik – und damit auch die Umweltökonomie – ist dem sogenannten *methodologischen Individualismus* verpflichtet<sup>54</sup>. Eine Folge davon ist die Ablehnung intersubjektiver Nutzenvergleiche. Viele Urteile darüber, ob ein gesellschaftlicher Zustand einem anderen vorzuziehen ist, verbieten sich dann aus wissenschaftlicher Sicht und werden folgerichtig in den Bereich des Werturteils verwiesen. Der neoklassische Wirtschaftswissenschaftler kann deshalb insgesamt recht wenig über Wünschbarkeit gesamtgesellschaftlicher Zustände aussagen – mit einer sehr bedeutenden Ausnahme. Damit in Zusammenhang steht der Begriff des *Pareto-Optimums*.

Ein gesellschaftlicher Zustand ist Pareto-effizient bzw. die Gesellschaft befindet sich in einem Pareto-Optimum, wenn kein Individuum besser gestellt werden kann, ohne dabei zugleich ein anderes Individuum schlechter zu stellen. Das Pareto-Kriterium ist besonders hilfreich im Zusammenhang mit der Theorie der Tauschakte. Man stelle sich etwa zwei Individuen A und B vor, von denen ursprünglich A mit einer Armbanduhr und B mit einem Fahrrad ausgestattet sind. Falls A lieber das Fahrrad hätte und B lieber die Armbanduhr, so werden sie tauschen – und zwar *freiwillig*. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass auch jeder andere denkbare freiwillige Tauschakt definitionsgemäß zu einer Pareto-Verbesserung führen muss.

### 3.1.2 Formen öffentlicher Güter

Ein (reines) öffentliches Gut unterscheidet sich von den eben genannten privaten Gütern einmal dadurch, dass durch den Konsum eines Individuums die Konsummöglichkeiten von anderen Individuen nicht eingeschränkt werden. Ökonomen benennen diesen Sachverhalt mit dem Begriff „*Nichtrivalität im Konsum*“. Beispielhaft genannt werden können hier „frische Luft“ oder „sauberes Wasser“. Die zweite Unterscheidung bezieht sich darauf, dass bei öffentlichen Gütern kein Ausschluss einzelner Individuen vom Konsum stattfindet.

---

<sup>53</sup> Vgl. dazu auch Kirsch (1997), S. 26. Dort werden zwei prinzipielle Ansätze diskutiert: entweder *die Betroffenen zu beteiligen* oder aber *die Beteiligten betroffen zu machen*. In Abschnitt 4.2 kommt diesem Grundgedanken zentrale Bedeutung zu.

<sup>54</sup> Vgl. Weimann (2006), S.11f.

	Rivalität gegeben	Keine Rivalität
Konsumausschluss	<b>Private Güter</b>	<b>Clubgüter</b>
Kein Ausschluss	<b>Allmende-Güter</b>	<b>Rein öffentliche Güter</b>

**Abbildung 3-1: Formen öffentlicher Güter** (in Anlehnung an Weimann (2006), S. 133)

Nun können die Übergänge fließend sein, alleine schon deshalb weil man sich theoretisch immer vorstellen kann, dass ein diskriminierender Konsumausschluss stattfindet, wenn auch zu exorbitant hohen Kosten. Des Weiteren können sich langfristige Verschiebungen ergeben, wenn bei Gütern, die bislang als rein öffentliche Güter betrachtet wurden, Übernutzungseffekte auftreten. Zuweilen wird die Einordnung auch deshalb ambivalent, weil zyklische oder zufällige Effekte zu berücksichtigen sind. Beispielsweise kann eine typische Autobahn nachts als rein öffentliches Gut betrachtet werden (zumindest solange keine Maut erhoben wird, wie derzeit noch in der Bundesrepublik Deutschland meist üblich). Während der Hauptverkehrszeit wird jedoch aus derselben Autobahn ein *Allmende*-Gut.

Neben den definitorischen Abgrenzungen ist ein weiterer Unterschied von Bedeutung, der sich aus der Logik der Sache ergibt:

*Individuen können **nicht** alleine über die Nachfrage nach einem rein öffentlichen Gut bestimmen.*

Bei rein privaten Gütern ist dies offensichtlich anders. Jede oder jeder kann so viele Armbanduhren ansammeln, wie er oder sie möchte. Jemand anders kommt ganz ohne Uhr aus und besitzt dafür mehrere Fahrräder. Bei einem rein öffentlichen Gut haben *alle* zwingend dasselbe Versorgungsniveau. Unterschiedliche Präferenzen können sich *nicht* in einem unterschiedlichen Versorgungsniveau ausdrücken. Über die Erstellung oder Nicht-Erstellung eines öffentlichen Gutes muss also letztlich *kollektiv* entschieden werden.

Zum Gebiet der Kollektiventscheidungen gibt es einen eigenen umfangreichen Theorienzweig, der an dieser Stelle unmöglich im Detail ausgeführt werden kann. Es genügt hier der Hinweis auf das sogenannte *Unmöglichkeitstheorem* von ARROW. Dieser versuchte axiomatisch eine Reihe von *vernünftigen* Kriterien zu formulieren, anhand derer die Rationalität von sozialen Entscheidungsregeln zu beurteilen wäre. Bereits wenige harmlos klingende Bedingungen wie

etwa Pareto-Prinzip und das *Nicht-Diktator-Prinzip* erwiesen sich dabei als unvereinbar. Mit dem Nicht-Diktator-Prinzip soll ausgeschlossen werden, dass die soziale Entscheidungsregel unter allen Umständen genau zu demselben Ergebnis führt, welches ein einzelnes (bestimmtes) Individuum ebenfalls bevorzugt hätte. Die soziale Entscheidungsregel würde dann nämlich exakt die Präferenzen dieses bestimmten Individuums reflektieren, und es wäre deshalb so, als wenn ein Diktator entschieden hätte. Vor diesem theoretischen Hintergrund ist nun eher zu verstehen, warum in manchen Arbeiten die Vorstellung eines *wohlwollenden Diktators* oder eines wohlwollenden *sozialen Planers* auftaucht<sup>55</sup>. Auch wenn es fraglich bleibt, ob dieser wohlwollende Planer alle notwendigen Informationen bekommen wird, um Pareto-Effizienz sicherzustellen, so ist die Grundidee nachvollziehbar. Unter Wirtschaftswissenschaftlern herrscht Einigkeit, dass bei Vorliegen externer Effekte der sogenannte erste Hauptsatz der Wohlfahrtsökonomie *nicht* gilt<sup>56</sup>. Gesucht sind also Internalisierungsstrategien.

### 3.2 PIGOU-COASE-Kontroverse

#### Die PIGOU-Steuer als Mittel zur Internalisierung externer Effekte

In Abbildung 3-2 ist die Wirkungsweise dieser Internalisierungsstrategie dargestellt. Ohne PIGOU-Steuer wird der Papierfabrikant solange zur Emissionsausweitung beitragen, solange er sich einen Vorteil daraus verspricht. Im Ergebnis ist dann das Emissionsniveau durch den Zustand  $x_1$  gekennzeichnet.

PIGOU führt nun einen Steuersatz in der Höhe  $t^*$  pro Emissionseinheit ein. Dadurch wird das Kalkül des Papierfabrikanten so verändert, dass die Produktionsausweitung nur bis zu dem Punkt stattfindet, bei dem der Grenznutzen gerade dem Steuersatz  $t^*$  entspricht. Um den optimalen Steuersatz, bei dem gerade das Emissionsniveau  $x^*$  resultiert, zu bestimmen, benötigt der Staat die genaue Kenntnis sämtlicher Grenznutzen- und Grenzschadensfunktionen. Wie erwähnt sind evtl. mehrere Fischzüchter betroffen. Dann müssen die Grenzschäden für die Gesamtheit bekannt sein.

---

<sup>55</sup> Vgl. Hinterberger, Luks und Stewen (1996) sowie Weimann (2006), S. 200ff.

<sup>56</sup> Vgl. Weimann (2006), S. 105ff zu den Bedingungen, bei denen dieser Hauptsatz gilt. Falls alle notwendigen Bedingungen erfüllt sind und damit ein sogenanntes *allgemeines Gleichgewicht* vorliegt, so garantiert ein rein dezentraler Mechanismus (etwa ein Preismechanismus) bereits Pareto-Effizienz.

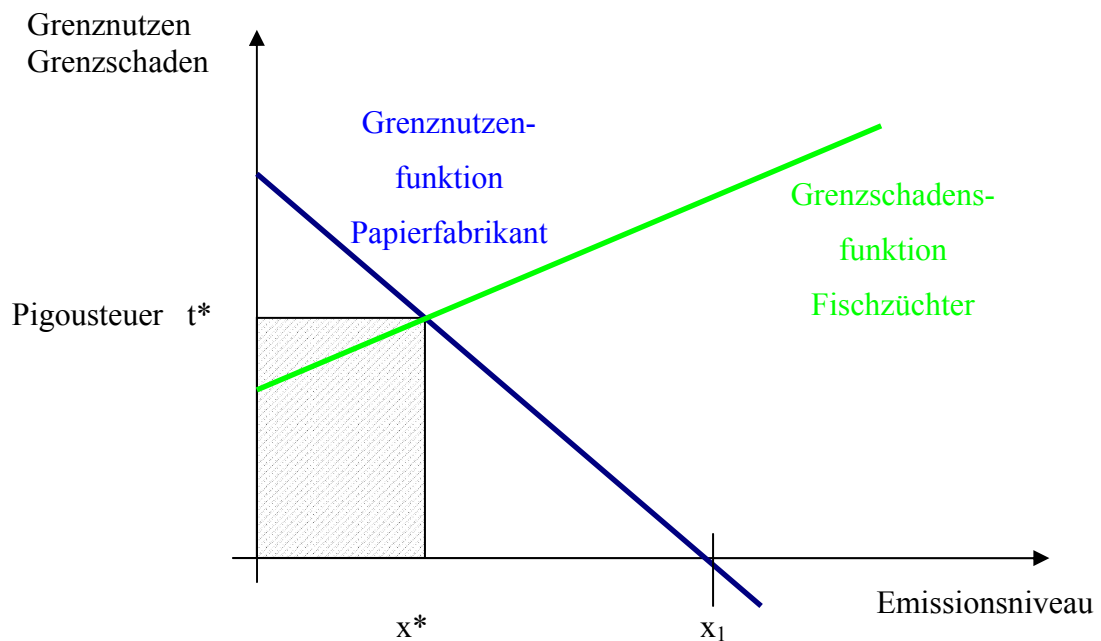


Abbildung 3-2: Prinzip der Pigou-Steuer

Wichtig ist es noch, zwei mögliche Missverständnisse auszuräumen: Erstens, der Steuersatz  $t^*$  hat *nicht* die Aufgabe, die externen Kosten zu reflektieren, die im Status quo auftreten – man sieht leicht, dass der Grenzschaten für das Emissionsniveau  $x_1$  höher ist als der optimale Steuersatz  $t^*$ . Zweitens, es ist erst recht nicht das Ziel, ein maximales Steueraufkommen zu erreichen. Es ist leicht vorstellbar, dass bei einem anderen Steuersatz die schraffierte Fläche größer wird.

### Das COASE-Theorem als alternative Internalisierungsstrategie

Die Theorie von PIGOU hat sich lange unwidersprochen gehalten. Eben weil die Neoklassiker am reibungslosen Funktionieren der Märkte interessiert sind, musste sie jede Störung beunruhigen, die den ersten Hauptsatz der Wohlfahrtsökonomie in Frage stellt. Es war – und ist – allgemein anerkannt, dass bei externen Effekten *zunächst* ein Tatbestand des sogenannten Marktversagens vorliegt. Lange Zeit war auch Konsens, dass deshalb die effiziente Allokation von öffentlichen Gütern einen der wenigen Fälle darstellt, bei dem ein Eingriff des Staates wünschenswert sein könnte. Gerade dieser zuletzt genannte Konsens wurde 1960 von COASE in Frage gestellt. Er postulierte, dass es eines solchen Eingriff des Staates keineswegs bedürfe und dass dieser evtl. mehr Schaden als Nutzen anrichten könne<sup>57</sup>. Stattdessen betonte er die Möglichkeit, dass externe

<sup>57</sup> Vgl. Coase (1960).

Effekte durch private Verhandlungen vollständig internalisiert werden können. Die Grundidee ist frappierend einfach: Ist ein Zustand nämlich ineffizient – das heißt dann pareto-ineffizient –, so gibt es per Definition die Möglichkeit, ein Individuum besser zu stellen, ohne dass daraus sonst jemand ein Nachteil entsteht. Rationale Akteure werden dies erkennen und in Verhandlungen eintreten.

FEESS begründet, warum eine ernsthafte Analyse der Problematik *nicht* mit dem Instrumentarium der kooperativen Spieltheorie stattfinden darf:

» Fragen wir dazu, ob Coase wirklich *nachgewiesen* hat, daß Verhandlungen zur pareto-effizienten Internalisierung externer Effekte führen. Die Antwort darauf lautet aus methodischen Gründen "Nein": [...] Der Kern der Coaseschen Überlegungen ist, daß die Beteiligten weiterverhandeln, sofern sich noch beide verbessern können. Dies ist die *Prämisse* seiner Schlußfolgerungen. [...] Coase nimmt sein Ergebnis also vorweg. «<sup>58</sup>

Weil also der Zweig der kooperativen Spieltheorie axiomatisch voraussetzt, dass Verhandlungen immer solange fortgesetzt werden, bis ein Pareto-Optimum erreicht ist, kann der *Nachweis* des Theorems auf diese Weise nicht erbracht werden. Allerdings ist es COASE gelungen zu *motivieren*, dass die PIGOU-Steuer nicht unbedingt der Weisheit letzter Schluss sein muss.

### 3.3 Umweltprobleme als Kooperationsproblem

SCHÜSSLER untersucht in seiner Arbeit vier strukturell verwandte Dilemmata<sup>59</sup>. Dabei handelt es sich einmal um die Kooperation in kleinen Gruppen, die Gefährdung der Stabilität sozialer Ordnungen, die mögliche Ausbreitung betrügerischen Verhaltens in anonymen Tauschbeziehungen, und Dilemmata, die bei der Teamproduktion gruppenintern auftreten können. Die genannten Dilemmata werden in eine chronologische Folge eingeordnet. Nach SCHÜSSLER sind für menschliche Gesellschaften zunächst die Kleingruppendilemmata relevant geworden, später (im 16. Jahrhundert) ging es unter der Schlagwort HOBBS-Problem um den Zusammenhalt von großen Gruppen<sup>60</sup>.

---

<sup>58</sup> Vgl. Feess (1995), S. 105, kursive Hervorhebungen durch FEESS.

<sup>59</sup> Vgl. Schüßler (1990), S. 6f.

<sup>60</sup> Der Kampf *jeder gegen jeden* kann nur vermieden werden durch das Errichten einer staatlichen Ordnung. Rechtstaatliche Prinzipien, welche die Durchsetzung vertraglicher Abmachungen gewährleisten, sind dabei ebenfalls elementar. Ohne diese wären Markttransaktionen häufig zu riskant.

Erst noch später – wenn elementare Sicherheitsbedürfnisse gewährleistet sind – kommen die nächsten Dilemmata zum Vorschein, geprägt durch das Entstehen anonymer Märkte und durch das Fortschreiten arbeitsteiliger Produktion.

In seiner Schlussbetrachtung diskutiert SCHÜSSLER ein *fünftes Dilemma*, welches er als „strukturell bössartiger“ einstuft als seine vier Vorgänger. Damit meint er das *Umweltproblem* – aus seiner Sicht gekennzeichnet durch eine hohe Zahl Beteiligter und durch Anonymität. Er klassifiziert das Umweltproblem als ein *n*-Personen-Gefangenendilemma ohne Ausschlussoption.

### 3.3.1 Evolution der Kooperation

Kaum eine Arbeit, die sich mit der Frage beschäftigt unter welchen Bedingungen sich kooperatives Verhalten entwickelt, kommt um das Standardwerk von AXELROD herum<sup>61</sup>. AXELROD untersuchte das iterierte Gefangenendilemma mit einem sogenannten *Turnieransatz*.

In Abbildung 3-3 ist das Basisspiel allgemein dargestellt, das AXELROD in seinen Untersuchungen zugrunde legt. Dabei stehen die Auszahlungswerte *T* für *temptation*, *R* für *reward*, *P* für *punishment* und *S* für *sucker*. Es gilt  $T > R > P > S$ , sonst wäre das Basisspiel kein Gefangenendilemma. Außerdem setzt AXELROD noch voraus, dass  $T + S < 2 \cdot R$ . Diese letzte Bedingung ist wichtig. AXELROD will nämlich das Basisspiel *unendlich* oft wiederholen – oder zumindest *unbestimmt* oft. Wäre  $T + S > 2 \cdot R$  so könnten zwei Spieler, die sich im Zeitablauf abwechselnd ausbeuten, auf Dauer besser abschneiden als bei ständiger beidseitiger Kooperation.

		Spieler 2	
		Kooperieren (C)	Defektieren (D)
Spieler 1	Kooperieren	<i>R</i> , <i>R</i>	<i>S</i> , <i>T</i>
	Defektieren	<i>T</i> , <i>S</i>	<i>P</i> , <i>P</i>

Abbildung 3-3: Das Gefangenendilemma als Basisspiel

---

<sup>61</sup> Vgl. Axelrod (1984). In seinem Umweltökonomiebuch widmet sich auch WEIMANN ausführlich den Arbeiten von AXELROD, vgl. Weimann (1990), S. 77ff.

**Der Turnieransatz von AXELROD<sup>62</sup>**

AXELROD forderte mehrere Spieltheoretiker auf, jeweils ein Computerprogramm einzureichen, das eine Strategie für das iterierte Gefangenendilemma implementiert. Jedes dieser Programme hatte dann gegen jedes andere anzutreten<sup>63</sup>. Das Gewinnerprogramm wurde von ANATOL RAPOPORT eingereicht und implementierte die Strategie Tit-for-Tat (TFT), von der bereits in Abschnitt 2.2.2 die Rede war. Dort wurde gezeigt, dass TFT bei *bekannter endlicher* Anzahl von Spielperioden *und* bei der Annahme *vollständiger Rationalität* keine Kooperation des Gegenspielers induzieren kann.

Völlig anders stellt es sich dar, falls entweder unendlich oft wiederholt wird oder zu einem für die Agenten nicht vorhersehbaren Zeitpunkt das Superspiel abgebrochen wird. In dem Zusammenhang gibt es das sogenannte *Folk-Theorem*, das postuliert, dass bei unendlicher Wiederholung jede Auszahlungskombination auf Dauer implementiert werden kann, die den Spielern mehr garantiert als das, was sie aus eigener Kraft im Basisspiel erreichen können.

Anders als in Abschnitt 2.2.2 war also damit zu rechnen, dass Kooperation induziert werden könnte. Überraschend war der Turniererfolg von TFT aber dennoch. TFT kann nämlich per Definition *keinen einzigen* paarweisen Vergleich gewinnen. Dies macht man sich leicht klar, indem man ein mögliches Szenario für das Abschneiden eines TFT-Spielers gegen einen RANDOM-Spieler beispielhaft darstellt (vgl. Abbildung 3-4):

Runde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TFT	C	C	D	D	C	D	C	C	C	D	C	D
RANDOM	C	D	D	C	D	C	C	C	D	C	D	C

**Abbildung 3-4: Mögliche Spielfolge bei einem iterierten Gefangenendilemma:** In jeder Spielrunde, muss entweder die Aktion Kooperieren (C) oder Defektieren (D) gewählt werden, vgl. dazu das Basisspiel in Abbildung 3-3.

<sup>62</sup> Ausführlicher und zudem sehr lesenswert von SIGMUND dargestellt, vgl. Sigmund (1995), S. 287ff.

<sup>63</sup> Eine solche Vorgehensweise wird auch mit *“Playing the Field“* bezeichnet. AXELROD fügte übrigens auch noch eine Strategie RANDOM hinzu, die in jeder Einzelperiode völlig zufällig kooperierte oder eben nicht.

Beim betrachteten Fall (Abbildung 3-4) wird das Superspiel nach 12 Runden abgebrochen. Die grau hinterlegten Aktionen müssen – zeitlich versetzt – einander genau entsprechen, denn TFT wiederholt stur die jeweilige Aktion von RANDOM in der Vorrunde. Im vorliegenden Fall erreicht TFT immerhin ein Unentschieden gegen RANDOM, denn die erste Aktion von TFT entspricht *zufällig* der letzten Aktion von RANDOM in Runde 12. Zieht man eine Gesamtbilanz der 12 Runden, so beobachtet man dreimal die Aktionskombination (C,C), einmal die Kombination (D,D) und je viermal (C,D) bzw. (D,C).

Die Strategien TFT und RANDOM erhalten also beide die Auszahlung  $3R + P + 4S + 4T$ .

Wäre das Superspiel nach 11 Runden abgebrochen worden, so wäre die Kombination (D,C) einmal weggefallen. RANDOM hätte mit der Auszahlung  $3R + P + 3S + 4T$  den paarweisen Vergleich gegen TFT mit  $3R + P + 4S + 3T$  sogar gewonnen. Diese Überlegungen verdeutlichen, dass Tit-for-Tat auch gegen andere denkbare Strategien *niemals gewinnen* kann. Weil TFT in der ersten Runde kooperiert, kann die Strategie im besten Fall ein Remis erreichen – aber nur falls der Gegenspieler in der letzten Runde kooperiert. Geschieht dies nicht, so verliert TFT sogar den paarweisen Vergleich.

*Wieso konnte dann TFT das Gesamtturnier gewinnen?*

AXELROD veröffentlichte die Ergebnisse des ersten Turniers und eine Reihe von Analysen dazu – etwa auch die oben genannten Überlegungen. Dann lud er zu einem zweiten Turnier. Allen Teilnehmern war bekannt, dass TFT auch seine Schwächen hat und nicht einmal gegen RANDOM gewinnen kann. Mit Leichtigkeit konnten AXELROD und andere Wissenschaftler konditionale Strategien identifizieren, die das erste Turnier gewonnen hätten. Es ist auch leicht vorstellbar, etwa ein Computerprogramm zu implementieren, das sich zunächst wie TFT verhält. Sobald das Programm aber erkennt, dass es vermutlich auf RANDOM trifft, *sollte* es auf die Strategie Defektieren umschalten. Es sind auch viele andere Wege denkbar, wie man mehr oder weniger trickreich versuchen könnte, sich einen kleinen Extravorteil zu verschaffen. Statt 12 Strategien wie im ersten Turnier, wurden nun über 60 Programme eingereicht. Dass bei einem derart ambitionierten Teilnehmerfeld die simple TFT-Strategie erneut gut abschneiden könnte, erscheint fast undenkbar. Nur ANATOL RAPOPORT ließ sich nicht beirren und reichte erneut TFT ein – und siehe da: es gewann auch das zweite Turnier!

Eben weil es so viele unterschiedliche Wege gibt, trickreich zu sein, machten sich die komplizierten Strategien das Leben gegenseitig schwer und verstrickten sich häufig in



Vergeltungsorgien. Das simple TFT dagegen war von den ausgefeilten Programmen leicht als konditionaler Kooperator zu erkennen und erreichte gerade deshalb häufig eine auf Dauer angelegte beidseitige Kooperation. Wenn selbstverständlich auch im zweiten Turnier TFT keinen einzigen paarweisen Vergleich gewinnen konnte, so wurde dennoch das beste Gesamtergebnis erzielt.

Abschließend führte AXELROD noch eine evolutionäre Simulation durch, bei der sich die Zusammensetzung des Teilnehmerfelds in Abhängigkeit des Erfolgs veränderte. Auch dieses dritte „Turnier“ gewann TFT. Bei dem evolutionären Prozess war zwar zunächst ein Erfolg von trickreicheren Programmen zu beobachten. Falls es aber diesen etwa gelang, die unbeholfene Strategie RANDOM auszubeuten, so musste der Populationsanteil von RANDOM zwangsläufig abnehmen. Die trickreichen Strategien vernichteten also auf diese Weise selbst die Grundlage ihres anfänglichen Erfolges. Weil der Erfolg von TFT eben nicht darauf basiert, andere zu übertölpeln, konnte er Bestand haben.

### **Diskontrate und der “Schatten der Zukunft“**

Neben der evolutionären Simulation und den beiden beschriebenen Turnieren findet sich bei AXELROD auch eine theoretische Ausarbeitung der Bedingungen, die notwendig sind, damit es zur Evolution der Kooperation kommt. Eine entscheidende Bedeutung kommt dabei der *Diskontrate* zu.

Die Auszahlungen zukünftiger Perioden werden nämlich “abgezinst“. In Abschnitt 2.2.2 konnte die Gesamtauszahlung durch einfache Summierung der Periodenergebnisse ermittelt werden, denn die Zahl der Perioden  $T$  war bekannt und endlich. Bei der Betrachtung in diesem Abschnitt kann es jederzeit zum Abbruch kommen. Unterstellt man eine konstante Abbruchwahrscheinlichkeit  $w$ , so kann die Verwendung eines Diskontparameters im vorliegenden Zusammenhang leicht nachvollzogen werden.

In Periode 1 berechnet der Spieler die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es eine zweite Periode gibt, zu  $(1-w)$ . Da die Auszahlung der ersten Periode völlig sicher ist, aber die in der zweiten Periode nicht ganz, wird er letztere entsprechend weniger gewichten. Eine Auszahlung in der dritten Periode ist noch unsicherer – entsprechend wird sie mit  $(1-w)^2$  gewichtet, usw.

Auf diese Weise erhält man für die Gesamtauszahlung:  $U_i = \sum_{t=1}^{\infty} (1-w)^{t-1} u_i(t)$ .

Es ist unmittelbar einleuchtend, dass eine hohe Diskontrate schädlich für das Zustandekommen der Kooperation ist. Ein TFT-Spieler riskiert ja, in der ersten Spielperiode ausgebeutet zu werden. Ist die Abbruchwahrscheinlichkeit  $w$  hoch, so verringert sich die Chance, dass der Vertrauensvorschuss sich gelohnt hat, indem im Lauf der Zeit Gewinne aus der Kooperation zurückfließen. Wie jede Investition wird auch diese nur getätigt, wenn ein Rückfluss erwartet werden kann. AXELROD hat hierfür den Terminus *Schatten der Zukunft* geprägt.

### 3.3.2 *n*-Personen-Dilemmata

Aus theoretischer Sicht ist zum *n*-Personen-Gefangendilemma (NPD) vor allem von TAYLOR Stellung bezogen worden. Im Vergleich zum Zwei-Personen-Dilemma ist aber viel weniger mit Theorie oder mit Simulation gearbeitet worden – wie auch TAYLOR treffend bemerkt<sup>64</sup>:

*» It should hardly need emphasizing that in the real world most of the interesting problems of public goods provision, and of cooperation more generally, involve more than two actors, so that much more attention should be directed at the analysis of N-person supergames than of two-person supergames. Yet very little has been written about such games. «*

Das damals konstatierte Defizit besteht nach wie vor. Zwar entstand in den letzten Jahrzehnten eine kaum überschaubare Zahl von Simulationsstudien, bei denen Agenten häufig mit *mehreren* anderen Agenten Dilemmaspiele spielten, aber zumeist wurde dabei jeweils ein *Zwei-Personenspiel* mit mehreren Nachbarn zugleich gespielt. In Wirklichkeit handelt sich dann *nicht* um ein NPD, weil jede betrachtete Beziehung *bilateral* ist und dort *selektiv wirksame* Anreize denkbar sind. Dabei muss das *wirkliche* NPD ein wichtiges Thema sein, denn sonst würde es nicht bereits seit langem Experimente dazu geben<sup>65</sup>.

Das *n*-Personen-Gefangenendilemma kann nämlich ökonomisch auch so interpretiert werden, dass jedem Spieler zwei Anlageformen angeboten werden: eine *private Anlage* mit der sicheren

---

<sup>64</sup> Vgl. Taylor (1994), S. 82.

<sup>65</sup> Eine Übersicht zu Freifahrer-Experimenten findet sich bei Weimann (1995). Zum Beleg, dass die Thematik weiterhin von Interesse ist, vgl. Fehr und Gächter (2000).

Auszahlung von 1 und eine *öffentliche Anlage* mit einer höheren Gesamtauszahlung von  $\gamma > 1$ , wobei jedoch die "Früchte" der öffentlichen Anlageform gleichmäßig zwischen allen  $n$  Beteiligten aufzuteilen sind<sup>66</sup>.

MARWELL und AMES unternahmen einen psychologischen Versuch, bei dem den Teilnehmern des Experiments genau eine solche Interpretation des Problems geliefert wurde. Die Probanden bekamen Spielmarken ausgehändigt, welche wahlweise in die private oder öffentliche Anlage zu investieren waren. Obwohl die Teilnehmer eine Gruppenstärke von  $n = 80$  zu berücksichtigen hatten und der Anreiz für die öffentliche Anlage mit  $\gamma = 2,2$  im Hinblick auf das Verhältnis von 2,2 zu 80 dramatisch gering war, ergab sich überraschenderweise, dass über 40% der Spielmarken in das öffentliche Gut investiert wurden. Solche Ergebnisse widersprechen diametral spieltheoretischen Erwägungen, denn auch hier ist im Einmal-Spiel das Gleichgewicht, bei dem sämtliche Spieler defektieren, das einzige Nash-Gleichgewicht.

Des Weiteren kann aus theoretischer Sicht gezeigt werden, dass es einen Strukturbruch gibt zwischen dem iterierten Zwei-Personen-Dilemma und jedem iterierten  $n$ -Personen-Dilemma (für  $n > 2$ ). TAYLOR spricht in dem Kontext von "*Chickens nesting in the NPD*", was darauf hinweist, dass völlig andere (und zusätzliche) Dilemmastrukturen im iterierten NPD *versteckt* sind<sup>67</sup>.

**Mit anderen Worten:** Auch falls lediglich eine *echte* Teilgruppe kooperiert, kann ein Ergebnis entstehen, das *alle* Spieler dem Gleichgewicht vorziehen, bei dem gar niemand kooperiert. Wenn nun eine solche (ausreichend große) Teilgruppe sozusagen im Alleingang<sup>68</sup> Beiträge zur Erstellung des öffentlichen Gutes leistet, so steht jeder der betroffenen Spieler vor dem *zusätzlichen* Dilemma, dass einerseits ein Anreiz zur Fortsetzung der Kooperation besteht, es andererseits aber noch reizvoller wäre, die Kooperation würde von einer Teilgruppe fortgesetzt, welche den betreffenden Spieler *nicht* einschließt.

---

<sup>66</sup> Vgl. Marwell und Ames (1981) sowie Weimann (1990), S. 85f. Falls  $\gamma/n < 1$  liegt ein soziales Dilemma vor.

<sup>67</sup> Vgl. Taylor (1994), S. 92f. Das „chicken-game“ ist neben dem Gefangenendilemma eines der bekanntesten Zwei-Personenspiele. Es wurde etwa auch von SCHELLING sehr früh analysiert (vgl. Schelling (1960)). „Chicken“ hat übrigens eine *identische* Spielstruktur, wie das bereits in Abschnitt 2.4 erwähnte Falke-Taube-Spiel (in der englischsprachigen Literatur „Hawk-Dove“).

<sup>68</sup> Eine Art „*coalition of the willing*“.

Das Hauptproblem besteht nun darin, dass eine Einstellung der Kooperation nicht *selektiv* wirksam wird<sup>69</sup>. Sie trifft kooperative und defektierende Spieler gleichermaßen - ein Ausschluss von dem Genuss des öffentlichen Gutes ist eben laut Voraussetzung nicht durchsetzbar. Vor diesem Hintergrund ist damit zu rechnen, dass ein stabiles Verhaltensmuster entsteht, bei dem eine Teilgruppe fortgesetzt kooperiert, weil Vergeltungsversuche von vornherein aufgegeben werden. Die betroffene Teilgruppe wird gewissermaßen zum *Gefangenen ihrer eigenen Kooperationsbereitschaft*. Präferenzen für das öffentliche Gut sind bereits offenbart worden. Die betroffene Gruppe ist auch groß genug, damit sich ein Fortsetzen der Kooperation lohnt. Das Einstellen der Kooperation ist mit dem Risiko behaftet, am Ende ganz leer dazustehen. Die von einem Fairness-Standpunkt aus äußerst unangenehme Folge ist, dass alle anderen ein Trittbrettfahrerverhalten durchsetzen können – und zwar auf Dauer!

Aufgrund der Untersuchungen von AXELROD kann man dagegen für den Zwei-Personen-Fall schließen, dass in einem evolutionären Kontext „Ausbeutung auf Dauer“ nicht durchgesetzt werden kann<sup>70</sup>. Unfares Verhalten wird sich nämlich nicht lange lohnen. Hätte dieses Verhalten Erfolg, so müsste der Populationsanteil der Ausgebeuteten sinken, und eine Strategie, die zunächst erfolgreich ausbeutet, würde dadurch die Grundlage des vorübergehenden Erfolgs selbst vernichten. Es *kann* also keine echte Teilgruppe geben, welche im Alleingang fortgesetzt Beiträge zum öffentlichen Gut leistet. Im Zwei-Personen-Fall müsste diese Teilgruppe nämlich aus einem einzigen Spieler bestehen. Bestünde für diesen aber ein dominierender Kooperationsanreiz, so wäre der Widerspruch zwischen individueller und kollektiver Rationalität aufgehoben.

Weitere (anders strukturierte) *n*-Personen-Dilemmata findet man etwa im Verkehrsbereich<sup>71</sup>. Des Weiteren muss betont werden, dass im Zusammenhang mit externen Effekten sich auch eine dilemmahafte Informationsproblematik stellt. Die beiden genannten Internalisierungsstrategien leiden unter dem selben Grundproblem. Die sogenannte First-Best-Lösung (Pareto-Effizienz) kann unter realistischen Bedingungen praktisch nicht erreicht werden. Für die Praxis entwickelte

---

<sup>69</sup> Auch dieses macht man sich leicht an einem modifizierten Wohngemeinschaftsdilemma klar. Angenommen ein dritter Student (Christian) stößt zur WG von Andi und Bernd. Falls Andi und Bernd ein kooperatives Verhaltensmuster etabliert haben (z.B. mit Hilfe der TFT-Strategie) so stehen sie vor einem neuen Dilemma, falls Christian nicht kooperiert. Will Andi etwa Christian bestrafen, so schadet er damit unweigerlich zugleich Bernd. Die Problematik lässt sich auch *kontrolltheoretisch* formulieren (vgl. Berkemer (2006)).

<sup>70</sup> Vgl. dazu auch Sigmund (1995), S. 290 und insbesondere S. 294.

<sup>71</sup> Vgl. Berkemer (2000a), Berkemer (2000b) sowie Berkemer und Lenz (2003).

Ansätze bescheiden sich daher mit sogenannten *Second-Best-Lösungen*, bei denen lediglich Kosten-Effizienz gefordert wird.

Bei der PIGOU-Steuer scheitert die First-Best-Lösung, weil ein zentraler Planer nicht alle notwendigen (privaten) Informationen in Erfahrung bringen wird, wenn die „Besitzer“ dieser Information damit rechnen müssen, dass die Angaben sich auf ihre Besteuerung auswirken. Woran eine dezentrale Lösung a la COASE scheitert, wird in Kapitel 6 weiter ausgeführt.

Zusammenfassend ergibt sich die Gefahr, dass durch unkooperatives Zurückhalten von strategisch relevanter Information Problemstrukturen analog zu allgemeinen *n*-Personen-Dilemmata entstehen – dies müssen aber nicht unbedingt *n*-Personen-Gefangenen-Dilemma sein. Seit den frühen 1970er Jahren gibt es Anstrengungen, dem Problem mit Hilfe von „*Mechanism-Design*“ adäquat zu begegnen (siehe Kapitel 6).

Folgende Eigenschaften für Mechanismen sind dabei wünschenswert:

- **Anreizkompatibilität (AK):** Die Beteiligten sollten einen Anreiz haben, ihre tatsächliche Bewertung von öffentlichen Gütern anzugeben.
- **Ex-Post-Effizienz (EPE):** Die resultierende Allokation von öffentlichen Gütern sollte nach Anwendung des Mechanismus Pareto-effizient sein.
- **Individuelle Rationalität (IR):** Die Beteiligten sollten zur freiwilligen Teilnahme bereit sein. Diese sogenannte IR-Bedingung bedeutet: Es dürfen *a priori* für niemanden Nachteile aus der Anwendung des Mechanismus zu erwarten sein.

Es existiert leider kein Mechanismus, welcher Ex-Post-Effizienz sichert, anreizkompatibel ist und zugleich die IR-Bedingung erfüllt<sup>72</sup>. Die sogenannten GROVES-Schemata, Ausgangspunkt der Theorierichtung, sind zwar anreizkompatibel und effizient, aber sie verletzen die IR-Bedingung. Der ROB-Mechanismus, von WEIMANN als *vorläufiger Schlusspunkt der Theorieentwicklung* gesehen<sup>73</sup>, ist ebenfalls anreizkompatibel und genügt dem Kriterium individueller Rationalität. In Kapitel 6 wird im Anschluss an eine vergleichende Simulation noch erklärt, warum mit dem ROB-Mechanismus keine Ex-Post-Effizienz erreicht werden kann.

---

<sup>72</sup> Vgl. Weimann (2006), S. 203, sowie den Übersichtsaufsatz von Groves und Ledyard (1987).

<sup>73</sup> Vgl. Weimann (1990), S. 242.

### 3.4 Kritik an der neoklassischen Umweltökonomie

Ähnlich wie bei der Spieltheorie in Kapitel 2 werden in dieser Arbeit nicht sämtliche interessanten Teilgebiete der Umweltökonomie behandelt. Es musste auch aus Platzgründen eine rigorose Auswahl getroffen werden. Auf die kooperativen Lösungskonzepte der Spieltheorie etwa wird völlig verzichtet, und genauso bekommt in diesem Kapitel die sogenannte „**Ökologische Ökonomie**“ nicht den Stellenwert, der ihr nach Ansicht vieler gebührt<sup>74</sup>. Alles was in diesem Kapitel bis jetzt ausgeführt wurde, bezieht sich auf das Gedankengebäude der sogenannten **neoklassischen Umweltökonomie**. Eine hervorragende Kritik – welche in weiten Teilen auf Zustimmung des Autors stößt – liefert HERMANN BRUNS. Allerdings sind nicht sämtliche Schlussfolgerungen zwingend. So stellt BRUNS beispielsweise der neoklassischen Erklärung mit beachtlicher Eloquenz eine (von ihm selbst so bezeichnete) **nicht-theoretische** Erklärung gegenüber:

*Es gibt viele Tätigkeiten, deren schädliche Wirkungen für die natürlichen Lebensgrundlagen nicht vorhersehbar sind und erst sehr verspätet einsetzen können, daneben ist das Verhältnis von Ursache und Wirkung oft höchst unklar. Aber selbst wenn relativ eindeutige und gesicherte Erkenntnisse über die Ursachen von Schädigungen bestehen, gibt es viele Konsumenten und Unternehmen, die ihr Verhalten aus materiellen, machtpolitischen und Prestige Gründen (oder aus Dummheit) nicht ändern, so daß erfolgversprechende und schnelle Lösungen oft verhindert werden. Wie **so viele andere Probleme** ist also auch das Umweltproblem von einer (sich von Fall zu Fall ändernden) Mischung aus Unwissenheit, Unfähigkeit und individuellen oder kollektiven Egoismen geprägt.<sup>75</sup>*

Nun ließe sich bereits trefflich darüber streiten, was denn ein “kollektiver Egoismus“ überhaupt sein soll. Wichtiger ist jedoch die grundsätzlich andere Charakterisierung des Umweltproblems: Nach Ansicht des Autors dieser Arbeit kommt es wie **bei keinem anderem Problem** auch ohne eine **einzige** der genannten Zutaten zum Problem. Um dieses zu begründen, leistet die theoretische Erklärung eben doch einen Beitrag.

---

<sup>74</sup> Vgl. Hampicke (1992).

<sup>75</sup> Vgl. Bruns (1995), S. 53, Hervorhebung durch den Autor dieser Arbeit.

Warum sind aber nun sämtliche Modelle in dieser Arbeit dem neoklassischen Gedankengebäude entnommen? Sicherlich nicht, weil die neoklassische Umweltökonomie als überlegen betrachtet wird gegenüber der "Ökologischen Ökonomie". Es geht darum zu zeigen, dass sich *trotz möglicher Unzulänglichkeiten* eine Beschäftigung mit dem neoklassischen Modell lohnt. Mit dem Simulationsansatz, der im Folgenden entwickelt wird, kann etwa untersucht werden, welche Aussagen auch dann noch zutreffen, wenn man Abstriche von der Annahme einer vollständigen Rationalität macht.

Des Weiteren wird beim zweiten Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 gezeigt, dass es auch dann zu Problemen kommen kann, wenn im Prinzip nur *gleichgerichtete Interessen* der Akteure vorliegen. Es kann also auch dann zur Fehlallokation kommen, wenn die Gefahr einer möglichen Ausbeutung vollständig ausgeräumt ist.

Es müssen also nicht unbedingt Gefangenendilemmastrukturen vorliegen, sondern es reicht bereits aus, wenn das *Ausmaß* der gleichgerichteten Interessen nicht allgemein bekannt ist. Dieser Sachverhalt alleine ist bereits der Untersuchung wert.

## 4 Konzipierung des agentenbasierten Simulationsmodells

» *Nur ein Idiot glaubt, aus den eigenen Erfahrungen zu lernen. Ich ziehe es vor, aus den Erfahrungen anderer zu lernen, um von vornherein eigene Fehler zu vermeiden.* «

( Otto von Bismarck)

Nachfolgend wird eine geeignete agentenbasierte Konzeption des Simulationstools entwickelt. Ausgehend von den Ausführungen in Kapitel 2 und 3 wird in Abschnitt 4.1 zunächst ein Anforderungskatalog aufgestellt. Außerdem ist es nützlich, Strukturgesichtspunkte und Prozessgesichtspunkte zunächst getrennt zu behandeln. Die Modellierung der typischen Problemstrukturen ist Gegenstand von Abschnitt 4.2. Die Objekte, welche hierbei benötigt werden, stammen vorwiegend aus dem Bereich der *klassischen Spieltheorie*. Abschnitt 4.3 behandelt die Modellierung des Evolutionsprozesses. Die zusätzlichen Objekte entstammen dann dem Bereich der *evolutionären Spieltheorie*. Insbesondere ermöglicht dieser Ansatz auch die explizite Modellierung von adaptiven Anpassungsvorgängen. Abschnitt 4.4 beschreibt das generelle Ablaufschema eines agentenbasierten Simulationslaufes.

### 4.1 Anforderungskatalog

Aus der Diskussion der beiden Grundlagenkapitel 2 und 3 ergeben sich unmittelbar folgende Anforderungen an das Simulationstool:

- **Zahl der Beteiligten:** Da bei Umweltproblemstellungen meist eine mittlere oder gar hohe Anzahl von Betroffenen und/oder Beteiligten relevant ist, muss die Modellierung eine Vielzahl von Spielern zulassen und dennoch der Eingabeaufwand beherrschbar bleiben. Die *Zwei-Personen-Falle* jedenfalls muss vermieden werden.
- **Heterogenität:** Will man Situationen mit mehreren Spielern analytisch behandeln, so funktioniert dies praktisch meist nur dann, wenn Symmetrie vorausgesetzt wird. Mit dem Simulationstool könnte man eben diese Form der *Symmetriefalle* vermeiden. Dazu muss



aber die Konzeption von vornherein Heterogenität in den Nutzenbewertungen sowie in den Handlungsmöglichkeiten vorsehen.

- **Begrenzte Rationalität:** Wie in Abschnitt 2.2 gezeigt, führt die Annahme vollständiger Rationalität mitunter zu paradoxen analytischen Ergebnissen. Meist sind diese Ergebnisse dann auch mit experimentellen Beobachtungen in keiner Weise zu vereinbaren. Das Simulationstool soll ermöglichen, explizit die begrenzte Aufnahme und Verarbeitung von Information zu modellieren. Statt der hyperrationalen Annahme einer “Common Knowledge Rationality“ ist also Raum zu geben für (fehlerbehaftete) Lern- und Anpassungsvorgänge.
- **Robustheit:** Geringfügige Änderungen in den Annahmen führen eventuell zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen. Einige Beispiele in den vorigen Abschnitten gaben Hinweise darauf, wie empfindlich spieltheoretische Modelle diesbezüglich reagieren können. Es muss auf jeden Fall sichergestellt werden, dass die grundsätzlichen Schlussfolgerungen für einen breiteren Parameterraum Gültigkeit besitzen. Dazu werden umfangreiche Sensitivitätsanalysen erforderlich sein. Auch dies ist bei der Konzeption in Rechnung zu stellen.
- **Dynamik:** KARL WOLFGANG DEUTSCH hat zu Recht den statischen Charakter der Spieltheorie betont<sup>76</sup>. Wünschenswert ist deshalb, im Verlauf der Simulationen Änderungen der Spielstruktur zuzulassen. Freilich darf es dabei zu keiner Beliebigkeit kommen. In Kapitel 5 wird anhand des ersten Anwendungsbeispiels gezeigt, unter welchen Bedingungen die Analyse solcher Veränderungen sinnvoll sein kann.

## 4.2 Modellierung der Problemstrukturen

### 4.2.1 Spielstrukturen und Entscheidungssituationen

Die typischen Entscheidungssituationen, die für diese Arbeit relevant sind, können dadurch gekennzeichnet werden, dass *Beteiligte* und *Betroffene* nicht übereinstimmen oder zumindest das Ausmaß der Beteiligung und der Betroffenheit nicht übereinstimmt.

---

<sup>76</sup> Vgl. Deutsch (1973), S. 102 ff.

Insbesondere im Zusammenhang mit öffentlichen Gütern ist es daher zielführend, *explizit* die Art und Weise zu modellieren, wie sich Entscheidungsträger an der Erstellung eines öffentlichen Gutes beteiligen können und in welchem Ausmaß sie dann davon betroffen sind. Dazu wird eine Klasse namens **PGoodGame**<sup>77</sup> entwickelt, die geeignet ist, dieses Beziehungsgeflecht so kompakt wie möglich abzubilden.

Zunächst sind die Begriffe Spielstruktur und Entscheidungssituation voneinander abzugrenzen: Unter einer **Spielstruktur** wird die abstrakte Beschreibung einer Situation verstanden. **Entscheidungssituationen** dagegen sind konkrete Realisierungen einer Spielstruktur. Das Gefangenendilemma ist etwa eine solche Spielstruktur. In Abbildung 4-1 wird ein weiteres Beispiel dargestellt, bei dem *explizit* ein öffentliches Gut im Mittelpunkt steht.

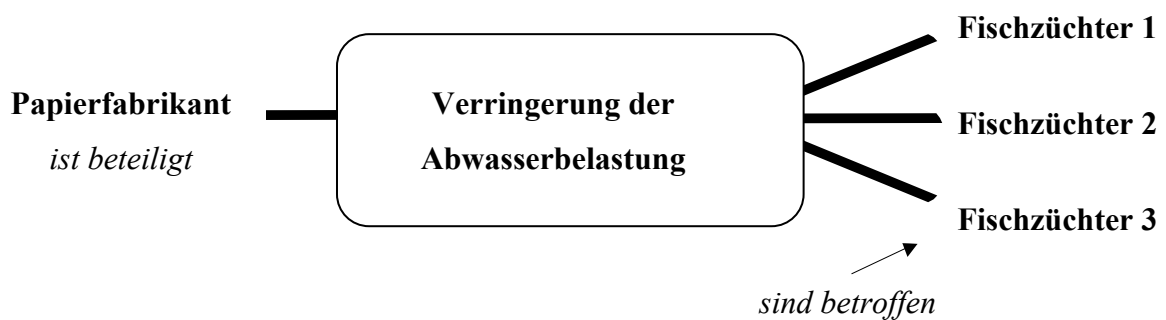


Abbildung 4-1: Spielstruktur mit einem öffentlichen Gut

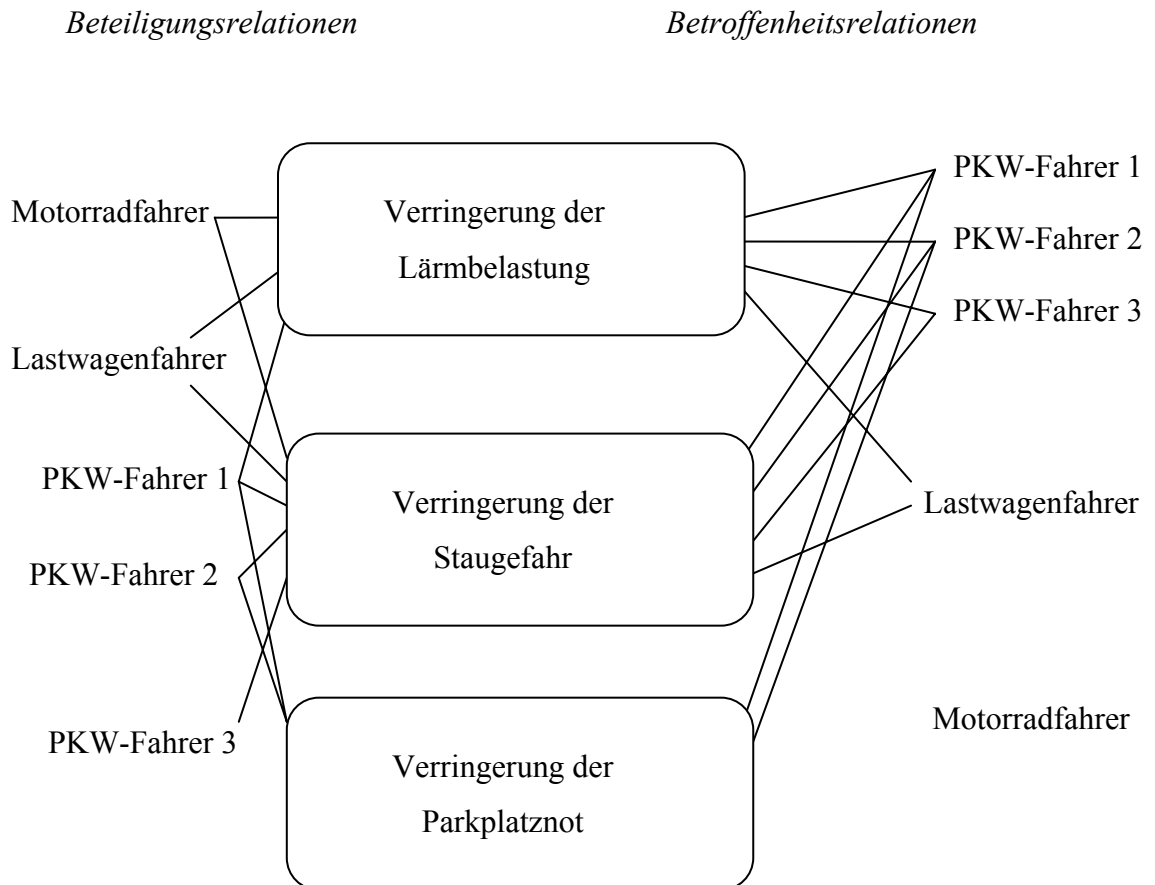
Im Englischen wird häufig auch der Begriff des „*public bad*“ verwendet, etwa für Luftverschmutzung, Lärmbelästigung, etc. Eine passende Übersetzung ist nicht leicht zu finden. Konzeptionell bereitet dies aber keine Schwierigkeiten, denn man kann zu jedem *public bad* ein entsprechendes öffentliches Gut definieren (Reduktion der Luftverschmutzung, Verringerung der Lärmbelastung, etc.). Deshalb ist es keine Einschränkung, wenn im Folgenden nur noch von der Erstellung öffentlicher oder privater Güter die Rede ist.

Spielstrukturen können auch komplexer sein. Im Verkehrsbereich etwa sind unterschiedliche Externalitäten zugleich relevant, die allesamt mit der Systematik (öffentlicher) Güter erfasst

---

<sup>77</sup> Abgeleitet von „public good game“. Der deutsche Name „Öffentliches-Gut-Spiel“ wäre viel unhandlicher.

werden können. Hierbei kann auch eine hochgradige *Heterogenität* der Akteure abgebildet werden, etwa die unterschiedliche Betroffenheit in Bezug auf manche dieser Güter.



**Abbildung 4-2: Spielstruktur mit mehreren öffentlichen Gütern**

Für den Motorradfahrer in Abbildung 4-2 etwa mag das Vorhandensein frei zugänglicher Parkplätze nebensächlich sein, weil er viel weniger Abstellplatz benötigt als ein PKW-Fahrer. Aus demselben Grund ist er von einem potentiellen Stau weniger betroffen. Auch unterschiedliche Grade der Beteiligung lassen sich abbilden. Der Motorradfahrer könnte also in sehr starkem Maß zur Lärmbelastung beitragen<sup>78</sup> und ein Lastwagen andererseits zu mehr

<sup>78</sup> Hier wird nämlich unterstellt, dass der Lärmpegel dem Motorradfahrer ziemlich egal ist, weshalb er ohne selbst betroffen zu sein beliebig viel Lärm verursachen kann. Diese nicht vorhandene *Betroffenheit* ist in Abbildung 4-2 dadurch gekennzeichnet, dass der Motorradfahrer auf der rechten Seite der Abbildung isoliert dargestellt ist – ohne jede Verbindung zu den öffentlichen Gütern.

Luftverschmutzung als ein PKW. Manche der PKW-Fahrer spielen evtl. diesbezüglich keine Rolle, weil sie praktisch nicht hörbare Elektrofahrzeuge betreiben. Um das Beispiel abzuschließen: Beim dritten PKW-Fahrer wird unterstellt, dass er nur zum Durchgangsverkehr zählt, denn weder auf der linken Seite von Abbildung 4-2, noch auf der rechten Seite, befindet sich eine Relation zum öffentlichen Gut "Verringerung der Parkplatznot".

Mit Hilfe einer solchen Konzeption erreicht man letztlich die Überführung eines klassischen Spielmodells in ein *Zustandsmodell*. Dies ist bei Spielstrukturen mit mehreren Beteiligten äußerst vorteilhaft, weil es die Vermeidung von Redundanzen erlaubt und damit auch den Eingabeaufwand bei der Modellierung in Grenzen hält. Bereits in einem einfachen Modell mit 10 Autofahrern, die jeweils zwei Optionen haben (etwa Route A fahren oder Route B fahren) sind bei einem klassischen Spielmodell bereits 1024 Auszahlungskombinationen zu bewerten. Falls jedoch die Auszahlung jedes Fahrers nur vom *Zustand* der beiden Routen (gemessen als Belastung durch die Gesamtzahl der dort verkehrenden Fahrzeuge) abhängt, so lässt sich das selbe Problem mit viel weniger Information adäquat abbilden<sup>79</sup>.

Die eben beschriebenen Spielstrukturen sind Objekte, die als *Templates* dienen, um während des Simulationslaufes konkrete Entscheidungssituation zu generieren. Dabei können gewöhnliche Vererbungsmechanismen nicht zum Einsatz kommen, denn das komplexe Beziehungsgeflecht muss vollständig abgebildet werden. Statt dessen führen vergleichbare Vorgehensweisen zum Erfolg, wie sie von FISCHER im Zusammenhang mit sogenannten *Beziehungsdreiecken* ausgeführt wurden<sup>80</sup>.

Will man etwa aus der Spielstruktur in Abbildung 4-2 Entscheidungssituationen erzeugen, so hat man Vorsorge zu treffen, dass für jede Beteiligungs- bzw. Betroffenheitsrelation die richtigen Objekte gefunden werden, zu denen dann Beziehungen durch Pointer herzustellen sind. Des Weiteren müssten konkrete Güter-Objekte angelegt werden (jeweils drei pro erzeugter Entscheidungssituation), bei denen die genannte Zustandsinformation abgespeichert werden kann.

---

<sup>79</sup> Oft ist es gleichgültig, *welche* der Autofahrer sich jeweils für Route A bzw. B entschieden haben. Es genügt zu wissen, *wie viele* sich auf den beiden Routen jeweils befinden. Beim Beispiel von zehn Fahrern ergeben sich für jede Route elf mögliche Zustände (0,...,10 Autos). Im Falle homogener Nutzenbewertungen genügen dann bereits 22 Zustandsbewertungen (je elf für Route A und B).

<sup>80</sup> Vgl. Fischer (1994), S. 192 – insbesondere Abbildung 42.

#### 4.2.2 Entscheidungsträger

Zunächst sind die Begriffe Spieler und Agent voneinander abzugrenzen: Ein *Spieler* ist Element einer abstrakten *Spielstruktur*. Ein *Agent* ist *Beteiligter* an einer konkreten *Entscheidungssituation* und von den Zuständen der dort relevanten Güter *betroffen*.

Ein Agent ist als *informationsverarbeitende* Einheit konzipiert. Als Eingangsinformation werden über Sensoren die Zustände der Güter wahrgenommen, von denen der Agent betroffen ist. Über Aktoren wird Einfluss auf die Güterwelt genommen. Für die Implementierung wurden dazu sogenannte *Container-Objekte* der C++-Standardbibliothek eingesetzt. Mit deren Hilfe wurden für jeden Agenten Aktorlisten und Sensorlisten angelegt.

Wird ein Agent in den Mittelpunkt gestellt, so erhält man eine zu Abbildung 4-1 komplementäre Darstellung. Dort und auch in Abbildung 4-2 sind die Beteiligungsrelationen jeweils auf der linken Seite zu finden. Die Relationen der Betroffenheit befinden sich rechts von dem in den Mittelpunkt gestellten Objekt (einem öffentlichen Gut). Die Logik in dieser Anordnung besteht darin, dass für die Darstellung einer Informationsverarbeitung üblicherweise der Input links und der Output rechts abgebildet ist. Zur Vorbereitung der nachfolgenden Abbildung wird gezeigt, dass bei konsequenter Anwendung dieses Prinzips gerade die umgekehrte Anordnung resultiert, falls die Informationsverarbeitung eines Agenten im Mittelpunkt steht.

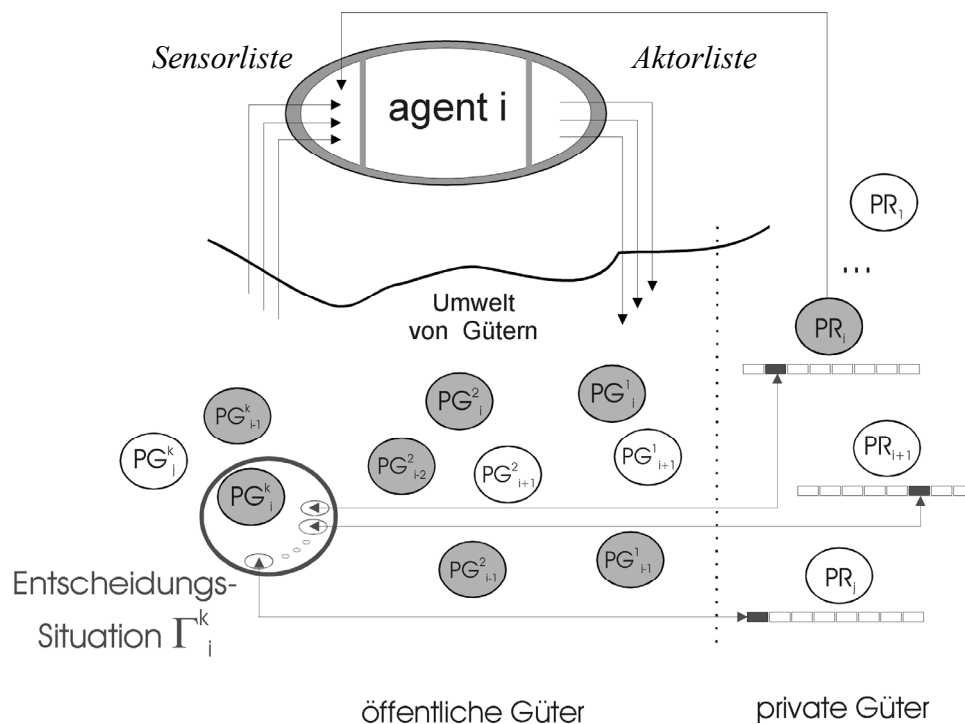
Als *Eingangsinformation* erfassen Agenten den Zustand von Gütern und bewerten diesen. Beim konkreten Fall des Wohngemeinschaftsdilemmas wird also etwa beobachtet, in welchem Zustand die gemeinsam genutzte Küche sich derzeit befindet. Intern findet dann die Verarbeitung des Input statt und hier kommt die vom Agenten angewandte Strategie zum Tragen: Falls etwa die Tit-for-Tat-Strategie angewendet werden soll (beim wiederholten Spiel), so muss die angemessene Antwort auf die vorausgegangene Aktionen des Gegenspielers ermittelt werden. Man beachte übrigens, dass in diesem Beispiel aus dem Zustand der Küche unmittelbar auf diese vorangegangene Aktion des Opponenten geschlossen werden kann, solange auf Seiten des Agenten die "perfekte Erinnerung" der eigenen Aktionen unterstellt werden darf<sup>81</sup>. Das Ergebnis der Informationsverarbeitung ist die Festlegung der *Reaktion* auf die beobachteten Zustände –

---

<sup>81</sup> Der Fachterminus lautet *perfect recall*, was wie viele andere spieltheoretische Konzepte oft unübersetzt bleibt. Perfect recall ist der Normalfall, der meist unterstellt wird (vgl. dazu auch Rieck (1993), S. 97). Dieses Beispiel gibt auch einen Hinweis darauf, dass häufig das Wissen über Zustände das Wissen über Aktionen ersetzen kann.

beim konkreten Beispiel: es ist zu entscheiden, ob im nächsten Schritt eine *Beteiligung* an der Verbesserung des Küchenzustandes stattfinden soll oder nicht.

Das genannte Prinzip (Input links – Output rechts) ist auch auf komplexere Fragestellungen übertragbar. Zustände, die einen betreffen, stellen den Input dar, und Aktionen, mit denen man sich beteiligt, den Output. Deshalb ist auch in Abbildung 4-3 die Sensorliste schematisch links vom Agenten *i* dargestellt und die Aktorliste rechts davon.



**Abbildung 4-3: Ein Agent interagiert in einer Umwelt von Gütern:** in Anlehnung an Berkemer (2001). Agent *i* und die zugeordneten Sensor- bzw. Aktorlisten sind in ihrer *Gesamtheit* als Ellipse dargestellt. Bei den grau hinterlegten Kreisen handelt es sich um Güter, von denen Agent *i* betroffen ist. PG steht jeweils für „public good“, PR für „private good“. Über die Sensorliste (linker Teil der Ellipse) fragt der Agent relevante Zustandsinformationen ab. Wie dargestellt kann ein Agent von mehreren „public goods“ zugleich betroffen sein. Des Weiteren ist eine spezifische Entscheidungssituation dargestellt, in deren Mittelpunkt gerade ein „public good“ steht. Offensichtlich bestehen auch Beziehungen zu einer Reihe von privaten Gütern (durch die bidirektionalen Pfeile dargestellt). Die entsprechende Entscheidungssituation symbolisiert den Fall, bei dem mehrere Agenten (agent *i*, agent *i*+1, ..., agent *j*) einen Teil ihres privaten Vermögens zur gemeinsamen Erstellung eines öffentlichen Gutes verwenden können, vgl. das Modell von MARWELL und AMES (siehe Abschnitt 3.3.2 in dieser Arbeit), sowie Berkemer (2002).

### 4.2.3 Aktionen und Strategien

RIECK definiert eine Strategie als vollständigen Verhaltensplan:

*„Dieser muss für **jeden** Informationsbezirk des betreffenden Spielers genau vorschreiben, welche Alternative zu wählen ist“<sup>82</sup>.*

Das *genaue Vorschreiben* kann auch darin bestehen, einen Zufallsmechanismus in Gang zu setzen, der dann die konkrete Aktion bestimmt. Diese Möglichkeit soll mit dem Simulationstool auch vorgesehen sein. Einzelne Agenten können also auch eine **gemischte Strategie** anwenden. Noch bedeutender ist die Möglichkeit, dass **bedingte Strategien** verwendet werden können. Deren Relevanz ergibt sich schon aufgrund der Ausführungen in Abschnitt 3.3.1 zur Evolution der Kooperation.

Weil Strategien einen vollständigen Verhaltensplan spezifizieren, können sie wie ein Computerprogramm betrachtet werden. Im Grunde könnten die Spieler ganz zu Beginn ihre Strategien festlegen und dann nach Hause gehen – eine Maschine könnte nach ihren Anweisungen die Partie zu Ende spielen. Genau auf dieser Eigenschaft von Strategien basiert der von AXELROD verwendete Turnieransatz. Das von RAPOPORT zweimal dort eingereichte Tit-for-Tat war eben auch so ein Computerprogramm (übrigens das kürzeste und einfachste von allen).

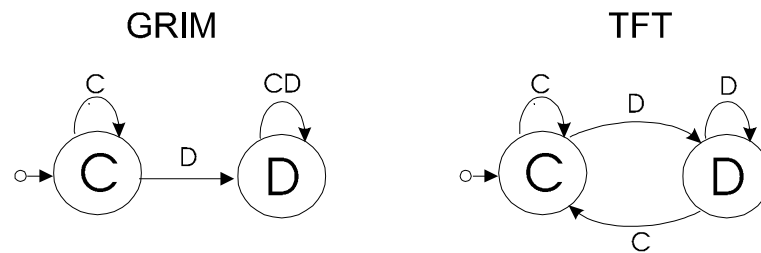
Bedingte Strategien wie Tit-for-Tat werden für das Simulationstool als sogenannte Moore-Automaten implementiert. In Abbildung 4-4 sind beispielhaft zwei Moore-Automaten dargestellt – bei KIRCHKAMP findet man alle 26 Moore-Automaten mit weniger als drei Zuständen<sup>83</sup>.

Die kleinen Pfeile links zeigen jeweils zum Anfangszustand der beiden Automaten. Beide (GRIM und TFT) beginnen also im Zustand C (als Kooperator). Außerdem bleiben beide Automaten solange in dem kooperativen Zustand, wie der Gegenspieler seinerseits kooperiert. Des Weiteren wechseln beide Automaten unverzüglich in den Zustand D (Defektor), falls ein Gegenspieler die Kooperation verweigert. Während aber der TFT-Automat bereit ist, sofort zur Kooperation zurückzukehren, falls sich der Opponent einsichtig zeigt, wird der GRIM-Automat niemals wieder in den Zustand C kommen (der Pfeil mit dem Label “CD“ definiert dieses Verhalten).

---

<sup>82</sup> Rieck (1993), S.113, Hervorhebung durch RIECK.

<sup>83</sup> Vgl. Kirchkamp (1996), S. 57 – bei Beschränkung auf 2x2-Spiele ergibt sich diese maximale Zahl von 26.



**Abbildung 4-4: GRIM und Tit-for-Tat als Moore-Automaten.** Die Zustände eines Moore-Automaten sind durch Kreise symbolisiert und an den Pfeilen sind die Bedingungen für einen Zustandswechsel angegeben.

Eine *Strategie* hat also in der beschriebenen Weise umfassenden Charakter. Dagegen ist eine *Aktion* eine konkrete Maßnahme (etwa ein Spielzug), die bei einem genau spezifizierten Ereignis ergriffen wird. Die sorgfältige Unterscheidung ist bei der Konzipierung des Modells elementar, denn dem evolutionären Selektionsprozess unterliegen immer Strategien, und jeder Agent wird zu jedem Zeitpunkt immer nur *genau eine Strategie* haben. Gleichzeitig soll der Agent zu jedem Zeitpunkt flexibel agieren können, etwa um *unterschiedliche Aktionen* gegenüber verschiedenen Nachbarn zu wählen.

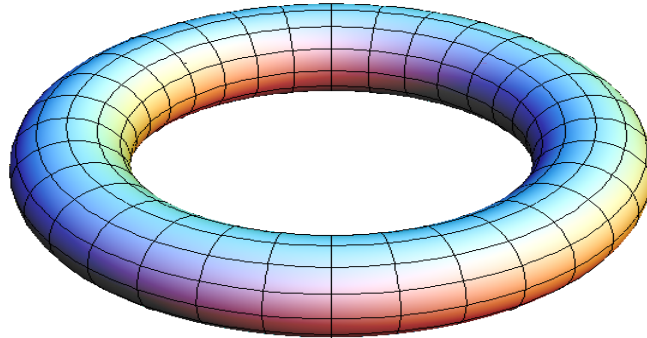
#### 4.2.4 Weitere Konzepte der Strukturierung

##### **Räumliche Anordnungen (ohne bzw. mit periodischen Randbedingungen)**

Bei vielen Simulationsstudien zum Thema Evolution der Kooperation ist es entscheidend, die Agenten räumlich anordnen zu können. Häufig werden dabei Gefangenendilemmata mit mehreren Nachbarn gleichzeitig gespielt. Nun möchte der Modellierer auf keinen Fall, dass verzerrende Randeffekte auftreten können. Würde man beispielsweise eine Population von  $N$  Agenten in einer geraden Linie anordnen, so hätte fast jeder Agent genau zwei Nachbarn – mit Ausnahme von Agent 1 und Agent  $N$ . Da ist es naheliegend, die Endpunkte der Linie zu verbinden und somit den Kreis zu schließen – ähnlich, wie dies beim Wechsel von einer Busstruktur zu einer Ringstruktur im Zusammenhang mit Netztopologien geschieht. Agent 1 und Agent  $N$  werden auf diese Weise ihrerseits zu unmittelbaren Nachbarn, die störende Ausnahme ist beseitigt, und man hat ein völlig symmetrisches Szenario erreicht. Analog ist es Standard,



statt der zweidimensionalen Anordnung in einem rechteckigen Gitter einen Torus zu verwenden, um lästige Randeffekte zu vermeiden<sup>84</sup>.



**Abbildung 4-5: Torus als Konzept zur Realisierung periodischer Randbedingungen**

### 4.3 Modellierung des Evolutionsprozesses

Im Grunde kann der dynamische Aspekt schnell abgehandelt werden. Bei dem Evolutionsprozess geschieht im Wesentlichen zweierlei: Agenten *agieren* und Agenten *lernen*. Bei dem ersten Vorgang verändern Agenten Zustände in ihrer Umwelt. Beim zweiten Vorgang passen sie sich der Umwelt an und verändern dabei ihren internen Zustand. Letzteres kann explizit am Beispiel eines beliebigen Moore-Automaten festgestellt werden.

Im Folgenden ist also noch festzulegen, mit welchen Agenten agiert wird und von welchen Agenten gelernt werden kann.

#### 4.3.1 Populationen und Matching Prozeduren

Eine Aufgabe der Population ist zunächst einmal die Verwaltung der Agenten. Implementiert sind Populationen als Container-Objekte der Standard-C++-Library. Zusätzlich können auch noch Subpopulationen angelegt werden. Dies ist dann nützlich, wenn beispielsweise unterschiedliche Eigenschaften der Agenten einer Population abgebildet werden sollen.

---

<sup>84</sup> Vgl. Kirchkamp (1996), S. 51. Verbindet man erste und letzte Zeile eines rechteckigen Gitters, so erhält man zunächst einen Zylinder. Dessen Boden und Deckel kann man dann zum Torus verbinden.

## Matching Prozeduren

Um festzulegen, welche Agenten jeweils miteinander interagieren, gibt es mehrere Möglichkeiten. Da im Allgemeinen das Verhalten für n-Personenspiele simuliert werden soll, genügt eine einfache Paarbildung nicht – stattdessen sind Agenten den zuvor beschriebenen Entscheidungssituationen zuzuordnen.

- **Random-Matching:** Die Spielpartner der Agenten werden völlig zufällig festgelegt. Bei einem symmetrischen 3-Personenspiel mit einer Population von 600 Agenten, hätte man dann 200 Entscheidungssituationen als Ergebnis.
- **Playing the Field:** Diese Vorgehensweise ist dann nötig, wenn man etwa den Turnieransatz von AXELROD abbilden will. Dort hatte sich jede eingereichte Strategie mit allen anderen auseinander zu setzen.
- **Lokale Interaktion:** Diese Vorgehensweise ist erforderlich, wenn man die räumliche Anordnung der Agenten benutzt, um die jeweiligen Interaktionspartner festzulegen<sup>85</sup>.

### 4.3.2 Imitationsmodelle

Wie in Abschnitt 2.4.2 wird davon ausgegangen, dass eine große Population von Agenten existiert, wobei der Strategiemix zu jedem Zeitpunkt durch einen Punkt ( $x \in \Delta$ ) des entsprechenden Strategiensimplex beschrieben werden kann<sup>86</sup>. Anders als beim Abschnitt zur Replikatorgleichung besteht die Population aber nun aus individuellen Wirtschaftssubjekten oder Konglomeraten (etwa Firmen, Verbänden, Staaten). Dass die Verhaltensweisen auch in einem solchem Umfeld genetisch programmiert sind, ist natürlich nicht vermittelbar. Angemessener ist ein Modell, bei dem davon ausgegangen wird, dass Individuen, Staaten oder Firmen das Verhalten anderer Individuen, Staaten bzw. Firmen beobachten. Falls die Ergebnisse, die diese anderen erzielen, attraktiv genug sind, wird das entsprechende Verhalten imitiert.

---

<sup>85</sup> Vgl. etwa Kirchkamp (1996), S. 51 zur Beschreibung geläufiger Modelle von Nachbarschaftsbeziehungen wie etwa Moore-Neighbourhood, von-Neumann-Neighbourhood, etc.

<sup>86</sup> Vgl. zum Simplex allgemein Fußnote 42 in dieser Arbeit. Zum Strategiensimplex vgl. Hofbauer und Sigmund (1984), S. 161.

Zur Formalisierung dieses Modells führt WEIBULL eine Überprüfungsrate  $r_i(x)$  sowie eine Auswahlwahrscheinlichkeit  $p_{ij}(x)$  ein. Da für beide eingeführten Wahrscheinlichkeiten eine Abhängigkeit vom momentanen Populationszustand  $x$  besteht, lässt sich der Auszahlungserfolg, den jede reine Strategie im Vergleich zur Gesamtpopulation erzielt, zweckmäßig zur Beschreibung eines plausiblen dynamischen Imitationsprozesses heranziehen. Die Überprüfungsrate  $r_i(x)$  gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass ein  $i$ -Strategie-Agent seine Strategie überprüft. WEIBULL unterstellt hierfür einen Poissonprozess. Im Falle einer solchen Überprüfung gibt  $p_{ij}(x)$  die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass ein  $i$ -Strategie-Agent zu einem  $j$ -Strategie-Agenten wird. Damit ergibt sich der Nettopopulationszufluss von der Strategie  $i$  zur Strategie  $j$  als:

$$n_{ij}(x) = -n_{ji}(x) = r_i(x)p_{ij}(x) - r_j(x)p_{ji}(x) \quad (9)$$

WEIBULL illustriert an zwei einfachen Beispielen<sup>87</sup>, wie solche Imitationsprozesse zu sogenannten *auszahlungsmonotonen* Dynamiken führen, welche im Grenzfall dann auch analytisch behandelt werden können.

- **Imitationsmodell I:** Konstante Überprüfungsrate  $r_i(x)$   
Vereinfachend wird also  $r_i(x) = \rho$  gesetzt – unabhängig von  $i$  und  $x$ . Ein Strategiewechsel ist dafür um so wahrscheinlicher, je größer die Auszahlungsdifferenz ist – dies wird durch eine passende Festlegung von  $p_{ij}(x)$  einfach erreicht.
- **Imitationsmodell II:** Strategiewechsel bei Unzufriedenheit  
Eine Überprüfung findet um so häufiger statt, je schlechter die aktuellen Auszahlungswerte sind. Also sinkt  $r_i(x)$  monoton mit der Auszahlung, welche Strategie  $i$  erhält (gegeben den Populationszustand  $x$ ). Im Gegenzug wird hier vereinfachend unterstellt, dass bei Unzufriedenheit schlicht die Strategie dessen übernommen wird, der einem gerade zufällig als nächstes über den Weg läuft. Dies bedeutet  $p_{ij}(x) = x_j, \forall i$ .

---

<sup>87</sup> Vgl. Weibull (1995) zur Definition auszahlungsmonotoner Dynamiken, insb. S. 155ff zu Imitationsmodellen.

Die beiden genannten Modellvarianten führen bei weiteren Vereinfachungen gerade zur Replikatorgleichung. Beim genaueren Studium der vorgeschlagenen Imitationsmodelle bemerkt man, dass die Beschreibung durch WEIBULL bereits so explizit ist, dass der Weg zum Algorithmus nicht mehr weit ist. Exemplarisch wird dies nun für das erste Imitationsmodell dargestellt. Zusätzlich wird für diese Arbeit noch ein Driftparameter eingeführt.

### **Imitationsmodell I mit Drift**

Mit konstanter Wahrscheinlichkeit  $\rho$  wird Agent  $i$  zur Überprüfung seiner Strategie veranlasst.

Im Fall der Überprüfung kommt zunächst der Driftparameter ( $\varepsilon \ll 1$ ) zur Wirkung:

- Mit Wahrscheinlichkeit  $\varepsilon$  kommt es zu unsystematischem Experimentieren. Stehen  $k$  Strategien zur Verfügung, so wird jede mögliche Strategie mit der Wahrscheinlichkeit  $1/k$  gewählt.
- Mit Wahrscheinlichkeit  $(1 - \varepsilon)$  beobachtet Agent  $i$  das Verhalten eines Agenten  $j$ . Der Nutzen von  $j$  wird mit dem eigenen Nutzen verglichen. Für die Nutzendifferenz schreibt man in Zukunft  $\Delta u(\cdot)$ . Eine probabilistische Switching-Funktion  $P(\Delta u(\cdot))$  legt die Wahrscheinlichkeit für einen Strategiewechsel des Agenten  $i$  zu der vom Agenten  $j$  fest.

### **Bemerkung zur probabilistischen Switching-Funktion**

Man kann zeigen, dass es bereits ausreicht, wenn  $P(\Delta u(\cdot))$  monoton in  $\Delta u$  ansteigt<sup>88</sup>. Je höher der Nutzen von  $j$  im Vergleich zum eigenen Nutzen ist, desto wahrscheinlicher ist ein Strategiewechsel. Es ist übrigens nicht nötig, eine Einschränkung vorzunehmen, die bei negativen Werten von  $\Delta u$  den Wechsel ausschließt. Viele Modelle der evolutionären Spieltheorie benutzen solche Funktionen. Die Verwendung wird dabei unterschiedlich motiviert. Aus der Motivation, die im Folgenden gegeben wird, ergeben sich unmittelbar Hinweise auf eine mögliche Implementierung:

Es wird davon ausgegangen, dass Beobachtungen störenden Verzerrungen unterliegen. Das Ergebnis, welches  $j$  mit seinem Verhalten zum Zeitpunkt  $t$  erreicht hat, kann nicht exakt beobachtet werden, sondern unterliege einer zufälligen Störung  $Q(t)$ .  $Q(t)$  sei die Realisation eines Zufallsprozesses  $\tilde{Q}$ , und  $P(\cdot)$  sei die kumulative Verteilungsfunktion von  $\tilde{Q}$ . Falls Agent

---

<sup>88</sup> Vgl. Weibull (1995), S. 157.

$i$  immer nur dann wechselt, falls  $u_j(t) + Q(t) > u_i(t)$ , so ist die Wahrscheinlichkeit für einen Wechsel in der Tat durch  $P(\Delta u(\cdot))$  gegeben.

Für die Implementierung in C++ wird deshalb einfach wie folgt vorgegangen:

Ein adaptierender Agent bekommt zwar Zugriff auf die tatsächlichen Nutzenwerte und berechnet zunächst auch die wirkliche Nutzendifferenz. Anschließend wird dieses Ergebnis aber durch Addition einer Zufallsvariablen verrauscht. Man braucht dann keine probabilistische Switching-Funktion zu implementieren, sondern wählt einfach „*switch if better*“. Für den Zufallsprozess  $\tilde{Q}$  können im Prinzip beliebige Verteilungsfunktionen angesetzt werden. Besondere analytische Bedeutung hat der Fall einer Gleichverteilung in einem Intervall  $(-\hat{Q}, +\hat{Q})$ . Falls  $\hat{Q}$  hinreichend groß ist, kann mit Hilfe weiterer Vereinfachungen die Standard-Replikatorgleichung abgeleitet werden (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.4.2).

#### 4.4 Generelles Ablaufschema der agentenbasierten Simulation

Wie bei den meisten Simulationsmodellen gibt es auch hier zunächst eine **Initialisierungsphase** (Simulationsschritt 0) und anschließend die eigentliche Simulationsphase, bei der eine **Simulationsschleife**  $T$ -mal durchlaufen wird. Zur Beschreibung des generellen Ablaufschemas ist zweckmäßig, mit dem Letzteren zu beginnen.

Die folgenden Teilschritte werden in der Simulationsschleife bis zum Simulationshorizont  $T$  jeweils in jedem Zeitschritt  $t \in \{1, \dots, T\}$  durchlaufen:

I. **Jede Entscheidungssituation**, die im Modell relevant ist, vollzieht folgende Schritte:

- An sämtliche **beteiligte Agenten** wird eine Nachricht verschickt, die dazu auffordert, die aktuell verwendete Strategie zu spezifizieren.
- Anschließend werden sämtliche **Zustände** der relevanten Güter aktualisiert.

II. **Jeder Agent**, der im Modell relevant ist, vollzieht folgende Schritte:

- An sämtliche Güter, von deren Zustand der Agent **betroffen** ist, wird eine Nachricht verschickt, die dazu auffordert, den aktuellen Zustand zu spezifizieren.
- Anschließend wird entsprechend der **Nutzen** des Agenten aktualisiert. Eventuell kann auch ein kumulierter Wert über mehrere Zeitperioden neu berechnet werden – etwa bei wiederholten Spielen.

III. Behandlung der **endogenen Modellparameter** – dabei sind folgende Schritte denkbar<sup>89</sup>:

- Neues Matching der Agenten.
- Eventuell werden völlig neue Beziehungen geknüpft – oder Agenten verlassen bestehende Beziehungen durch Ortswechsel.
- Man könnte sogar aufgrund von Umweltzuständen autokatalytische Prozesse ablaufen lassen – etwa das Umkippen eines Sees.

IV. **Adaptionsprozess der Strategien:**

- Wie beschrieben, können andere Agenten imitiert werden (Imitationsmodell I).
- Zusätzlich sind auch weitere Adaptionsverfahren implementiert worden (neben dem erwähnten zweiten Imitationsmodell etwa Anpassungsmodelle und die sogenannte Sampling-Dynamik, die in Kapitel 6 Verwendung findet).
- In allen Fällen kann ergänzendes Experimentieren durch das Setzen eines Driftparameters eingestellt werden. Dies ist vor allem deshalb relevant, weil zu evolutionären Prozessen *beides* gehört: Mutation und Selektion.

Die oben genannten Ablaufschritte können aufgrund ihrer Häufigkeit auch folgendermaßen strukturiert werden:

- Schritt I und Schritt II:  
Diese Teilschritte laufen *ständig* ab. Es sind also in jedem Zeitschritt alle relevanten Entscheidungssituationen und alle relevanten Agenten abzuarbeiten.
- Schritt III und Schritt IV:  
Diese Teilschritte laufen *eventuell* ab. Lediglich in manchen Zeitschritten ändert ein Agent seine Strategie. Durch Einstellen einer niedrigen Adaptionsrate (diese entspricht der Überprüfungsrate bzw. dem Parameter  $\rho$ ) kann man dafür sorgen, dass sehr selten zwei oder mehr Agenten gleichzeitig ihre Strategie anpassen. Eine Änderung der endogenen Modellparameter findet typischerweise noch weniger häufig statt, und möglicherweise ist sie gar nicht vorgesehen.

---

<sup>89</sup> Für die Anwendungsbeispiele dieser Arbeit ist nur das neue Matching von Bedeutung. Bei Konferenzbeiträgen des Autors wurden jedoch auch andere der genannten Möglichkeiten eingesetzt (vgl. Anhang 2).

Da es einen Zusammenhang zwischen evolutionärer Spieltheorie und Populationsökologie gibt, bietet sich auch noch folgende Interpretation an: Die beiden ersten Teilschritte entsprechen einem *ökologischen Prozess*, bei dem innerhalb einer Spezies (beim symmetrischen Spiel) oder zwischen unterschiedlichen Spezies (im Falle der Asymmetrie) Interaktionen stattfinden, und zwar zunächst in einem *gegebenen Umfeld*. Die beiden letzten Teilschritte entsprechen einem *evolutionären Prozess*, bei dem sich eben dieses Umfeld ändert. Im Falle der von AXELROD beschriebenen evolutionären Simulation des wiederholten Gefangenendilemmas besteht der ökologische Prozess darin, dass mehrere Moore-Automaten gegeneinander ins Rennen geschickt werden und ständig in jedem Zeitschritt interagieren. Der evolutionäre Prozess vollzieht sich dadurch, dass AXELROD nach einer Reihe von Einzelperioden eine Bilanz zieht und davon abhängig die Zusammensetzung des Teilnehmerfelds verändert.

**Zusammengefasst:**

Nach der Initialisierung, deren Diskussion bis jetzt zurückgestellt wurde, wird insgesamt ein evolutionärer Prozess durchlaufen. Dabei gibt es Gemeinsamkeiten aber auch Unterschiede zu dem, was bei Genetischen Algorithmen oder insbesondere Evolutionsstrategien stattfindet. Gemeinsam ist, dass nach Festlegung eines Anfangszustandes eine Schleife  $T$ -mal (oder bis zu einer bestimmten Abbruchbedingung) durchlaufen wird. Dabei verändert sich der Populationszustand. Anders als beim Genetischen Algorithmus, verändert sich aber damit zugleich die *Fitnesslandschaft*. Die Zusammensetzung des Teilnehmerfelds bestimmt nämlich die Erfolgsaussichten der Strategien. Der evolutionäre Gesamtprozess kann, wie oben beschrieben, also folgendermaßen strukturiert werden:

Ökologischer Prozess (Teilschritte laufen ständig ab):

- I Spiele (Entscheidungssituationen) abarbeiten
- II Agenten abarbeiten

Evolutionäre Anpassung (Teilschritte laufen evtl. ab):

- III Umweltbedingungen ändern (evtl. neues Matching)
- IV Strategien anpassen (Adaption)

**Initialisierung:**

Diese Ausführungen für die Simulationsschleife  $t \in \{1, \dots, T\}$  geben Hinweise darauf, welche Teilschritte in der *Initialisierphase* ( $t = 0$ ) notwendig sein werden:

Bevor Entscheidungssituationen abgearbeitet werden können, müssen die Regeln (somit also das Spiel) definiert worden sein. Bevor Agenten abgearbeitet werden können, muss z.B. festgelegt werden, wie viele Agenten simuliert werden sollen. Dazu ist, wie bereits gesagt, ein Populationsobjekt notwendig, das die Agenten verwaltet. Des Weiteren ist zu bestimmen, wie die Agenten anzuordnen sind und wie deren Interaktion stattzufinden hat, bzw. wer mit wem überhaupt interagieren kann. Zu guter Letzt muss der Anfangszustand der Strategieverteilung festgelegt sein, damit nachfolgend die zeitliche Entwicklung dieser Verteilung simuliert werden kann.

Den oben genannten Teilschritten (I, II, III und IV) können also jeweils die folgenden vorbereitenden Teilschritte während der Initialisierung zugeordnet werden:

- Ia Das Spiel definieren (evtl. aus GAMBIT einlesen)
- IIa Agenten bzw. Population(en) erzeugen
- IIIa Umweltbedingungen definieren (initiales Matching)
- IVa Initialisierung der Strategien



## 5 Optimale Kontrollfrequenz von Umweltauflagen

» *Die Evolution kümmert sich nicht darum, ob Probleme wohldefiniert sind oder nicht.* «

(Holland)<sup>90</sup>

In diesem Kapitel wird die prinzipielle Arbeitsweise mit dem Simulationstool anhand eines einfachen Zwei-Personenspiels illustriert. Dazu wird zunächst ein Beispiel aus der Arbeit von BURGER<sup>91</sup> mit seinen konkreten Zahlenwerten modelliert (Abschnitt 5.1) und simuliert (Abschnitt 5.2). Anschließend wird dieses Grundmodell erweitert (Abschnitt 5.3) und die verallgemeinerte Problemstellung einer analytischen Nachbetrachtung unterzogen (Abschnitt 5.4). Abschnitt 5.5 enthält eine Sensitivitätsanalyse, und Abschnitt 5.6 stellt die Simulationsergebnisse in Beziehung zu in der Praxis beobachtbarem Verhalten.

### 5.1 Grundmodell des Inspektionsspiels

BURGER modelliert den Interessengegensatz zwischen einer Kontrollbehörde sowie einem potenziellen Umweltverschmutzer mittels der Spielmatrix in Abbildung 5-1.

Eine Unternehmung hat per Gesetz die Vorgabe, anfallende Giftstoffe ordnungsgemäß zu entsorgen. Sie hat im Prinzip aber auch die Option, die Stoffe illegal abzuladen und wird entsprechend von BURGER als potenzieller Verschmutzer modelliert. Die Kontrollbehörde ist gesetzlich zu sorgfältiger Kontrolle verpflichtet, verhält sich aber unter Umständen ebenfalls nicht vorschriftsgemäß.

		Kontrollbehörde	
		Kontrollieren	Nicht kontrollieren
Potentieller Verschmutzer	Verschmutzen	-1,2	2,-2
	Nicht verschmutzen	0,-1	0,0

Abbildung 5-1: Das Inspektionsspiel [Original nach Burger (1994)]

<sup>90</sup> Zit. nach Waldrop (1993), S. 321.

<sup>91</sup> Vgl. Burger (1994), S. 131.

Bei einer (nicht repräsentativen) Umfrage im Bekanntenkreis des Autors wurde übrigens das Ergebnis am meisten bevorzugt, das durch die Auszahlungswerte links unten gekennzeichnet ist: Die Umwelt wird nicht verschmutzt, und die Behördenmitarbeiter erfüllen wie vorgeschrieben ihre Kontrollfunktion.

Aus spieltheoretischer Sicht kann eine solche Situation jedoch nicht stabil sein, denn der Aufwand der Kontrollbehörde könnte doch eingespart werden<sup>92</sup>. Gemäß den Annahmen bei BURGER beziffert sich dieser Kontrollaufwand auf eine Nutzeinheit. Deshalb verändert sich der Auszahlungsvektor entsprechend von links unten  $(0,-1)$  zu rechts unten  $(0,0)$ .

Aber auch die Situation rechts unten ist nicht im Gleichgewicht. Falls die Behörde nämlich nicht kontrolliert, so könnte der Aufwand für eine ordnungsgemäße Entsorgung (2 NE) eingespart werden. Entsprechend verändern sich die Auszahlungen von rechts unten  $(0,0)$  zu rechts oben  $(2,-2)$  – die Kontrollbehörde erhält in diesem Fall eine negative Auszahlung, weil ihre Nachlässigkeit bei der Kontrolle offenbar geworden ist.

Gerade deshalb stellt auch die Situation rechts oben kein Gleichgewicht dar, denn nun hat die Kontrollbehörde ein Interesse, die Blamage zu vermeiden und wird eben doch kontrollieren. Gelingt es dadurch, einen Umweltsünder auf frischer Tat zu ertappen, so erhält der Verschmutzer eine Strafe und der Behördenmitarbeiter wird belohnt.

Die entsprechende Situation links oben  $(-1,2)$  ist aber letztlich ebenso wenig stabil, denn nun hätte die Unternehmung wieder einen Anreiz zum Strategiewechsel, um die Strafe zu vermeiden. Auf diese Weise gelangt man wieder zur Ausgangssituation zurück (links unten  $(0,-1)$ ), in der sich beide Seiten vorschriftsmäßig verhalten<sup>93</sup>.

Eine analytische Vorbetrachtung ergibt, dass es genau ein Nash-Gleichgewicht in gemischten Strategien gibt. Der Mitarbeiter der Kontrollbehörde *sollte* mit einer Wahrscheinlichkeit von  $\frac{2}{3}$  den Kontrollgang machen. Die Unternehmung *sollte* mit einer Wahrscheinlichkeit von  $\frac{1}{5}$  gegen die gesetzlichen Auflagen verstoßen<sup>94</sup>. Mit Hilfe des Simulationstools wird nun geprüft, ob und

---

<sup>92</sup> Übrigens würde dieses niemand merken, und es hätte keiner einen Nachteil durch ausbleibende Kontrolle. Umgekehrt wird aber ein Regelverstoß der Unternehmung gemäß den Annahmen bei BURGER immer offenbar.

<sup>93</sup> Übrigens das einzige *Nicht-Pareto-Optimum*. Interessanterweise wird diese *Lösung* trotzdem von vielen bevorzugt.

<sup>94</sup> Auch an dieser Stelle ist "*sollte*" nicht moralisch gemeint (vgl. Fußnote 19).

unter welchen Voraussetzungen diese Voraussagen eintreffen oder wie die Nash-Hypothese ggfs. modifiziert werden müsste. Dazu werden mit dem Tool zwei Populationen mit jeweils 500 Agenten angelegt – eine für die Unternehmung sowie eine für die Kontrollbehörde. Für die weiteren Ausführungen werden dazu noch folgende Benennungen vereinbart:

- $x_U$  bezeichnet den Populationsanteil der Unternehmen, die verschmutzen.
- $x_B$  bezeichnet den Populationsanteil der Behördenmitarbeiter, die kontrollieren.

Für die Adaptionodynamik wird jeweils das **Imitationsmodell I mit Drift** gewählt. Die Parameter für Lernen und Drift werden zunächst auf  $\rho = 0,00001$  bzw.  $\varepsilon = 0$  gesetzt. Zur Initialisierung der Startpopulationen wird sowohl für  $x_U$  als auch für  $x_B$  jeweils unabhängig voneinander ein zufälliger Wert aus dem Intervall (0,1) gewählt.

## 5.2 Simulationsergebnisse

Für einen repräsentativen Simulationslauf ist die zeitliche Entwicklung der Populationsanteile in Abbildung 5-2 dargestellt. Die Referenzlinie beim Wert 100 indiziert die „Soll“-Anzahl der Unternehmen, die verschmutzen, falls sich bei der ersten Population gerade das berechnete Nash-Gleichgewicht  $x_U^*$  einstellt.

Es zeigt sich, dass von einer Konvergenz zum Nash-Gleichgewicht keine Rede sein kann. Eine genauere Analyse zeigt sogar ein geringfügiges Aufschaukeln der Schwingungen. Immerhin eignet sich das Nash-Gleichgewicht aber als Bezugspunkt der Dynamik. Der schraffierte Bereich in Abbildung 5-2 kennzeichnet eine Phase, in der sich der Populationsanteil der verschmutzenden Firmen *unter* dem erwarteten Wert bewegt (die Nash-Gleichgewichtshypothese ergibt  $x_U^* = 0,2$ ). In dieser Zeitphase *lernt* die andere Population, dass sich Kontrolle momentan nicht lohnt. Entsprechend nimmt die Kontrollfrequenz ab. Fällt jedoch die Kontrollfrequenz unter den Wert, der aufgrund des Nash-Gleichgewichts zu erwarten ist ( $x_B^* = 0,67$ ), so nimmt die Rate der Umweltverschmutzung wieder zu.

Mit einem veränderten Driftparameter ( $\varepsilon = 0,01$ ) wurden etliche weitere Simulationsläufe durchgeführt. Ansonsten blieben sämtliche Parameterwerte unverändert. Als Referenzpunkt für die Drift wurde völlig unsystematisches Experimentieren gewählt ( $x_U = x_B = 0,5$ ).

## Optimale Kontrollfrequenz von Umweltauflagen

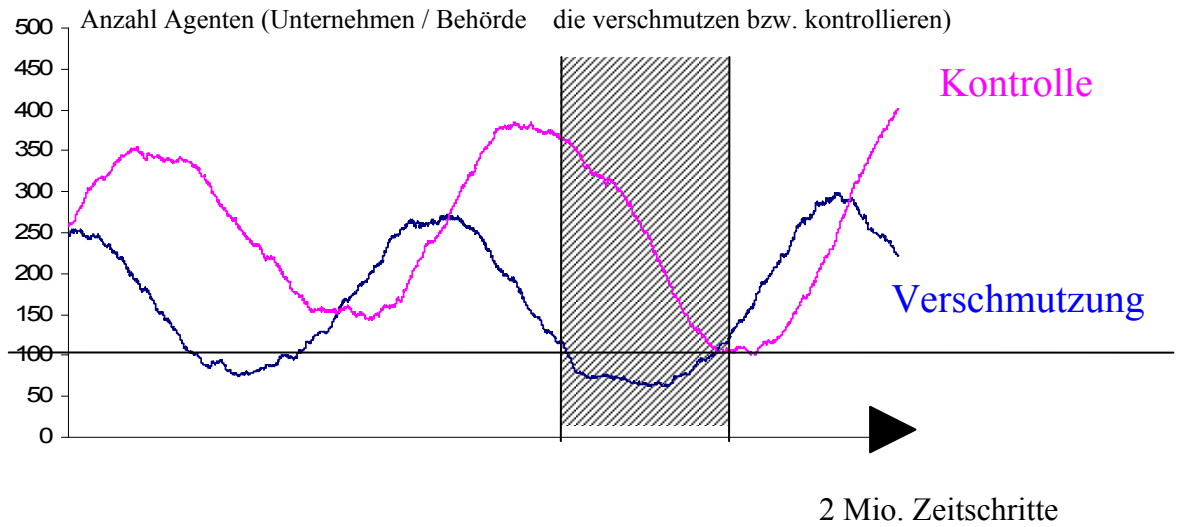


Abbildung 5-2: Simulationsergebnis Inspektionsspiel [Driftparameter = 0]

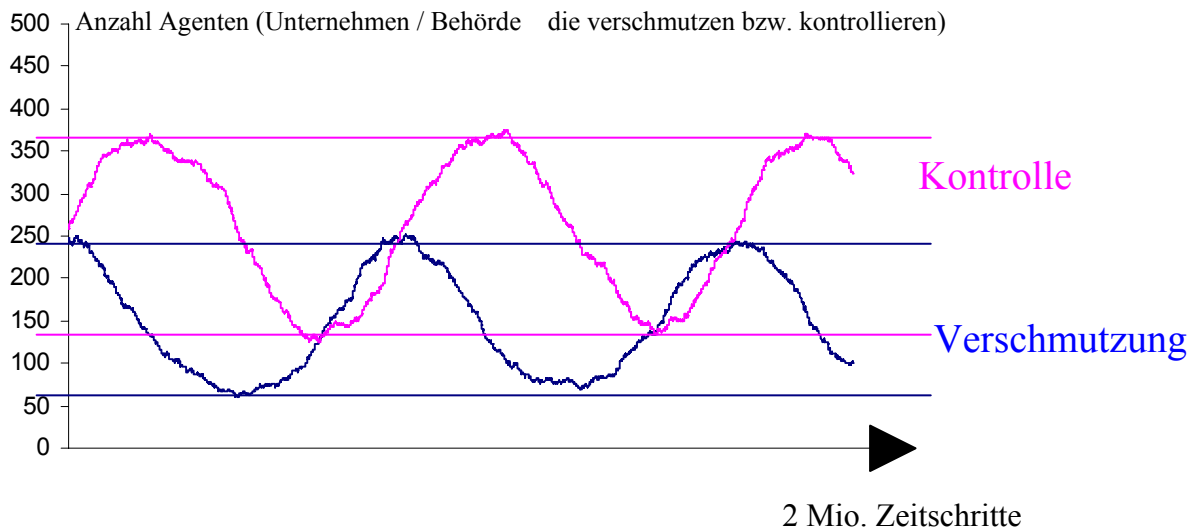


Abbildung 5-3: Simulationsergebnis Inspektionsspiel [Driftparameter = 0,01] : im weiteren Verlauf (nach 2 Mio. Schritten) werden die durch Linien angezeigten Schwankungsbereiche nicht mehr verlassen.



Bei oberflächlicher Betrachtung zeigen sich kaum Unterschiede zu Abbildung 5-2. Genauere Beobachtungen zeigen jedoch diesmal sich stabilisierende Schwingungen. Das Hinzufügen von

Drift (also zusätzliche Zufallseinflüsse) hatte somit einen contraintuitiven Effekt. Dieses Phänomen wird im Rahmen der analytischen Nachbetrachtung geklärt.

### 5.3 Modellerweiterungen

Es ist anzunehmen, dass dieses Ergebnis dem Gesetzgeber missfällt. Insbesondere sei für ihn eine Schmerzgrenze erreicht, wenn  $x_U$  (der Anteil von tatsächlichen Umweltverschmutzern) die Schranke von 0,4 übersteigt. Im bisherigen Modell trat kein Gesetzgeber in Erscheinung. Er ist auch nicht Bestandteil des Spiels, sondern er definiert das Spiel!

Im Folgenden wird untersucht, wie das dynamische Modell auf Interventionen in die Spielstruktur reagiert. Dabei wird unterstellt, dass der Gesetzgeber nach wie vor auf das Ordnungsrecht setzt. Es wird angenommen, er versucht mittels einer Strafverschärfung der Umweltauflage stärkere Geltung zu verschaffen. Diese Modellerweiterung wurde mit dem Simulationstool wie folgt abgebildet: Zunächst wird mittels GAMBIT ein *verschärftes* Überwachungs-Spiel definiert (siehe Abbildung 5-4) und unter einem gesonderten Dateinamen abgespeichert. Mit einem Interventionsmodul bzw. durch direkten Eingriff im Hauptprogramm werden die Bedingungen für die Interventionen des Gesetzgebers festgelegt, und die bestehende Spielstruktur wird zu einem bestimmten Zeitpunkt mit der neu erzeugten Datei überladen.

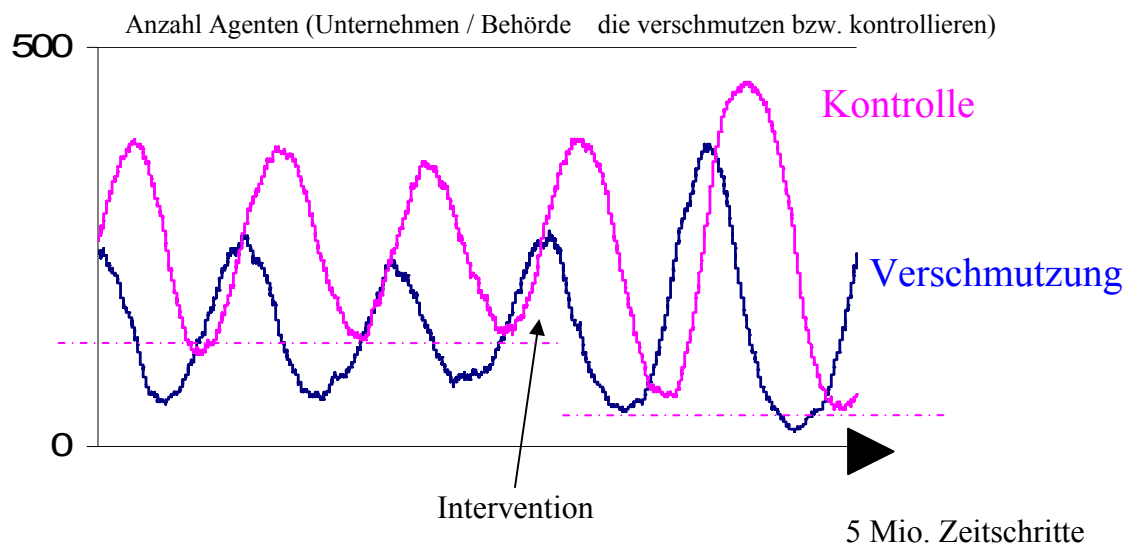
		Kontrollbehörde	
		Kontrollieren	Nicht kontrollieren
Potentieller Verschmutzer	Verschmutzen	 -3,2 ←	2,-2 ↑
	Nicht verschmutzen	 0,-1	→ 0,0

**Abbildung 5-4: Das verschärfte Inspektionsspiel [mit Abweichungspfeildiagramm]:** Der einzige Unterschied im Vergleich zum Originalszenario findet sich in der Zelle links oben. Die Strafe wurde so erhöht, dass dort nun der Wert -3 (statt -1) eingetragen ist.

Gedankliche Vorüberlegungen ergeben unmittelbar, dass sich qualitativ nichts Entscheidendes ändern kann. Mit Hilfe eines Abweichungspfeildiagramms ist dieses leicht nachzuvollziehen.

Lediglich die Strafandrohung zu erhöhen, ändert nichts an der prinzipiellen Spielstruktur, denn es bleibt dabei, dass in *jeder* Zelle der Bimatrix für einen der Spieler ein Anreiz zum Abweichen vorliegt. Zu erwarten sind also erneut Schwankungen um ein *gemischtes* Nash-Gleichgewicht.

Quantitativ sollte sich jedoch die Lage zum Besseren wenden – so zumindest das Kalkül des Gesetzgebers. In Abbildung 5-5 ist dargestellt, wie das Modell tatsächlich reagiert.



**Abbildung 5-5: Simulationsergebnis für die Intervention des Gesetzgebers**

Zunächst stellt sich der erhoffte Effekt ein, und die Rate der Umweltverschmutzung geht tatsächlich stärker zurück. Kurz darauf kommt es jedoch zur Ernüchterung. Die gewohnten Verschmutzungswerte stellen sich wieder ein, und im weiteren Verlauf werden sogar neue Rekordmarken gesetzt. Andererseits werden phasenweise auch wieder sehr geringe Werte erreicht. Insgesamt ist festzustellen, dass die mittlere Rate der Umweltverschmutzung nicht verändert wurde. Statt dessen wurden lediglich die Schwingungen um den Mittelwert verändert (in diesem Fall verstärkt). Von diesem Standpunkt betrachtet, muss die Intervention des Gesetzgebers als misslungen bezeichnet werden!

Dafür bewirkt die Intervention aber einen nachhaltigen Effekt auf das Verhalten der Umweltbehörde, der gar nicht beabsichtigt war. Für die Kontrollfrequenz  $x_B$  erhält man nämlich nach der Intervention zeitweise extrem niedrige Werte (dieser Effekt ist in Abbildung 5-5 mit Hilfe der gestrichelten Referenzlinien dargestellt.)

## 5.4 Analytische Nachbetrachtung

In diesem Abschnitt wird nun gezeigt, dass die vorgestellten Simulationsergebnisse sehr gut analytisch erklärt werden können, obwohl sie nicht unmittelbar intuitiv einleuchten.

### 5.4.1 Verallgemeinerung

Dazu wird im Folgenden von einer verallgemeinerten Spielmatrix (Abbildung 5-6) ausgegangen:





		Kontrollbehörde	
		Kontrollieren	Nicht kontrollieren
Potentieller Verschmutzer	Verschmutzen	$a, \alpha$ 	$b, \beta$ 
	Nicht verschmutzen	$c, \gamma$ 	$d, \delta$ 

Abbildung 5-6: Das verallgemeinerte Inspektionsspiel

Aus dem Abweichungspfeildiagramm liest man für die Auszahlungswerte der Unternehmung ab:

$$(b > d) \wedge (a < c) \quad (10)$$

Analog gilt für die Auszahlungswerte der Kontrollbehörde:

$$(\alpha > \beta) \wedge (\gamma < \delta) \quad (11)$$

Sind diese beiden Bedingungen erfüllt, ergibt sich *qualitativ* immer dieselbe Spielstruktur. Werden lediglich die ordinalen Nutzenkennziffern betrachtet, so kann also zwischen den Spielstrukturen (Abbildung 5-1, Abbildung 5-4 und Abbildung 5-6) nicht unterschieden werden.

Es existiert genau ein Nash-Gleichgewicht in gemischten Strategien. Wie in Abschnitt 2.2.3 dargestellt, haben gemischte Gleichgewichte die Eigenschaft, dass alle im Gleichgewicht gewählten Strategien *dieselbe Auszahlung* erhalten müssen. Daraus folgt, dass beide Spieler im Gleichgewicht indifferent sind, was ihre Strategieentscheidung betrifft.

Man kann also das gemischte Gleichgewicht einfach wie folgt ermitteln:

Die Unternehmung wählt ihr Mischungsverhältnis so, dass die Kontrollbehörde indifferent ist:

$$x_U \cdot \beta + (1 - x_U) \cdot \delta = x_U \cdot \alpha + (1 - x_U) \cdot \gamma \quad (12)$$

Aufgelöst nach  $x_U$  ergibt sich:

$$x_U = \frac{\gamma - \delta}{(\beta - \alpha) + (\gamma - \delta)} \quad (13)$$

Die Kontrollbehörde wiederum muss ihr Mischungsverhältnis genau so wählen, dass die Unternehmung indifferent ist. Entsprechend berechnet sich die optimale Kontrollfrequenz:

$$x_B = \frac{d - b}{(a - c) + (d - b)} \quad (14)$$

Wie aus Gleichung (13) unmittelbar zu erkennen ist, sind für die Gleichgewichtsstrategie der Unternehmung *ausschließlich* die Auszahlungsparameter der Kontrollbehörde relevant – diese wurden in Abbildung 5-6 bewusst mit griechischen Buchstaben gekennzeichnet (damit es unmittelbar zu erkennen ist). Umgekehrt beeinflussen *alleine* die Auszahlungen der potenziellen Verschmutzer das Gleichgewichtsverhalten der Kontrollbehörde. Eben genau deshalb hatte die Erhöhung der Strafandrohung durch den Gesetzgeber bewirkt, dass die Kontrollbehörde phasenweise viel weniger häufig kontrolliert. Jedoch war im Mittel keine Auswirkung auf die Rate der Umweltverschmutzung feststellbar.

#### 5.4.2 Bezug zur Populationsdynamik von Räuber-Beute-Systemen

HOFBAUER und SIGMUND<sup>95</sup> beschreiben die Episode, wie es zur Entwicklung der Volterra-Lotka-Gleichungen kam. Während des ersten Weltkriegs musste der Fischfang an der Adria eingeschränkt werden. Niemand hätte sich gewundert, wenn dies zu einer allgemeinen Erhöhung der Fischbestände geführt hätte. Dem war aber nicht so.

Ganz spezifisch erhöht hatten sich die Bestände der Raubfische – es gab also mehr Haie als gewöhnlich, die aber niemand unbedingt fangen wollte. Von den kleineren Beutfischen gab es überhaupt nicht mehr als zuvor, obwohl die Fischer, die langen Einschränkungen unterworfen waren, eben an diesen hohes Interesse hatten.

---

<sup>95</sup> Vgl. Hofbauer und Sigmund (1984), S. 68.



*Warum hat also die lange Schonfrist – die sich ja auf die kleinen Fische bezog – nicht diesen genutzt, sondern den Haien, für die sich nicht viel verändert haben sollte?*

Dies war im Wesentlichen die Frage, die dem Mathematiker VOLTERRA vorgelegt wurde, und bekannterweise bestand die Antwort in einem System von Differentialgleichungen<sup>96</sup>, das heute ein Standardmodell der Räuber-Beute-Systeme darstellt.

Auch ohne die Gleichungssysteme im Einzelnen zu betrachten, drängt sich bereits der Verdacht auf, dass das in dieser Arbeit simulierte Verhalten des Inspektionsspiels vieles mit der Dynamik von Räuber-Beute-Systemen zu tun hat.

Eine mögliche Frage könnte nämlich ganz analog lauten:

*Warum hat die Erhöhung der Strafe – die sich ja auf einen potentiellen Verschmutzer bezieht – nicht im Mittel zu einer Verringerung der Verschmutzungsrate geführt? Warum hat die Strafverschärfung stattdessen das Verhalten der Kontrollbehörde beeinflusst, für die sich nicht viel verändert haben sollte?*

Im Folgenden wird gezeigt, dass das in diesem Abschnitt verwendete Imitationsmodell unter spezifischen Bedingungen isomorph zur Standard-Replikatorgleichung ist und damit in engem Zusammenhang zu den Volterra-Lotka-Gleichungen steht.

Als Vereinfachung wird zunächst angenommen, dass es kein Experimentieren gibt – der Driftparameter  $\varepsilon$  wird also zu Null gesetzt. Zudem wird unterstellt, dass  $\hat{Q}$  hinreichend groß ist:

$$\hat{Q} > \text{Max}\{a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta\} - \text{Min}\{a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta\} \quad (15)$$

$\hat{Q}$  ist also größer als jede mögliche Nutzendifferenz, sodass ansonsten notwendige Fallunterscheidungen die Analyse nicht komplizieren.

Dann ist nämlich  $P(\Delta u(\cdot)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\hat{Q}} \cdot \Delta u(\cdot)$  eine geeignete Switching-Funktion, die die

Wahrscheinlichkeit eines Strategiewechsels in Abhängigkeit von der Nutzendifferenz angibt.

Des Weiteren wird der Fall unendlich großer Populationen untersucht. Diese Vorgehensweise ist Standard und erlaubt wegen des Gesetzes der großen Zahlen eine deterministische Betrachtung der Populationsanteile.

---

<sup>96</sup> LOTKA hatte schon früher ein ähnliches Modell, vgl. Sigmund (1995), S. 68.

Zunächst erfolgt eine Konzentration auf die Dynamik bei den Unternehmen:

Zur besseren Lesbarkeit werden Unternehmen, welche die Strategie *Verschmutzen* gewählt haben, im Folgenden als **i-Agenten** bezeichnet, die anderen Unternehmen, die *nicht verschmutzen*, als **j-Agenten**. Zunächst interessiert, wie sich der Populationsanteil der i-Agenten (bzw.  $x_U$ ) zeitlich entwickelt.

In jeder Zeitperiode gilt für jeden Agenten, dass mit der konstanten Rate  $\rho$  eine Überprüfung der Strategie stattfindet. Die Zusammensetzung der Population ändert sich nur dann, wenn entweder ein i-Agent einen j-Agenten imitiert oder aber ein j-Agent einen i-Agenten. In beiden Fällen ist jeweils zu berücksichtigen, dass die Gegenseite kontrollieren kann oder nicht.

Die folgenden vier Fälle sind also relevant, und die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Fälle sowie die Wahrscheinlichkeit  $P(\Delta u(\cdot))$  eines Strategiewechsels können vorab berechnet werden:

- $i$ -Agent lernt

$x_U \cdot \rho \cdot (1 - x_U) \cdot x_B$

und beobachtet  $j$ -Agent

...welcher kontrolliert wird

$$P(\Delta u(\cdot)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\hat{Q}} \cdot (c - a)$$
  
- $i$ -Agent lernt

$x_U \cdot \rho \cdot (1 - x_U) \cdot (1 - x_B)$

und beobachtet  $j$ -Agent

...welcher nicht kontrolliert wird

$$P(\Delta u(\cdot)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\hat{Q}} \cdot (d - b)$$
  
- $j$ -Agent lernt

$x_U \cdot \rho \cdot (1 - x_U) \cdot x_B$

und beobachtet  $i$ -Agent

...welcher kontrolliert wird

$$P(\Delta u(\cdot)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\hat{Q}} \cdot (a - c)$$
  
- $j$ -Agent lernt

$x_U \cdot \rho \cdot (1 - x_U) \cdot (1 - x_B)$

und beobachtet  $i$ -Agent

...welcher nicht kontrolliert wird

$$P(\Delta u(\cdot)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\hat{Q}} \cdot (b - d)$$

In den ersten beiden Fällen werden die i-Agenten zu j-Agenten, und in den letzten beiden Fällen ist es umgekehrt. Von Interesse ist nur der Nettopopulationszufluss von der Strategie j zur Strategie i. Im Gegensatz zu Gleichung (9) wird im Folgenden bereits durch die Populationsgröße  $N$  dividiert. Also erhält man unmittelbar für den Populationsanteil  $x_U$ :

$$x_U(t+1) = x_U(t) + \left[ x_U \cdot (1 - x_U) \cdot \left[ x_B \cdot \frac{\rho}{\hat{Q}} \cdot (a - c) + (1 - x_B) \cdot \frac{\rho}{\hat{Q}} \cdot (b - d) \right] \right] \quad (16)$$

Analog kann für die andere Population der Behördenmitarbeiter die Berechnung erfolgen:

$$x_B(t+1) = x_B(t) + \left[ x_B \cdot (1 - x_B) \cdot \left[ x_U \cdot \frac{\rho}{\hat{Q}} \cdot (\alpha - \beta) + (1 - x_U) \cdot \frac{\rho}{\hat{Q}} \cdot (\gamma - \delta) \right] \right] \quad (17)$$

Um von den Differenzgleichung zu Differentialgleichungen zu gelangen, werden zunächst kleinere Zeitintervalle  $\tau \ll 1$  betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit einer Strategieüberprüfung pro Zeitintervall ist dann auf  $\rho \cdot \tau$  reduziert, und durch geeignete Umgruppierung ergibt sich:

$$x_U(t + \tau) = x_U(t) + \frac{\rho \cdot \tau}{\hat{Q}} [x_U \cdot (1 - x_U) \cdot [(b - d) + x_B \cdot (a - b - c + d)]] \quad (18)$$

$$x_B(t + \tau) = x_B(t) + \frac{\rho \cdot \tau}{\hat{Q}} [x_B \cdot (1 - x_B) \cdot [(\gamma - \delta) + x_U \cdot (\alpha - \beta - \gamma + \delta)]] \quad (19)$$

Mit dem Grenzübergang  $\tau \rightarrow 0$  erhält man

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{x_U(t + \tau) - x_U(t)}{\tau} \equiv \dot{x}_U = \frac{\rho}{\hat{Q}} [x_U \cdot (1 - x_U) \cdot [(b - d) + x_B \cdot (a - b - c + d)]] \quad (20)$$

bzw. analog

$$\dot{x}_B = \frac{\rho}{\hat{Q}} [x_B \cdot (1 - x_B) \cdot [(\gamma - \delta) + x_U \cdot (\alpha - \beta - \gamma + \delta)]] \quad (21)$$

Man setze nun  $(b - d)$  zu  $a_{12}$  und  $(c - a)$  zu  $a_{21}$  sowie  $(\gamma - \delta)$  zu  $b_{12}$  und  $(\beta - \alpha)$  zu  $b_{21}$ :

Bis auf einen Vorfaktor, der ohne Einschränkung der Allgemeinheit zu 1 gesetzt werden kann, ist die Dynamik mathematisch isomorph zum folgenden Differentialgleichungssystem, das HOFBAUER und SIGMUND als spieldynamische Differentialgleichung für asymmetrische Konflikte bezeichnen<sup>97</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x(1-x)(a_{12} - (a_{12} + a_{21})y) \\ \dot{y} &= y(1-y)(b_{12} - (b_{12} + b_{21})x) \end{aligned} \quad (22)$$

---

<sup>97</sup> Vgl. Hofbauer und Sigmund (1984), S. 189 und dort insbesondere das Gleichungssystem (27.7).

## 5.5 Sensitivitätsanalyse

Obwohl es sich um ein einfaches Zwei-Personenspiel handelt, haben doch eine Reihe von Parametern Eingang in das Simulationsmodell gefunden. Diese werden nun allesamt daraufhin geprüft, ob sie entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse haben.

### 5.5.1 Anzahl der Populationen und Populationsgröße

Da es sich um ein *asymmetrisches* Zwei-Personenspiel handelt, werden zwingend zwei entsprechende Populationen benötigt. Im Falle eines symmetrischen Zwei-Personenspiels wären mehrere Vorgehensweisen denkbar gewesen. Man könnte dann alle Agenten einer einzigen Population zuordnen oder aber für jede Spielerrolle eine eigene Population vorsehen. Die letztgenannte Vorgehensweise ermöglicht dann die Analyse rollenspezifischen Verhaltens. Vor allem für das Falke-Taube-Spiel sind dazu interessante Untersuchungen vorgenommen worden<sup>98</sup>. Allgemeiner formuliert gibt es beim symmetrischen  $n$ -Personenspiel immer diese beiden grundsätzlichen Vorgehensweisen: Eine einzige Population verwaltet sämtliche Agenten, oder aber  $n$  Populationen verwalten jeweils die Agenten für eine der  $n$  Spielerrollen. Im vorliegenden asymmetrischen Fall bestand jedoch keine Alternative.

Dagegen war es willkürlich, die Populationsgrößen jeweils auf  $N_U = N_B = 500$  festzusetzen. Es ist auch nicht zwingend notwendig, für beide Populationen dieselbe Populationsgröße zu verwenden. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse nicht entscheidend von diesen Werten abhängen, wurden einige Simulationsläufe mit  $N_U = N_B = 5000$  wiederholt. Der Effekt, der dann eintritt, ist lediglich, dass der Verlauf der Strategienevolution "glatter" verläuft als dieses bei Abbildung 5-3 der Fall war<sup>99</sup>. Für das hier betrachtete Beispiel war also die gewählte Populationsgröße von 500 hinreichend hoch. Leider darf aber daraus nicht der Schluss gezogen werden, dass bei vergleichbaren Problemstellungen diese Größenordnung immer ausreichen wird. In dem Zusammenhang sollte man sich daran erinnern, dass ein Vorteil der evolutionären Betrachtungsweise eben die plausiblere Interpretation eines gemischten Nash-Gleichgewichtes ist. Die Populationsgröße sollte deshalb hoch genug sein, um das zu erwartende Mischungsverhältnis adäquat abzubilden.

---

<sup>98</sup> Vgl. Weibull (1995), S. 183ff und Sigmund (1995), S. 256.

<sup>99</sup> Die entsprechenden Abbildungen können dann kaum von Sinuskurven unterschieden werden.

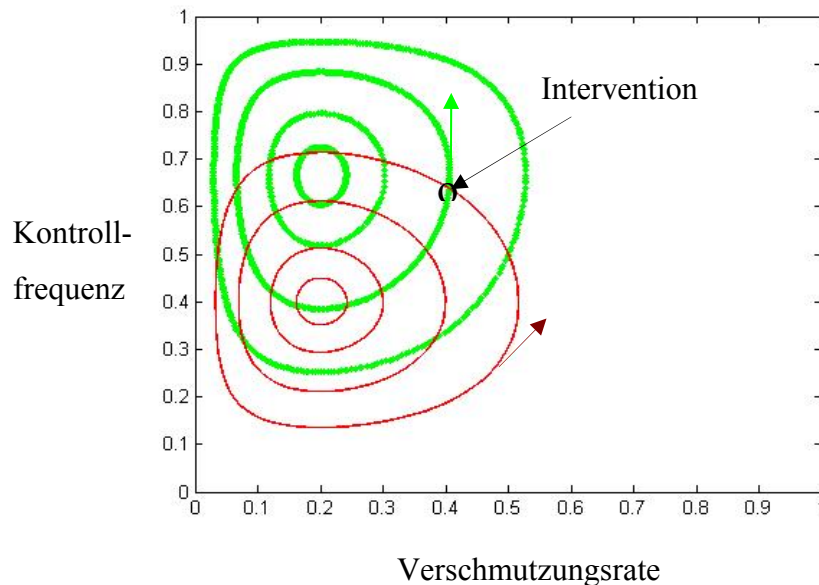
### 5.5.2 Anzahl der Simulationsperioden und Anpassungsrate

In jeder spezifischen Simulationsperiode ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Agent seine Strategie überprüft, relativ klein. Bei der gewählten Anpassungsrate von  $\rho = 0,00001$  werden auch selten mehrere Agenten gleichzeitig ihre Strategie verändern. Unter solchen Voraussetzungen heben sich Änderungen bei den Parametern  $T$  und  $\rho$  gegebenenfalls auf. Halbiert man etwa die Anpassungsrate  $\rho$ , so muss eben im Schnitt doppelt so lange gewartet werden, bis bei einem Agenten eine Strategienüberprüfung stattfindet. Mit einem verdoppelten Simulationszeitraum wird dieser Effekt dann genau ausgeglichen. Ähnlich wie bei der Populationsgröße muss auch bei der Anpassungsrate nicht zwingend mit demselben Parameter für beide Populationen gearbeitet werden. Insbesondere die Analogie zum Räuber-Beute-System ist geeignet, einen entsprechenden Unterschied zu motivieren. Bei einer typischen Populationsdynamik findet man nämlich meist unterschiedliche Fortpflanzungsraten. Meist reproduzieren sich die Beutetiere viel schneller als die Räuber. Ganz entsprechend könnte argumentiert werden, dass die Kontrollbehörde in ihrem Anpassungsverhalten viel träger ist als die Unternehmungen. An dem grundlegenden Befund, dass nämlich Schwankungen der Populationsanteile auftreten, ändert jedoch eine mögliche Differenzierung der Anpassungsraten nichts.

### 5.5.3 Initialisierung der Strategien

Unabhängig von der Initialisierung sind Schwankungen zu beobachten. Allerdings hat die Strategieninitialisierung einen Einfluss auf die *Höhe* dieser Schwankungen. Je weiter der Initialisierungspunkt vom Nash-Gleichgewicht entfernt ist, desto stärker die Oszillation. Dieses kann leicht mit Hilfe von Abbildung 5-7 nachvollzogen werden.

Die Fixpunkte der dort betrachteten Dynamik sind Zentren und somit grenzstabil (Eigenwerte mit Realteil 0). Dies erklärt auch, warum ohne Driftparameter die Dynamik an den Rand des Strategiensimplex gerät. Jede Simulation wird in der Praxis strikt positive Zeitintervalle ( $\rho \cdot \tau$ ) verwenden müssen, und zudem ist eine Populationsgröße von 500 noch ziemlich weit von unendlich entfernt. Insgesamt wirkt sich dieses wie eine (schlechte) Euler-Vorwärts-Integration aus. Fügt man etwas Zufallsdrift hinzu, wird der Fixpunkt zwar leicht verschoben. Dafür erhält man aber negative Realteile der Eigenwerte, und das dynamische Verhalten wird stabilisiert.



**Abbildung 5-7: Trajektorien für die beiden unterschiedlichen Strafregime:** Mit Hilfe von Matlab wurde das Gleichungssystem (22) numerisch integriert (Runge-Kutta-Verfahren). Die grünen Trajektorien geben die dynamische Entwicklung für das ursprüngliche Strafregime an ( $a=-1$ ), die roten Trajektorien beschreiben das verschärfte Regime ( $a=-3$ ). Die Pfeile indizieren jeweils die Richtung in der die Trajektorien durchlaufen werden.

### Kritische Betrachtung der Replikator-Dynamik

Die Verwendung der Replikatorgleichung zur Modellierung sozialer Systeme wird durchaus kritisch gesehen<sup>100</sup>. Es ist auch zuzugeben, dass die Annahme eines sehr hohen Fehlerterms  $\hat{Q}$  unrealistisch ist. Nur mit einer solchen Annahme konnten jedoch der Bezug zu den Volterra-Lotka-Gleichungen hergestellt werden. Für die vorgestellten Simulationsläufe wurden bewusst niedrigere Werte von  $\hat{Q}$  angesetzt. Darum sind manche Eigenschaften, die HOFBAUER und SIGMUND für die spieldynamischen Differentialgleichungen herausarbeiten, *nicht* auf die Simulationsergebnisse übertragbar – dies betrifft insbesondere die Zeitmittel<sup>101</sup>. Dennoch hat die analytische Betrachtung eine Vielzahl von Einsichten geliefert, die manche Eigenarten der Simulationsläufe plausibel machen. Auch der Grund für das Aufschaukeln der Schwankung nach der Intervention wird so deutlich. Angenommen man wechselt zum angezeigten Interventionszeitpunkt von der grünen Trajektorie zum verschärften Strafregime: Dann tritt

<sup>100</sup> Es ist insbesondere zu beachten, dass es eine ganze Reihe alternativer Lernmodelle gibt, die in vielen sozialen Situationen eher plausibel sind. Vgl. Brenner (1999) zu einer Kategorisierung solcher Modelle.

<sup>101</sup> Vgl. Hofbauer und Sigmund (1984), S. 191.

genau der Effekt ein, dass die Verschmutzungsrate zuerst drastisch zurückgeht, aber später umso stärker ausfällt. Allerdings ist eine solche Entwicklung nicht zwingend, denn bei einem anderen Interventionszeitpunkt könnte der Eingriff genauso gut eine Verringerung der Oszillation zur Folge haben.

## 5.6 Praxisrelevanz und methodische Schlussfolgerung

### 5.6.1 Schwankungen als praxisrelevantes Verhalten?

Schwankungen wie in Abbildung 5-2 oder Abbildung 5-3 werden bei kybernetischen Systemen öfters beobachtet, etwa beim Feder-Masse-System oder dem elektrischen Schwingkreis. Diese beiden Systeme nehmen einen prominenten Platz in der Lehre der technischen Kybernetik ein – als Paradebeispiele für die Dynamik einer Differentialgleichung zweiter Ordnung. Um das jeweilige Schwingungsverhalten zu erklären, lohnt sich ein Blick auf die Ressource *Energie*. Die Gesamtenergie des Systems verteilt sich nämlich auf die Subsysteme, und die beobachtete Schwingung lässt sich als Änderung dieser Verteilung interpretieren.

Vernachlässigt man Verlusteffekte (durch Reibung oder elektrischen Widerstand), so bleibt die Gesamtenergie konstant und pendelt zwischen kinetischer Energie (Masse) und potentieller Energie (Feder) hin und her. Im Fall des elektrischen Schwingkreises steckt die Energie entsprechend entweder in der Spule oder im Kondensator.

Ganz ähnlich lohnt sich im Kontext des Inspektionsspiels ein Blick auf die Ressource *Aufmerksamkeit*<sup>102</sup>.

Das Unternehmen – bei BURGER reduziert auf sein umweltschädigendes Potential – sieht sich in der Praxis mit *einer Vielzahl* unterschiedlicher Anforderungen konfrontiert. Die ordnungsgemäße Entsorgung von Schadstoffen gehört sicher dazu. Daneben ist ein Unternehmen aber auch jeder Menge arbeits- und steuerrechtlicher Vorschriften ausgesetzt. Außerdem sind die Interessen privater Akteure wie Banken, Versicherungen, Gewerkschaften, Kunden und Lieferanten ständig im Blick zu halten<sup>103</sup>. Betrachtet man Aufmerksamkeit als eine knappe

---

<sup>102</sup> SIMON betrachtet diese Ressource explizit neben Boden, Kapital, Kraftstoff und Zeit als potentiellen Knappheitsfaktor, vgl. Simon (1994), S. 22.

<sup>103</sup> Vgl. hierzu den Stakeholder-Begriff.

Ressource, so ist leicht zu erklären, dass das Management bestimmte Dinge aus dem Blick verliert, solange die Entwicklungen (vermeintlich) im „*grünen Bereich*“ verlaufen.

Ganz ähnlich stellt sich das Aufmerksamkeitsproblem auf Seiten der Kontrolleure dar. Angenommen der Kontrollvollzug obliegt dem Wirtschaftskontrolldienst. Dieser hat jedoch auch jede Menge weiterer Aufgaben: Gaststätten sind zu kontrollieren, Flurbereinigung, Landwirtschaftsbetriebe, Lebensmittelkontrolle, etc.

### 5.6.2 Methodische Schlussfolgerungen

Simulationen sind nicht als Ersatz von Theorie einzusetzen, sondern immer nur zur Ergänzung derselben. Die Beziehung zwischen erwartetem Mischungsverhältnis und der geeigneten Populationsgröße wurde bereits erwähnt. Das Motto „*Theorie soll deine Beobachtungen leiten*“ passt hier ganz gut, denn nach Möglichkeit sollte Theorie auch unsere Simulationsexperimente leiten. Falls im konkreten Fall nämlich die Populationsgröße zu gering angesetzt wird, so werden verfälschende Ergebnisse nicht zu vermeiden sein. Es droht dann insbesondere, dass der Evolutionsprozess an die Ränder des Strategien-Simplex gerät. Damit ist unmittelbar der Bezug zur nächsten Schlussfolgerung gegeben: Falls ein Imitationsmodell verwendet wird, sollte auf jeden Fall mit einem Driftparameter simuliert werden. Ansonsten besteht keine Chance, den Rand eines Strategien-Simplex wieder zu verlassen.

Des Weiteren sollte die hohe Zahl  $T$  nicht abschreckend wirken. Es ist nämlich nur deshalb eine derartig hohe Zahl von zwei Millionen Simulationszeitschritten gewählt worden, damit im Gegenzug die Anpassungsrate pro Zeiteinheit sehr gering gehalten werden kann ( $\rho = 0,00001$ ). Auf diese Weise ist erreicht worden, dass nur sehr selten mehrere Agenten zugleich ihre Strategie adaptieren, was günstige Auswirkungen auf die dynamische Stabilität hat. Zudem erlaubt es die Annäherung der ereignisdiskreten Dynamik an die aus der Theorie bekannten zeitkontinuierlichen Modelle.

Theorie und Simulation spielen also auf dreifache Weise zusammen. Die Theorie unterstützt bei der Bestimmung von Simulationsparametern. Simulationsexperimente werfen neue Fragen auf, die theoretisch zu klären sind, und die Theorie hilft dann wieder dabei, um eine analytische Nachkontrolle der Simulationsergebnisse zu gewährleisten. Im Zweifel sehen eben vier Augen mehr als zwei!



## 6 Strategisches Verhalten bei der Finanzierung einer Kläranlage

» *With private goods markets work.*

*With public goods markets fail, but voting and lotteries work.* «

(John Ledyard)

In diesem Kapitel wird das Beispiel aus der Einleitung wieder aufgegriffen. Drei Fischzüchter stehen vor der Frage, ob sie gemeinsam eine Kläranlage finanzieren sollen. Zweck der nachfolgenden Ausführungen ist es, zunächst das volle Ausmaß der gesamtwirtschaftlichen Ineffizienz aufzuzeigen, falls die Zahl der Betroffenen erhöht wird. Dazu wird zunächst in Abschnitt 6.1 eine formale Beschreibung des allgemeinen Problems vorgenommen, wobei beliebig viele Fischzüchter beteiligt sein können. In Abschnitt 6.2 wird der Bezug zum *Coase-Theorem* hergestellt. Die Anpassungen des Simulationsmodells an dieses konkrete Anwendungsbeispiel sind Gegenstand von Abschnitt 6.3. In Abschnitt 6.4 wird die Frage geklärt, ob sich die Fischzüchter spontan organisieren und auf freiwilliger Basis die Finanzierung der Kläranlage bewerkstelligen können. In Abschnitt 6.5 werden anreizkompatible Mechanismen untersucht, die aus der Literatur bekannt sind. Dabei wird mit dem Simulationstool vor allem untersucht, inwieweit die Funktionsweise dieser Mechanismen leidet, falls Abstriche bei der Annahme vollständiger Rationalität gemacht werden. Außerdem wird das Unterstützungspotential des Simulationstools bei der Entwicklung neuer Mechanismen thematisiert.

### 6.1 Formale Darstellung des Grundproblems

Die nachfolgend verwendete Notation ist eng an das Modell von ROB angelehnt<sup>104</sup>. Betrachtet wird eine Papierfabrik, die Abwasser in einen Fluss ableitet. Kurz nach der Einleitestelle mündet der Fluss in einen See. An diesem See sind  $n$  Fischzüchter angesiedelt (mit den Indizes  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$ ).

---

<sup>104</sup> Vgl. Rob (1989). Er betrachtet allgemein eine Unternehmung, welche durch ihre Tätigkeit eine unbestimmte Anzahl von Anliegern beeinträchtigt. Hier werden Papierfabrik und Fischzüchter eingeführt, damit der Bezug zu den bisher verwendeten Beispielen hergestellt ist.

Es wäre möglich, das Abwasser mit modernster Technologie zu klären. Dieses verursacht dann aber Zusatzkosten in Höhe von  $C > 0$ , und der Papierfabrikant wird sich für diese Option nur entscheiden, falls diese Kosten ersetzt werden.

Auf der anderen Seite sind *externe Nutzen* mit dem Bau einer solchen Kläranlage verbunden, denn es gelangen weniger Schadstoffe in den See, und davon profitieren die Fischzüchter (mehr Fische und/oder bessere Qualität). Der potentielle Nutzen aus der Schadstoffreduktion kann von Fischzüchter zu Fischzüchter unterschiedlich sein und ist jeweils *private Information* (also ausschließlich dem entsprechenden Fischzüchter bekannt).

Der Nutzen von Fischzüchter  $i$  wird mit  $x_i$  bezeichnet.

Was den Nutzen der anderen ( $j \neq i$ ) betrifft, seien nur kumulative Verteilungsfunktionen  $F_j(x_j)$  bekannt:

$$F_j(x_j) \quad j = 1, \dots, n \quad (23)$$

Bei den  $F_j(\cdot)$  handelt es sich um *allgemeines Wissen*. Diese sind also auch dem Papierfabrikanten bekannt. Des Weiteren wird kontinuierliche Differenzierbarkeit der  $F_j(\cdot)$  unterstellt.

Die zugehörigen Dichtefunktionen sind:

$$f_j(x_j) \quad j = 1, \dots, n \quad (24)$$

Die  $F_j(\cdot)$  sind jeweils auf beschränkten Intervallen  $D_j$  definiert:

$$D_j = [\underline{x}_j, \bar{x}_j] \quad j = 1, \dots, n \quad (25)$$

Außerdem sind folgende Definitionen nützlich:

$$\mathbf{x} \equiv (x_1, \dots, x_n) \quad (26)$$

$$\mathbf{x}_{-i} \equiv (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \quad (27)$$

In einer idealen Welt wäre der Vektor  $\mathbf{x}$  der externen Nutzen allgemein bekannt. Dann wäre es einfach, die First-Best-Lösung abzuleiten:

Man sollte die Kläranlage dann und nur dann bauen, falls

$$\sum_{i=1}^n x_i > C \quad (28)$$

Für das soziale Verbesserungspotential  $S(\mathbf{x})$ , das der First-Best-Lösung entspricht, ergibt sich:

$$S(\mathbf{x}) = \text{Max} \left\{ 0, \sum_{i=1}^n x_i - C \right\} \quad (29)$$

Leider ist aber nur eine Second-Best-Lösung erreichbar, weil die notwendige Information dezentral verteilt ist. Niemand kennt also den vollständigen Vektor  $\mathbf{x}$ , und deshalb kann kein einzelnes Individuum mit Sicherheit beurteilen, ob Ungleichung (28) erfüllt ist oder nicht.

Im Unterschied zum Modell von ROB wird hier nicht zwingend unterstellt, dass der Fabrikbesitzer ausschließlich den eigenen Erwartungsnutzen maximiert. Statt dessen wird eine verallgemeinerte Zielfunktion angenommen:

$$\alpha \cdot U_0 + (1 - \alpha) \cdot \left[ U_0 + \sum_{i=1}^n U_i \right], \quad \alpha \in (0,1) \quad (30)$$

Dabei bezeichnet  $U_0$  den Erwartungsnutzen des Papierfabrikanten und  $U_i$  den Erwartungsnutzen von Fischzüchter  $i$ . Der Ausdruck innerhalb der eckigen Klammer beschreibt also den gesamtwirtschaftlichen Erwartungsnutzen. Mit Hilfe des Parameters  $\alpha$  können beliebige Kombinationen von Egoismus und Altruismus abgebildet werden. Das Modell von ROB entspricht dem Spezialfall ( $\alpha = 1$ ).

## 6.2 Bezug des Grundproblems zum Coase-Theorem

Bis jetzt beschränkte sich die Betrachtung auf die Annahme, dass der Fabrikbesitzer völlig frei in seiner Entscheidung ist. Er könnte die Kläranlage bauen lassen oder eben nicht. Um mit der Sprache von COASE zu sprechen: Die *Eigentumsrechte* sind bei dem Papierfabrikanten.

Der Fabrikbesitzer konnte also nicht gezwungen werden, etwas zur Schadstoffreduktion zu unternehmen. Andererseits konnte er sich aber durchaus *freiwillig* den Umstand zunutze machen, dass ein gesamtwirtschaftliches Verbesserungspotential vorhanden sein mag.

Man stelle sich vor, der Fabrikbesitzer ist ein netter Mensch und umweltbewusst dazu. Er weiß um die technischen Fortschritte bei der Abwasserreinigung. Er weiß ebenfalls Bescheid über die Zusatzkosten der modernsten Alternative (im Vergleich zum gesetzlich vorgeschrieben Standard). Er hat eine gewisse Vorstellung von dem Nutzenpotential für die Fischzüchter und kommt zu dem Schluss: „*Eigentlich sollte sich die neueste Kläranlage insgesamt lohnen*“. Nun

sei die eigene Geschäftslage des Papierfabrikanten etwas kritisch – die Konkurrenz ist hart. Unnötige Zusatzkosten kann er nicht verantworten, sonst bleiben noch mehr Aufträge aus. Da der Fabrikbesitzer, wie gesagt, ein netter Mensch ist, macht er sich aber Gedanken über eine für die Allgemeinheit nützliche Lösung.

*Könnten die Zusatzkosten denn nicht von jenen getragen werden, die einen entsprechenden Zusatznutzen haben?*

Wahrscheinlich hat er sich zuvor noch nie mit Mechanismus-Design beschäftigt, und deshalb entwickelt der Papierfabrikant zunächst einmal die folgende Idee:

### **Pre-Mechanismus-Design-Lösung**

Eine erste (evtl. naiv anmutende?!) Vorgehensweise besteht darin, die Fischzüchter ganz einfach zu fragen. Der Fabrikbesitzer erhält dann von jedem Fischzüchter eine Nutzenangabe (im Folgenden definiert als ein Signal  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ ). Mit dieser Nutzenangabe signalisiert jeder Fischzüchter zugleich seine Bereitschaft, einen entsprechenden Beitrag zur Finanzierung der Kläranlage zu leisten. Aus Gründen, die schon in der Einleitung skizziert wurden, darf nicht erwartet werden, dass dann die Beitragsangebote  $y_i$  dem wahren Nutzen  $x_i$  entsprechen.

Dennoch könnte der Fabrikbesitzer mit folgender Entscheidungsregel in einigen Fällen eine Pareto-Verbesserung herbeiführen:

Man sollte die Kläranlage dann und nur dann bauen, falls

$$\sum_{i=1}^n y_i > C \quad (31)$$

und man verlange im Falle der Realisierung von jedem Fischzüchter den Beitrag

$$c_i = C \cdot y_i / \sum_{j=1}^n y_j, \quad i = 1, \dots, n \quad (32)$$

Im Folgenden wird diese Entscheidungsregel als *naives proportionales Beitragsschema* bezeichnet (abgekürzt nPBS). Auf jeden Fall wird es für den Fabrikbesitzer selbst zu keiner Nutzenveränderung kommen, denn die Beitragszahlungen nach (32) sind gerade so bemessen, dass das Finanzierungsbudget exakt ausgeglichen ist. Im Folgenden wird angenommen, dass kein Fischzüchter einen Anreiz hat, seine Zahlungsbereitschaft überhöht darzustellen. Dies ist äußerst plausibel und lässt sich folgendermaßen formalisieren:

**Annahme A.1 (Nicht-Übertreibungs-Annahme)**

Wenn es „Common Knowledge“ ist, dass sich alle beteiligten Fischzüchter in einer Situation gegeben durch Gleichung (23) bis (27) befinden und dass der Mechanismus-Designer (in Person des Papierfabrikanten) das naive proportionale Beitragsschema verwendet, so erfüllen die angegebenen Zahlungsbereitschaften folgende Ungleichung:

$$y_i \leq x_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (33)$$

**Bemerkung:** Es kann sehr leicht gezeigt werden, dass wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung jede mögliche Übertreibungsstrategie dominiert. Würde nämlich die Angabe irgendeiner überhöhten Zahlungsbereitschaft ausschlaggebend (pivotal) für die Realisierung der Kläranlage sein, so müsste nach (32) zumindest ein Teil der überhöhten Zahlungsbereitschaft auch als Beitrag eingefordert werden. Somit würde aber die Beitragszahlung  $c_i$  den tatsächlichen Nutzen  $x_i$  überschreiten, und der entsprechende Fischzüchter wäre mit dem nicht realisierten Projekt besser gestellt<sup>105</sup>. Also kann unter keinen Umständen eine Übertreibungsstrategie erfolgreicher sein als die korrekte Nutzenangabe. Somit ist die Plausibilität der Annahme A.1 hinreichend begründet.

**Proposition 1:**

Unter der Annahme A.1 führt das proportionale Beitragsschema entweder zu einer Pareto-Verbesserung oder zur Beibehaltung des Status Quo.

**Beweis:**

Weil (32) nur dann relevant wird, falls (31) erfüllt worden ist, gilt:

$$c_i < y_i \leq x_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (34)$$

Falls also die Kläranlage gebaut wird, so gilt:

$$u_i = x_i - c_i > 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (35)$$

Andernfalls bleibt es beim Status Quo, und somit sind alle Nutzenwerte  $u_i$  gleich 0.

---

<sup>105</sup> Ohne Einschränkung der Allgemeinheit werden sämtliche Nutzenfunktionen derart normalisiert, dass die Beibehaltung des Status Quo grundsätzlich für alle Betroffenen mit 0 NE bewertet wird.

Proposition 1 bedeutet, dass jeder Fischzüchter damit einverstanden sein sollte, sich diesem (Pseudo)-Mechanismus *freiwillig* zu unterwerfen, denn im Vergleich zum Status Quo kann es nur zu Verbesserungen kommen. Bei der bisherigen Betrachtung wird davon ausgegangen, dass der Papierfabrikant keinerlei egoistische Eigeninteressen verfolgt. Das Zahlungsschema nach (31) und (32) ist derart gestaltet, dass der gesamte Nutzengewinn an die beteiligten Fischzüchter verteilt wird. Der Fabrikbesitzer ist sozusagen durchaus bereit, ohne Hintergedanken etwas für die Umwelt zu tun. Seine Ansprüche beschränken sich gewissermaßen darauf, wirtschaftliche Nachteile zu vermeiden

Nun haben bereits die Ausführungen in der Einleitung gezeigt, dass selbst unter derart einschränkenden Annahmen eine Einigung der Fischzüchter auf freiwilliger Basis ganz selten erfolgen wird. Im Folgenden wird eine Erweiterung des Modells vorgenommen, die es erlaubt, zum einen anreizkompatible Mechanismen einzubeziehen und zum anderen auch ein mögliches Eigeninteresse des Papierfabrikanten zu berücksichtigen<sup>106</sup>.

### Wechsel der Perspektive

Dazu wird als nächstes die genau entgegengesetzte Verteilung von Eigentumsrechten (Verfügungsrechten) betrachtet:

Angenommen, der Gesetzgeber schreibt dem Fabrikbesitzer zunächst zwingend vor, eine Kläranlage zu errichten. Der Status Quo in diesem Fall wäre somit durch weniger Schadstoffe und mehr Fische gekennzeichnet. Die Eigentumsrechte liegen dann eindeutig bei den Fischzüchtern, die einen Anspruch auf sauberes Wasser zugesichert bekommen. Allerdings erlaube der Gesetzgeber, dass die Fischzüchter gegen Zahlung auf diesen Anspruch verzichten können. Deshalb könnte der Fabrikbesitzer nun die Kosten in Höhe von  $C$  einsparen, falls eine Zustimmung sämtlicher Fischzüchter verhandelt werden kann. In diesem Szenario wäre es also Aufgabe des Papierfabrikanten, entsprechende Ausgleichszahlungen anzubieten. Die Zielsetzung des Mechanismus-Design ist es dann, die *wahren Schäden* herauszufinden.

---

<sup>106</sup> Dieses Eigeninteresse wird vor allem dann eine Rolle spielen, wenn die Eigentumsrechte anders spezifiziert sind und der Papierfabrikant ohne Kläranlage in der bisherigen Form gar nicht produzieren darf.

Die eben geschilderte Situation entspricht nun fast genau dem Szenario von RAFAEL ROB, dessen Modell bereits in Kapitel 3 kurz erwähnt wurde<sup>107</sup>. ROB betrachtet allerdings ein *privates Projekt*, welches dem Fabrikanten eine Zusatzeinnahme in der Höhe von  $R > 0$  einbringen würde. Dazu müsste aber das Einverständnis aller derer eingeholt werden, die als Anlieger von möglichen externen Effekten betroffen wären.

Diese unterschiedlichen Szenarien können leicht in einer einheitlichen Untersuchungsumgebung integriert werden. Deshalb kann man auch mit jeweils minimalen Modifikationen das Simulationstool verwenden, um zunächst die Wahrscheinlichkeit spontaner Kooperation zu untersuchen (Abschnitt 6.4). In Abschnitt 6.5 werden anreizkompatible Mechanismen ausgetestet und dabei unter anderem der ROB-Mechanismus simuliert. Dazu muss im Wesentlichen nur angenommen werden, dass die Zusatzeinnahme  $R$  gerade den Kosten  $C$  entspricht. Betrachtet man beispielsweise das fragliche private Projekt als eine Fabrikerweiterung, durch die gerade genau so viele Schadstoffe zusätzlich eingeleitet werden wie von der Kläranlage zurückgehalten werden können, so liegt eben tatsächlich dieselbe Problemstellung vor.

In einer COASEschen Sichtweise ist die Natur des Problems übrigens vollständig reziprok. A priori kann nichts darüber gesagt werden, welcher Zuweisung der Eigentumsrechte der Vorzug zu geben ist. COASE selbst würde wohl fragen:

*“Soll dem Fabrikbesitzer erlaubt werden, die Fischzüchter zu schädigen – oder sollen die Fischzüchter den Fabrikbesitzer schädigen können?“*

Ökonomisch lautet die Frage:

*Mehr Fische oder mehr Fabrikgüter?*

Wie auch immer die Pareto-optimale Verteilung bestimmt ist – mit der Zusatzannahme von nicht vorhandenen Transaktionskosten ist zu erwarten, dass die Beteiligten immer einen Weg finden, dieses Pareto-Optimum zu realisieren.

---

<sup>107</sup> Vgl. Fußnote 73 in dieser Arbeit.

Außerdem dürfte es keine Rolle spielen, ob sich der Papierfabrikant (als Mechanismus-Designer) wie ein *sozialer Planer* verhält oder aber von *reinem Eigeninteresse* getrieben ist – somit also seinen eigenen Erwartungsnutzen maximiert.

Als endgültige Güterallokation müsste sich nach COASE immer eine Pareto-optimale Mischung von Fischen und Fabrikgütern ergeben.

In Tabelle 1 (vgl. nächste Seite) werden die beiden möglichen eigentumsrechtlichen Regelungen einander gegenübergestellt.

Weil in dieser Arbeit lediglich ein Projekt vorgegebener Größe betrachtet wird, kann sich der resultierende Umweltzustand lediglich in einem von zwei Zuständen befinden: die Kläranlage wird gebaut oder eben nicht. Mit der Annahme nicht vorhandener Transaktionskosten wäre es dann beliebig möglich, von einem nicht effizienten Zustand in das soziale Optimum zu wechseln. Dementsprechend hätte die Zuweisung der Eigentumsrechte keinerlei allokativen Konsequenzen.

Es gibt jedoch sehr wohl distributive Konsequenzen. Auf den ersten Blick sollte man vermuten, dass Fischzüchter, welche ein hohes Interesse an der Kläranlage haben – möglicherweise sind deren Fischtypen empfindlicher gegenüber Schadstoffen – die Eigentumsregelung bevorzugen sollten, welche dem Zustand 2 in Tabelle 1 entspricht (mehr Fische). Eine solche Regelung erlaubt es ihnen gegebenenfalls, jede Änderung am Status Quo durch ein Veto zu blockieren.

Eine solche Vermutung ist jedoch voreilig und würde in die Irre führen! Ein Blick zur letzten Zeile in Tabelle 1 macht dieses klar: Der Vektor  $x$ , welcher die privaten Informationen beinhaltet, ist in beiden Fällen der gleiche – in jeder einzelnen Komponente gibt es exakte Übereinstimmung. Das heißt: Fischzüchter, denen es ziemlich egal ist, ob es eine Kläranlage gibt, werden im anderen Szenario auch kaum betroffen sein, falls es zu einer Fabrikerweiterung kommt. Andererseits gibt es hochgradig betroffene Fischzüchter, die bei jedem Wechsel von einem Umweltzustand in den anderen viel zu gewinnen oder zu verlieren haben.



<b>Zuteilung der Eigentumsrechte</b>	<b>an den Papierfabrikanten</b>	<b>an die Fischzüchter</b>
<b>Status Quo</b>	<b>Zustand 1</b> mehr Papier – weniger Fisch	<b>Zustand 2</b> weniger Papier – mehr Fisch
<b>Fragestellung</b>	<b>Kläranlage bauen?</b>	<b>Fabrik erweitern?</b>
<b>Gemeinsames Wissen</b>	der Wechsel zu Zustand 2 ist verbunden mit den  <b>Kosten C</b>  Die Kosten für den Bau der Kläranlage sind allgemein bekannt	der Wechsel zu Zustand 1 ermöglicht einen  <b>Profit R</b>  Der mögliche Profit aus einer Fabrikerweiterung ist allgemein bekannt
<b>Private Information</b>	<b>externe Nutzen</b>  sind privates Wissen jedes einzelnen Fischzüchters  <b>Vektor x</b>  kann strategisch genutzt werden  Unsicherheit bezüglich des Gesamtnutzens sowie der Nutzenverteilung	<b>externe Kosten</b>  sind privates Wissen jedes einzelnen Fischzüchters  <b>Vektor x</b>  kann strategisch genutzt werden  Unsicherheit bezüglich der Gesamtkosten sowie der Kostenverteilung

**Tabelle 1:** Der reziproke Charakter des Fischzüchterproblems

Nun wurde schon gezeigt: Immer wenn der Status Quo kein Pareto-Optimum darstellt, gibt es das Potential eines *sozialen Überschusses*. Wer müsste denn das Hauptinteresse daran haben, eine Pareto-Verbesserung zu realisieren und den entsprechenden Überschuss zu verteilen?

*Antwort: Der Fabrikbesitzer und die hochgradig betroffenen Fischzüchter!*

Für diese wäre es also eine schlechte Empfehlung, um jeden Preis an einem ineffizienten Status Quo festzuhalten. Der wirkliche Grund, weshalb die Möglichkeit eines Vetos so vorteilhaft erscheint, liegt wohl darin, dass implizit die (realistischere) Annahme von *nicht verschwindenden Transaktionskosten* getroffen wird. Dann besteht selbstverständlich eine hohe Gefahr, dass die Situation in einem ineffizienten Zustand festgefahren bleibt. Die Frage, welcher Eigentumsregelung der Vorzug zu geben ist, reduziert sich dann zunehmend darauf, welcher Zustand als Status Quo favorisiert wird.

Um die Reziprozität der Situation nochmals zu unterstreichen, kann man noch einen Schritt weiter gehen. Im Folgenden wird auf die Begriffe *Verlust* und *Gewinn* nach Möglichkeit verzichtet und statt dessen der neutrale Begriff eines *Betroffenheitswertes* eingeführt. Dieser Begriff erlaubt, Klassifikationen wie *hochgradig betroffen*, *durchschnittlich betroffen* usw. unabhängig davon zu verwenden, wie die Eigentumsrechte im Detail spezifiziert sind. Die Natur des Problems ist also in der Tat reziprok, soweit die Gleichungen (23) bis (27) betroffen sind. Selbstverständlich ist bei der letztgenannten Eigentumsregelung mit dem Übertreiben von Verlusten zu rechnen. Entsprechend hat man die Annahme (33) durch eine analoge Nicht-Untertreibungs-Annahme zu ersetzen.

#### **Annahme A.2 (Nicht-Untertreibungs-Annahme)**

Wenn es „Common Knowledge“ ist, dass die Eigentumsrechte den betroffenen Fischzüchtern zugeordnet sind und dass der Mechanismus-Designer (in Person des Papierfabrikanten) ein proportionales Kompensationsschema (analog zum nPBS) verwendet, so erfüllen die angegebenen Schadensmeldungen folgende Ungleichung:

$$y_i \geq x_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (36)$$

In ähnlicher Weise muss die Bedingung für die Lösung des Erst-Besten (First-Best-Lösung) angepasst werden:

Man sollte die Fabrik dann und nur dann erweitern, falls

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq R \quad (37)$$

In Worten: Die Fabrikerweiterung findet nur statt, falls die Summe der Schäden geringer ist, als der daraus zu erwartende Profit.

Für das soziale Verbesserungspotential, welches dieser First-Best-Lösung entspricht, ergibt sich:

$$S(\mathbf{x}) = \text{Max} \left\{ 0, R - \sum_{i=1}^n x_i \right\} \quad (38)$$

Wie gezeigt, kann man sowohl unterschiedliche Eigentumsregelungen als auch verschiedene Einstellungen des Mechanismus-Designers zum sozialen Optimum in einer einheitlichen Untersuchungsumgebung integrieren. Letztlich können vier Extremfälle unterschieden werden:

- Profitmaximierung ( $\alpha = 1$ ) und Eigentumsrechte bei den Anrainern Fall A
- Profitmaximierung ( $\alpha = 1$ ) und Eigentumsrechte bei der Unternehmung Fall B
- Sozialer Planer ( $\alpha = 0$ ) und Eigentumsrechte bei den Anrainern Fall C
- Sozialer Planer ( $\alpha = 0$ ) und Eigentumsrechte bei der Unternehmung Fall D

Für einige dieser Fälle gibt es Benchmarks in der einschlägigen Literatur, für die man Simulationsergebnisse und theoretische Resultate gegenüberstellen kann. Häufig sind auch experimentelle Untersuchungen vorgenommen worden. Namentlich entspricht der ROB-Mechanismus dem Fall A und der CLARKE-GROVES-Mechanismus dem Fall D. Dieser Sachverhalt wird später zur Validierung des Simulationsmodells genutzt.

### 6.3 Anpassungen des Simulationsmodells

In Abschnitt 6.5 werden die eben genannten Mechanismen entsprechend geprüft. Zunächst wird jedoch das in dieser Arbeit entwickelte agentenbasierte Simulationsmodell dazu verwendet, um das (naive) proportionale Beitragsschema zu simulieren. Auf diese Weise werden nochmals drastisch die Konsequenzen ohne “echtes“ Mechanismus-Design vor Augen geführt werden. Bei dem Beitragsschema (Gleichung (31) und (32)) handelt es sich nämlich bestenfalls um einen

*Pseudo-Mechanismus*. Eigentlich stellt man dabei die Frage danach, ob sich die Fischzüchter spontan selbst organisieren können. Oder anders herum: Man zeigt, dass sie es auf freiwilliger Basis höchst wahrscheinlich nicht können<sup>108</sup>.

Allerdings kann man formal das proportionale Beitragsschema wie einen *echten* Mechanismus behandeln. Dies hat auch vorteilhafte Folgen für die spätere Implementierung. Isoliert man nämlich die Berechnungsvorgänge der Gleichungen (31) und (32) in einem dafür vorgesehenen Mechanismus-Objekt, so braucht später nur dieses eine Objekt ausgetauscht werden, um die aus der Literatur bekannten (oder eigen entwickelten) Mechanismen zu untersuchen. Für die späteren Abschnitte in dieser Arbeit müssen deshalb keinerlei zusätzliche Modifikationen vorgenommen werden. Die im Folgenden beschriebene Anpassung des Objektmodells reicht vollständig aus.

Folgende zentrale Objektklassen werden verwendet:

*agents, decision situations, game structures, mechanisms.*

Als unterstützende Objektklassen werden verwendet:

*population, strategy set, probability distribution.*

Die erwähnten Kernobjekte können allesamt als *informationsverarbeitende Einheiten* aufgefasst werden. Agenten verarbeiten die Auszahlungsergebnisse von Spielstrukturen und senden ihrerseits Nachrichten an das Mechanismus-Objekt. Entscheidungssituationen fragen die beteiligten Agenten nach ihrer Strategieentscheidung usw.

### 6.3.1 Initialisierungsschritte

Zunächst wird genau eine Population von Agenten (Fischzüchtern) erzeugt, wobei jedem Fischzüchter ein zufälliger Betroffenheitswert zugewiesen wird, der sich mittels der Verteilung in Gleichung (23) bestimmt. Sämtlichen Simulationsergebnissen in diesem Kapitel liegt eine Populationsgröße von 600 zugrunde, und mit Ausnahme der Betrachtungen in Abschnitt 6.4.1 wird eine standardisierte Gleichverteilung verwendet, um die Zuweisung der Betroffenheitswerte vorzunehmen<sup>109</sup>.

---

<sup>108</sup> Der Papierfabrikant nimmt eine völlig passive Rolle ein; er verursacht keine Kosten und stellt keinerlei Ansprüche.

<sup>109</sup> Bei dieser Ausnahme erfolgt eine deterministische Zuweisung der Betroffenheitswerte für den homogenen Fall.

Als nächstes wird der zu untersuchende Mechanismus festgelegt und dazu ein entsprechendes Objekt angelegt. Anschließend wird dann die *Spielstruktur* erzeugt. Bei der Spielstruktur handelt es sich um ein Objekt  $g_n(r, m, p)$ , welches durch folgende Parameter spezifiziert ist:

- n: Zahl der betroffenen Agenten
- r: Pro-Kopf-Kosten (bzw. Pro-Kopf-Erlöse) des fraglichen Projekts
- m: Zahl der Untertreibungsstrategien (und damit auch der Übertreibungsstrategien)
- p: Ein Zeiger (Pointer) auf das zugehörige Mechanismus-Objekt.

### Erzeugen der Strategie-Mengen

Alle erzeugten Agenten werden dann der Spielstruktur zugeordnet. Bei diesem Vorgang werden automatisch die sogenannten *Strategy-Sets* erzeugt. Im Grunde werden erst hierdurch den Fischzüchtern die *Regeln des Spiels* mitgeteilt, insbesondere welche Optionen ihnen jeweils zur Verfügung stehen.

Strategien  $s$  werden durch ganzzahlige Ziffern aus dem Intervall  $(-m, \dots, +m)$  codiert, wobei

- negative Werte eine Untertreibung anzeigen,
- positive Werte eine Übertreibung anzeigen,

und die Strategie  $s = 0$  als wahrheitsgemäße Angabe des tatsächlichen Betroffenheitswertes zu verstehen ist.

Zu beachten ist, dass mit dieser Festlegung ein *Mapping* von einem kontinuierlichen Werteraum in einen diskreten Nachrichtenraum verbunden ist. Die damit einhergehenden Probleme können im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail besprochen werden. Letztlich wird diese Transformationsaufgabe einfach an das Mechanismus-Objekt delegiert. Für den Moment genügt die Annahme, dass es dann dort gelingen wird, eine entsprechend sinnvolle Interpretation der diskreten Nachrichten vorzunehmen (siehe Abschnitt 6.4.1).

### Initialisierung der Strategien

Zu Beginn der Simulation wird nach dem Zufallsprinzip für jeden Agenten eine beliebige der ihm zur Verfügung stehenden Strategien ausgewählt. Diese Strategie wird dann solange verwendet, bis der entsprechende Agent in einem Simulationsschritt explizit adaptiert und dabei eine andere Strategie wählt. Das heißt, auf dem Agentenlevel sind keine gemischten Strategien zugelassen.

### Initialisierung von Zufallspaarungen

Eine Matching-Prozedur verteilt sämtliche Agenten auf *Entscheidungssituationen* – diese sind im Folgenden die Kernobjekte des Simulationsansatzes.

Eine Entscheidungssituation  $d(a_1, \dots, a_n, g_n(\cdot), p)$  verweist mit Zeigern auf die beteiligten Agenten  $a_1, \dots, a_n$ , die Spielstruktur und das entsprechende Mechanismus-Objekt.

Zur Verdeutlichung stellt das folgende Beispiel die Vorgehensweise dar: Falls etwa zu untersuchen ist, ob der Rob-Mechanismus im 4-Personen-Fall funktioniert und wie effizient die Ergebnisse dabei sind, werden bei der Initialisierung zunächst 150 Entscheidungssituationen erzeugt, denn die gesamte Population von 600 Agenten ist entsprechend zu verteilen.

Zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Simulation kann – falls gewünscht – diese Matching-Prozedur erneut benutzt werden.

### 6.3.2 Simulationsschleife

Nach den soeben beschriebenen Initialisierungsschritten startet dann die eigentliche Simulation. Dazu werden dann in jedem Simulationsschritt die vier potentiellen Teilschritte durchgeführt, wie sie in Abschnitt 4.4 bei der Beschreibung des generellen Ablaufschemas bereits ausführlich dargestellt worden sind. An dieser Stelle genügt deshalb die stichwortartige Zusammenfassung:

1. Entscheidungssituationen fordern die beteiligten Agenten auf, ihre Strategien zu spezifizieren.
2. Die Agenten ermitteln ihren Nutzen – evtl. sind kumulierte Nutzenwerte neu zu berechnen.
3. Eventuell findet eine Veränderung der *Umweltbedingungen* statt – neues Matching usw.
4. Einzelne Agenten adaptieren ihre Strategie mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit.

Lediglich beim letzten Schritt gibt es in diesem Kapitel eine wirkliche Besonderheit im Vergleich zum vorangegangenen Anwendungsbeispiel. Für die Adaptionvorgänge wird nämlich die sogenannte *Sampling-Dynamik* verwendet, deren Grundidee nachfolgend erläutert wird.

### 6.3.3 Sampling Dynamik als Adaptionverfahren

Ergänzend zu bekannteren Adaptionverfahren wie Imitationsmodellen, Anspruchsanpassungsmodellen mit sogenannten Aspirationlevels etc. ermöglicht das Simulationstool auch die Verwendung der *Sampling-Dynamik*, die in anderem Zusammenhang von SETHI vorgeschlagen wurde und auf Vorarbeiten von OSBORNE und RUBINSTEIN beruht<sup>110</sup>.

Für die theoretische Begründung der Dynamik sind keine fragwürdigen Rationalitätsanforderungen notwendig, wie dieses leider bei vielen Anpassungsdynamiken der Fall ist. Man könnte eher im Gegenteil einwenden, dass diese Dynamik viel zu simpel sei.

Neu an dieser Arbeit ist, dass die von SETHI beschriebenen Teilschritte, welche er nur dazu benötigt, um im Grenzfall seine Differentialgleichungen abzuleiten, bei dem hier besprochenen Simulationsmodell *explizit* implementiert sind und so zu einer ereignisdiskreten Dynamik führen.

OSBORNE und RUBINSTEIN haben zunächst das Konzept des *S(1)-Gleichgewichts* eingeführt. Dabei wurde angenommen, dass ab und zu Agenten aus einer sehr großen Population ausscheiden und durch einen neuen Agenten ersetzt werden.

*Wie soll nun für den neuen Agenten die Strategieentscheidung festgelegt werden?*

Im einfachsten Fall wird jede mögliche Strategie *genau einmal* ausprobiert – diejenige, die dabei den größten Erfolg erzielt hatte, wird dann für die Zukunft beibehalten. Danach sind keine weiteren Anpassungen vorgesehen. Erst wenn das nächste Mal wieder ein Agent durch einen neuen ersetzt wird, kommt es also zu einer potentiellen Änderung im Verhalten der Gesamtpopulation. Ein S(1)-Gleichgewicht liegt vor, falls jede mögliche Strategie  $s_i$  exakt mit der Häufigkeit in der aktuellen Population vertreten ist, die der Wahrscheinlichkeit dafür entspricht, dass der neue Agent gerade  $s_i$  als vielversprechendste Strategie auswählt. Das Konzept lässt sich auf allgemeine *S(k)-Gleichgewichte* erweitern, bei denen jede Strategie *genau k-mal* ausprobiert wird. Bereits OSBORNE und RUBINSTEIN konnten zeigen, dass S(k)-Gleichgewichte zu einem Nash-Gleichgewicht konvergieren müssen, falls der Parameter  $k$  gegen unendlich geht<sup>111</sup>. Nun kann sicherlich eingewendet werden, dass *reale*

---

<sup>110</sup> Vgl. Sethi (2000), sowie Osborne und Rubinstein (1998).

<sup>111</sup> Vgl. Osborne und Rubinstein (1998).

*Entscheidungsträger* sich niemals so verhalten würden – insbesondere die Annahme eines sturen Festhaltens an einer einmal getroffenen Strategiewahl erscheint absurd.

Auf eine akkurate Modellierung des individuellen Verhaltens kommt es jedoch gerade nicht an! Deshalb geht der oben skizzierte Einwand ebenso ins Leere wie dies schon bei der möglichen Kritik an der Replikatorgleichung der Fall war.

Die einzig relevante Frage lautet:

*Liefert das Modell für die Betrachtung der Gesamtpopulation brauchbare Resultate oder nicht?*

Die Sampling-Dynamik erweist sich in dieser Hinsicht als sehr erklärungsstark. Durch die Variation eines einzigen Parameters –  $k$  – lässt sich nämlich die gesamte Spannbreite von sehr “schwacher Rationalität“ bis hin zur “vollständigen Rationalität“ abdecken.

Beide Extremfälle ( $k=1$ ) und ( $k \rightarrow \infty$ ) werden selten geeignet sein, reales Verhalten zu erklären. Immerhin aber lässt sich beim  $S(1)$ -Gleichgewicht argumentieren – so bereits von OSBORNE und RUBINSTEIN –, dass diese Form der Rationalität eindeutig *prozedural* ist – somit eine (für die Agenten machbare) Prozedur angegeben werden kann, wie es tatsächlich zur Strategiewahl kommt. Die Unterscheidung von *prozeduraler* Rationalität und *substantieller* Rationalität wurde übrigens ebenfalls von HERBERT ALEXANDER SIMON eingeführt und ist eng verwandt mit dem Begriffspaar *begrenzte* Rationalität – *vollständige* Rationalität, wobei die erstgenannte Unterscheidungskategorie den hier relevanten Sachverhalt genauer trifft.

Der andere Extremfall ( $k \rightarrow \infty$ ) ist dagegen eindeutig *nicht-prozedural* (im Sinne von SIMON also substantiell). Es ist nämlich keine (für die Agenten machbare) Prozedur vorstellbar, bei der unendlich viele Versuche (Samples) ausgewertet werden müssten. Es verwundert also nicht, dass hier substantielle Rationalität und vollständige Rationalität zusammenfallen, indem eben im Grenzfall ( $k \rightarrow \infty$ ) zwingend ein Nash-Gleichgewicht resultieren muss.

So wenig realistisch die beiden Extremfälle auch sind, für einen mittleren Parameterbereich hat die  $S(k)$ -Dynamik sogar auf der individuellen Ebene einige Plausibilität<sup>112</sup>.

Auf der Ebene der Gesamtpopulation – wie gesagt kommt es hierauf letztlich an – zeigen die Simulationsläufe sogar eine beachtliche Erklärungskraft.

---

<sup>112</sup> An dieser Stelle dürfte BISMARCK Widerspruch einlegen. Wie aus dem Zitat hervorgeht, das zum 4. Kapitel einführt, hält er es für ineffizient, auf die Erfahrung, welche von anderen gesammelt wird, zu verzichten.



Des Weiteren kann die Implementierung in C++ relativ leicht vorgenommen werden und als weiterer Vorteil ergibt sich die Möglichkeit, die Reihenfolge der Simulationsläufe sehr praktikabel zu organisieren: Man startet mit einem geringen Erfahrungsparameter  $k$  und erhöht dann  $k$  sukzessive so lange, bis ein Nash-Gleichgewicht hinreichend genau approximiert wird.

Weil sämtliche Simulationsläufe in diesem Kapitel auf der Sampling-Dynamik – genauer einer Klasse von  $S(k)$ -Dynamiken – basieren, wird nun noch beschrieben, wie der Einsatz dieses Adaptionsverfahrens im Detail erfolgt.

### **Wahrscheinlichkeit für das Ausscheiden eines Agenten aus der Population**

In jeder Simulationsperiode wird für jeden Agenten eine Zufallsvariable ermittelt. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,00001 hat der Agent die Population zu verlassen. Jeder frei werdende Platz wird durch einen neuen Agenten aufgefüllt, so dass die Populationsgröße immer konstant bleibt. Einem neuen Agenten wird immer genau der Betroffenheitswert des ausscheidenden Agenten zugewiesen<sup>113</sup>. Die einzige Änderung, die folglich eintreten kann, ergibt sich, falls die nun neu zu treffende Strategiewahl von der des zuvor ausgeschieden Agenten abweicht.

### **Partielles Random Matching**

Um die neue Strategie festzulegen, ist bei der  $S(k)$ -Dynamik jede mögliche Strategie genau  $k$ -mal auszuprobieren. Für jedes derartige Experiment benötigt der neue Agent eine für die Population repräsentative Zufallsstichprobe von Gegenspielern. Um die Laufzeit des Simulationsprogramms in Grenzen zu halten, wurde hierfür ergänzend eine *partielle Matching-Prozedur* (partial Random-Matching) implementiert, welche nicht die gesamte Population neu verteilt, sondern nur den relevanten Teil für den “Newcomer“<sup>114</sup>. In einer Sampling- oder Experimentierphase muss diese Prozedur nämlich unter Umständen sehr häufig (bis zu mehreren 100.000-mal) eingesetzt werden. Nach Abschluss der Samplingphase wertet der neue Agent dann sämtliche Versuche aus und entscheidet sich – ein für allemal – für die vielversprechendste Strategie. Sollten mehrere Strategien exakt gleich erfolgreich abgeschnitten haben, so sorgt ein fairer Losentscheid zwischen diesen für klare Verhältnisse – auch dann ist also die

---

<sup>113</sup> Man könnte freilich alternativ den neuen Betroffenheitswert auch zufällig zuweisen. Bei der gewählten Populationsgröße ändern sich dadurch die Ergebnisse nicht wesentlich, denn die Zahl von 600 Agenten ist bereits hoch genug, um sicherzustellen, dass es immer bei einer vergleichbaren Mischung von schwach und hochgradig betroffenen Fischzüchtern bleibt. Die hier gewählte Vorgehensweise vereinfacht jedoch spätere Auswertungen.

<sup>114</sup> Da ansonsten alle Agenten ihre Strategien ohnehin beibehalten werden, ist jede Erfahrung irrelevant, die andere Agenten im betrachteten Simulationsschritt sammeln könnten.

Strategieentscheidung eindeutig und endgültig. Wie bei Kapitel 5 ergeben sich also gemischte Strategien, wenn überhaupt, nur durch Interpretation auf dem Level der Gesamtpopulation.

**Wichtige Eigenschaften:**

- Sobald der neue Agent seine Strategiewahl getroffen hat, wird stur an dieser festgehalten. Eine Adaptionsdynamik findet also nur auf der Ebene der Gesamtpopulation statt, und sie entsteht lediglich deshalb, weil – ab und zu – Agenten durch andere ersetzt werden.
- Im Gegensatz zu vielen anderen Adaptionsverfahren müssen bei  $S(k)$ -Dynamiken in keiner Weise die (kumulierten) Nutzen anderer Agenten bekannt sein. Daraus folgt übrigens, dass die Kalkulation solcher Nutzenwerte beliebig erfolgen kann – in beliebiger Reihenfolge und, falls erwünscht, sogar nur zu den vorab festgelegten Periodenzeitpunkten, die zu Auswertezwecken vorgesehen sind. Als weiterer Vorteil ergibt sich somit die Möglichkeit, viele der im generellen Schema vorgeschriebenen Teilschritte für fast alle Simulationsperioden zu überspringen, die Simulationsläufe beträchtlich zu beschleunigen und somit sogar  $S(k)$ -Dynamiken für sehr hohe Werte von  $k$  zu untersuchen.
- SETHI konnte anhand eines Beispiels zeigen, dass sogar strikt dominierte Strategien nicht notwendigerweise aus der Population verdrängt werden müssen – zumindest für die  $S(1)$ -Dynamik lässt sich dies theoretisch nachweisen<sup>115</sup>. Interessanterweise handelt es sich bei SETHIS Beispiel um ein “voluntary contribution game“ – eine Problemstellung, die sehr eng verwandt ist mit dem hier angeführten Fischzüchterbeispiel. Bei den meisten bekannten Adaptionsdynamiken wäre ein Überleben strikt dominierter Strategien undenkbar – für die Klasse der auszahlungsmonotonen Selektionsdynamiken hat WEIBULL sogar nachgewiesen, dass strikt dominierte Strategien zwingend ausscheiden müssen! Dies ist besonders relevant für diese Arbeit, denn von Labor-Experimenten ist bekannt, dass (strikt) dominierte Strategien von Versuchspersonen dennoch gewählt werden<sup>116</sup>.

---

<sup>115</sup> In diesem Zusammenhang konnte durch Simulation eine Reihe von Bestätigungen erbracht werden – auch für  $S(k)$ -Dynamiken mit einem höherem Erfahrungsparameter  $k$  (vgl. hierzu die im Anhang erwähnten Workshop-Beiträge des Autors).

<sup>116</sup> Beispiele solcher Experimente wurden bereits in Abschnitt 3.3 erwähnt. Entsprechende experimentelle Ergebnisse liegen auch zum Clarke-Groves-Mechanismus vor, der in Abschnitt 6.5.1 untersucht wird. Vgl. Weibull (1995) zur Definition auszahlungsmonotoner Dynamiken.

## 6.4 Spontane Organisation

*Können die Fischzüchter das Problem auf freiwilliger Basis lösen?*

In den Abschnitten 6.4.1 bis 6.4.3 werden nun die Ergebnisse des Fischzüchterbeispiels für das (naive) proportionale Beitragsschema dargestellt. Zur Erinnerung: Dieses Beitragsschema (definiert durch die Gleichungen (31) und (32)) ist eigentlich lediglich ein *Pseudo-Mechanismus*, und im Folgenden interessiert vor allem die Erfolgsquote dieses Pseudo-Mechanismus in Abhängigkeit von der *Teilnehmerzahl*. Zudem wird untersucht, welchen Effekt die *Heterogenität* der beteiligten Fischzüchter hat.

### 6.4.1 Ergebnis für den homogenen 3-Spieler-Fall

Wie bereits erwähnt, ist es Aufgabe des Mechanismus-Objekts, die passende Rücktransformation von diskretem Nachrichtenraum in einen kontinuierlichen Wertebereich vorzunehmen. Für eine vorgegebene Anzahl  $m$  von Untertreibungs- bzw. Übertreibungsstrategien sollen die (kontinuierlichen) Signale  $y_i$  eine Funktion des tatsächlichen Betroffenheitswertes  $x_i$  sowie der ganzzahlig gewählten Strategie  $s$  sein. Für den weiteren Verlauf der Arbeit liest sich die entsprechende Transformation wie folgt:

$$y_j = f_m(s, x_j) = (1 + (s/m)) \cdot x_j, \quad s = -m, \dots, +m, \quad j = 1, \dots, n \quad (39)$$

**Bemerkung:** Damit wird zugleich erreicht, dass jeder Mechanismus die Strategie  $s = 0$  als wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung ( $y_j = x_j$ ) interpretiert!

### Das einfache 3-Spieler-Beispiel

Um zu demonstrieren, wie diese Transformation funktioniert, wird das Beispiel aus der Einleitung erneut aufgegriffen. Somit wird der Fall  $n = 3$  und  $m = 2$  betrachtet<sup>117</sup>.

Entsprechend den Notationsvereinbarungen gilt also  $D_j = [0, 200]$ ,  $j = 1, 2, 3$ , sowie  $C = 210$ .

Folglich wird selbst im Extremfall (Nutzenbewertung von 200) ein einzelner Fischzüchter die Kläranlage niemals im Alleingang finanzieren. In der Einleitung wurde ganz spezifisch der

---

<sup>117</sup> Ein Fischzüchter hat also fünf Strategien zur Verfügung: Neben der wahrheitsgemäßen Nutzenangabe von 100 NE könnten genauso gut 50 NE oder 150 NE angegeben werden. Im Extremfall kann auch das komplette Freifahren (0 NE) versucht werden, oder es wird der Maximalwert 200 NE angegeben.

vollständig homogene Fall thematisiert, bei dem allen drei Beteiligten exakt der durchschnittliche Betroffenheitswert zugewiesen wurde:

$$x_j = 100, \quad j = 1, 2, 3 \quad (40)$$

Vorab lassen sich folgende Zwischenergebnisse analytisch ableiten.

**Zwischenergebnis 1:**

*Eine allseitig wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung führt zu allseitigem Vorteil für die beteiligten Fischzüchter.*

Aus  $s = 0$  folgt für die Signale sämtlicher Fischzüchter  $y_i = 100$ . Entsprechend Gleichung (31) wird die Kläranlage gebaut, und wenn man die erforderlichen Zahlungen  $c_i$  mitberücksichtigt (nach Gleichung (32) sind dies jeweils 70 NE), so realisieren die Fischzüchter alle einen positiven Nettonutzen:

$$u_j = x_j - c_j = 30, \quad j = 1, 2, 3 \quad (41)$$

Falls die Kläranlage dagegen nicht gebaut wird, so bleibt es beim Status Quo mit einem Nutzen von 0 NE für alle drei Fischzüchter.

**Zwischenergebnis 2:**

*Eine allseitig wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung kann **kein** Nash-Gleichgewicht sein.*

Angenommen der erste Fischzüchter spielt abweichend die Strategie  $s = -1$ , während die beiden anderen bei der Wahrheit bleiben ( $s = 0$ ):

Entsprechend (39) senden die Fischzüchter dann folgende Nachrichten:

$$y_1 = 50, \quad y_2 = y_3 = 100 \quad (42)$$

Eingesetzt in Gleichung (32) ergeben sich dann folgende Beitragszahlungen:

$$c_1 = 42, \quad c_2 = c_3 = 84 \quad (43)$$

Daraus ergeben sich für die Nutzenwerte:

$$u_1 = 58, \quad u_2 = u_3 = 16 \quad (44)$$

Offensichtlich kann also der erste Fischzüchter seinen Nutzen durch einseitigen Strategiewechsel von  $s = 0$  zu  $s = -1$  verbessern. Somit kann die betrachtete Konstellation, nach Gleichung (41) gekennzeichnet durch die faire Verteilung des Gesamtnutzens, auf keinen Fall ein Nash-Gleichgewicht darstellen. Andererseits handelt es sich bei der Konstellation, gekennzeichnet durch die Gleichungen (42) bis (44), um ein *asymmetrisches* Nash-Gleichgewicht in reinen Strategien, denn jede noch weitergehende Untertreibung, im Rahmen der zulässigen Strategien, durch einen beliebigen Fischzüchter würde dann dazu führen, dass der Bau der Kläranlage scheitert. Weil aber  $u_2$  und  $u_3$  positiv sind, wird niemand die Strategie wechseln.

Abschließend können sämtliche Nash-Gleichgewichte berechnet werden. Zusammengefasst lässt sich dann konstatieren:

### **Zwischenergebnis 3:**

*Es gibt mehrere asymmetrische Nash-Gleichgewichte in reinen Strategien, bei denen analog zu (42) bis (44) einer der Fischzüchter auf Kosten der beiden anderen einen Extravorteil erhält. Darüber hinaus ist genau ein weiteres Gleichgewicht von Interesse, und zwar ein symmetrisches Nash-Gleichgewicht in gemischten Strategien.<sup>118</sup>*

*Der optimale Strategien-Mix ist dadurch gekennzeichnet, dass jeder Fischzüchter mit Wahrscheinlichkeit  $(16/30)$   $s = 0$  wählt und mit Wahrscheinlichkeit  $(14/30)$   $s = -1$  wählt.*

**Bemerkung:** Theoretisch müssten insgesamt  $5 \cdot 5 \cdot 5 = 125$  Strategienprofile betrachtet werden. Aufgrund der spezifischen Auszahlungswerte des Beispiels kann die  *Methode der iterativen Elimination von (schwach) dominierten Strategien*  angewendet werden. Mit Hilfe der Nicht-Übertreibungs-Annahme A.1 (siehe Gleichung (33)) eliminiert man somit leicht zunächst die Übertreibungsstrategien  $s = +1$  und  $s = +2$ . Sobald dieses geschehen ist, erkennt man aber, dass

---

<sup>118</sup> Mit Hilfe von GAMBIT wurden alle Möglichkeiten kalkuliert. Dabei wurden noch mehr (symmetrische) Nash-Gleichgewichte gefunden, welche aber allesamt nicht von weiterem Interesse sind, weil sie mit einem sicheren Scheitern der Kläranlage verbunden sind und deshalb keinem Fischzüchter einen positiven Erwartungsnutzen bieten. Diese in Zwischenergebnis 3 *unterschlagenen* Gleichgewichte sind allesamt *nicht-strikt*, und vor allem können sie *nicht evolutionsstabil* sein! Ein Beispiel: Eines der symmetrischen Nash-Gleichgewichte besteht darin, dass alle drei Fischzüchter einen Nutzen von 50 NE angeben. Der einseitige Wechsel eines Fischzüchters zur wahren Angabe von 100 NE bringt diesem einerseits keinen Vorteil – die Finanzierung der Kläranlage scheitert unabhängig vom Strategiewechsel. Andererseits ist mit dem Strategiewechsel aber auch kein Nachteil verbunden, und deshalb wird es im Evolutionsprozess zu Zufallsdrift kommen.

nun das komplette Freifahrerverhalten  $s = -2$  schwach dominiert wird<sup>119</sup> und somit ebenfalls von der Liste der gesuchten Strategien entfernt werden kann. Zur Ermittlung des Nash-Gleichgewichts genügt es deshalb, das folgende reduzierte Spiel zu betrachten ( $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$  Strategienprofile). Die beiden Matrizen in Abbildung 6-1 geben *zusammen* die Spielstruktur mit dem reduzierten Nachrichtenraum an. Die linke Matrix ist relevant, falls der dritte Fischzüchter untertreibt ( $s = -1$ ). Für die rechte Matrix wird wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung dieses Fischzüchters unterstellt ( $s = 0$ ).

		<b>Fischzüchter 2</b>				<b>Fischzüchter 2</b>	
		$s = -1$	$s = 0$			$s = -1$	$s = 0$
<b>Fisch- züchter 1</b>	$s = -1$	0,0,0	0,0,0	$s = -1$	0,0,0	58,16,16	
	$s = 0$	0,0,0	16,16,58		$s = 0$	16,58,16	30,30,30

Abbildung 6-1: Die reduzierte Spielstruktur für das homogene 3-Spieler-Beispiel

Mit Hilfe von Abbildung 6-1 ist es einfach, das gemischte Nash-Gleichgewicht zu ermitteln und die Werte zu verifizieren, welche in Zwischenergebnis 3 postuliert sind.

Angenommen  $p_w$  sei die Wahrscheinlichkeit der wahrheitsgemäßen Präferenzoffenbarung im gesuchten Gleichgewicht.

Erneut können die Ausführungen aus Abschnitt 2.2.3 zur Eigenschaft von gemischten Nash-Gleichgewichten benutzt werden. Für jeden Fischzüchter muss gelten, dass er zwischen den beiden verbleibenden Strategien indifferent ist, falls die anderen beiden Fischzüchter ihre Strategiemischung entsprechend dem Nash-Gleichgewicht wählen.

---

<sup>119</sup> Da es keinen Fischzüchter geben wird, der übertreibt, werden im homogenen Fall zwei Fischzüchter zusammen höchstens 200 NE beitragen. Versucht der Dritte das komplette Freifahren, so scheitert unausweichlich die Finanzierung der Kläranlage, denn dazu sind mindestens 210 NE erforderlich.

Angenommen der erste Fischzüchter sagt die Wahrheit ( $s = 0$ ). Somit ist zunächst die unterste Reihe in Abbildung 6-1 relevant. Nun folge man Schritt für Schritt dem Kalkül dieses Fischzüchters, ob ein Wechsel zu  $s = -1$  vorteilhaft ist.

Von links nach rechts findet man:

- zuerst den Fall, bei dem die Finanzierung der Kläranlage ohnehin scheitert (Nutzen  $(0,0,0)$ ),
- als nächstes zwei Fälle, bei denen 16 Nutzeinheiten verloren gehen würden (Eintrittswahrscheinlichkeit jeweils  $p_w \cdot (1 - p_w)$ ),
- und letztlich einen Fall, bei dem eine Verbesserung von 30 auf 58 NE und somit ein Gewinn von 28 Nutzeinheiten resultieren würde (Eintrittswahrscheinlichkeit  $p_w \cdot p_w$ ).

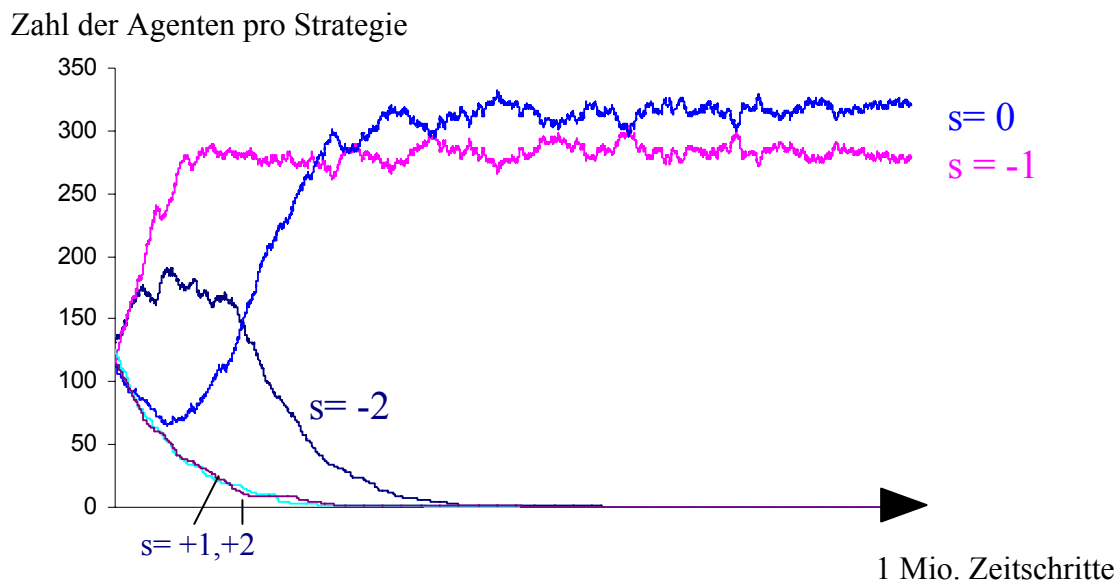
Prüft man die spezifischen Werte  $p_w = (16/30)$  und  $(1 - p_w) = (14/30)$ , so ergibt die Abwägung, ob sich der Strategiewechsel auszahlt, folgende Bilanz:

$$\begin{aligned} \text{Verlorene Nutzeinheiten:} \quad & 2 \cdot (14/30) \cdot (16/30) \cdot 16 = \frac{28 \cdot 16 \cdot 16}{30 \cdot 30} \\ \text{Gewonnene Nutzeinheiten:} \quad & (16/30) \cdot (16/30) \cdot 28 = \frac{16 \cdot 16 \cdot 28}{30 \cdot 30} \end{aligned}$$

Somit ist der erste Fischzüchter tatsächlich indifferent zwischen den beiden Strategien  $s = 0$  und  $s = -1$ , und deshalb beschreibt  $p_w = (16/30)$  das gesuchte gemischte Nash-Gleichgewicht. Aus Symmetriegründen gelten nämlich dieselben Überlegungen für die beiden anderen Fischzüchter.

In Abschnitt 6.3.3 wurde festgestellt, dass die Sampling-Dynamik für einen hinreichend großen Erfahrungsparameter  $k$  zu einem Nash-Gleichgewicht konvergieren muss. Wenn nun ein Ein-Populationsmodell verwendet wird, so ist das soeben kalkulierte Nash-Gleichgewicht der Topkandidat für die zu erwartenden Simulationsergebnisse.

In Abbildung 6-2 ist die Strategienevolution (Anzahl der Agenten pro Strategie) über eine Million Simulationsschritte dargestellt. Für alle Agenten wird  $m = 2$  angenommen. Es wird also das *nicht*-reduzierte Spiel mit jeweils fünf Strategien zugrunde gelegt, wobei die beiden Übertreibungsstrategien schnell aus der Population verdrängt werden dürften.



**Abbildung 6-2: Simulationsergebnis für drei Fischzüchter und homogene Nutzenverteilung**

Die Strategieninitialisierung erfolgte jeweils zufällig. Außerdem wurde  $k = 30$  gewählt – ein Erfahrungsparameter, der sich für die Überprüfung der genannten Nash-Gleichgewichtshypothese ( $p_w = (16/30)$ ) bereits als ausreichend hoch erweist.

Aufgrund der theoretischen Kalkulation ist zu erwarten, dass 320 der 600 Agenten wahrheitsgemäße Angaben machen ( $s = 0$ ) und 280 Agenten untertreiben ( $s = -1$ ). Nach einer Million Zeitschritten wählen genau 321 Agenten die Strategie  $s = 0$  und die Populationsanteile schwanken tatsächlich um die theoretisch berechneten Werte.

Interessant ist es, die Überlegungen von S. 111 erneut in Erinnerung zu rufen:

*Mit Hilfe der Nicht-Übertreibungs-Annahme ... eliminiert man ... leicht zunächst die Übertreibungsstrategien  $s = +1$  und  $s = +2$ . Sobald dieses geschehen ist, erkennt man aber, dass nun das komplette Freifahrerverhalten  $s = -2$  schwach dominiert wird und somit ebenfalls von der Liste der gesuchten Strategien entfernt werden kann.*

Man vergleiche parallel dazu den Evolutionsprozess in Abbildung 6-2. Auch hier scheiden zunächst die Übertreibungsstrategien aus ( $s = +1$  und  $s = +2$ ). Sobald das komplette Freifahren ( $s = -2$ ) aber diese Strategien nicht mehr ausbeuten kann, wird es selbst aus der Population verdrängt. Mit der Simulation wird also sozusagen bildlich der Gedankengang nachvollzogen, welcher auf S. 111 zur Ermittlung des Nash-Gleichgewichts führte.



### 6.4.2 Größeneffekte – Einfluss der Spieleranzahl $n$

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie es sich auswirkt, wenn die Zahl  $n$  sukzessive erhöht wird, also mehr und mehr gleichzeitig betroffene Fischzüchter auf eine adäquate Qualität der gemeinsamen Wasserressource angewiesen sind. Dann kommt nämlich das eigentlich Problematische typischer Umweltsituationen voll zum Tragen – bzw. aus der Sicht von HARDIN das eigentlich Tragische<sup>120</sup>. Bereits OLSON widmete sich dieser Fragestellung unter dem Stichwort der sogenannten “group size effects“<sup>121</sup>.

Zunächst wird eine geeignete Normalisierung vorgenommen, bevor die Zahl  $n$  der jeweils in einer Spielsituation betroffenen Fischzüchter erhöht wird. Andernfalls wäre eine Fehlinterpretation der Ergebnisse die Folge. In Anlehnung an ROB wird ein konstanter Wert  $r$  unterstellt, wobei  $r$  je nach Eigentumsregelung die pro-Kopf-Kosten (der Kläranlage) bzw. die pro-Kopf-Profite aus dem fraglichen Projekt (also etwa der Fabrikerweiterung) angibt. Außerdem wird ab jetzt angenommen, dass die Betroffenheitswerte der Agenten zufällig mittels einer standardisierten Gleichverteilung zugewiesen werden. Anders als im vorigen Teilabschnitt interessiert hier also der Fall *tatsächlicher Heterogenität*.

Entsprechend gilt:  $f_j(\cdot) = 1$  in  $D_j = [0,1]$ ,  $j = 1, \dots, n$ .

Ein allgemeines Erkenntnisinteresse besteht darin, ob es eine Tendenz zu wahrheitsgemäßer Präferenzoffenbarung gibt und wie ausgeprägt diese für einen bestimmten Mechanismus ist. Des Weiteren besteht Interesse, die jeweils erfolgreichsten Strategien zu identifizieren und die Gesamteffizienz eines Mechanismus bzw. eines Pseudo-Mechanismus zu bestimmen. Um die Ergebnisse mehrerer Simulationsläufe kompakt darstellen zu können, wird folgende Notation vereinbart:

- $s_*$  die am **häufigsten gewählte** Strategie (am Ende des Simulationszeitraums),
- $s'_*$  die Strategie, welche mit der **zweithöchsten Häufigkeit** gewählt wurde,
- $s''_*$  die Strategie, welche mit der **drithöchsten Häufigkeit** gewählt wurde,
- $s_0$  die Strategie der **wahrheitsgemäßen** Präferenzoffenbarung.

---

<sup>120</sup> Vgl. Hardin (1968).

<sup>121</sup> Vgl. Olson (1965), S. 53ff.

Zudem wird vereinbart, dass statt „Es wird die Strategie  $s = i$  gewählt“ kürzer geschrieben werden kann: „Es wird  $s_i$  gewählt“.

**Populationsanteile** werden wie folgt bezeichnet:  $p(s_z)$ ,  $z \in \{-m, \dots, +m\}$ ,  $0 \leq p(\cdot) \leq 1$

Außerdem wird ein t.t.t.t-Indikator definiert (abgeleitet von “tendency to truth-telling“), der anzeigt, ob eine Tendenz zu wahrheitsgemäßen Angaben erkennbar ist. Der t.t.t.t.-Indikator kann im Wesentlichen entweder die Werte „ja“ oder „nein“ annehmen oder aber unbestimmt sein. Für den Extremfall, dass sich die Strategie  $s_0$  komplett durchsetzt, wird ein Extrawert vorgesehen. Die detaillierten Festlegungen diesbezüglich lauten wie folgt:

- **nein**                    falls  $p(s_*) \geq 2 \cdot p(s_0)$       $s_0$  ist auf keinen Fall erfolgreichste Strategie
- **ja**                        falls  $p(s_0) \geq 2 \cdot p(s'_*)$       $s_0$  ist deutlich erfolgreichste Strategie
- **komplett**            falls  $p(s_0) = 1$                  $s_0$  wird von der gesamten Population gewählt
- **---**                        ansonsten                        nicht genügend Aussagekraft bzgl.  $s_0$

Während der t.t.t.t.-Indikator im Wesentlichen qualitativen Charakter hat, wird noch ein quantitativer Indikator eingeführt, welcher erste Hinweise für die Gesamteffizienz des Mechanismus bzw. die Ineffizienz eines Pseudo-Mechanismus liefert. Dazu wird eine Mittelung über die letzten 100 Sampling-Phasen vorgenommen:  $impl_{100}$  setzt die Zahl der insgesamt implementierten Projekte zur Zahl aller Samples in Beziehung.

**Bemerkung:** Im Fall  $r = 0,5$  entspricht die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Lösung des “Erst-Besten“ in einer Finanzierung der Kläranlage besteht, exakt dem Wert 0,5. Dies bedeutet schlicht und einfach, dass es genauso wahrscheinlich ist, dass der Status Quo (aufgrund der ursprünglichen Eigentumsregelung) bereits a priori effizient war, oder aber, dass aus gesamtwirtschaftlicher Sicht die Eigentumsrechte gerade umgekehrt hätten spezifiziert werden sollen. Deshalb ist der Fall  $r = 0,5$  optimal für Benchmarking-Zwecke geeignet, und deutliche Abweichungen des  $impl_{100}$ -Indikators vom Wert 0,5 zeigen eine höhere Ineffizienz an bzw. eine hohe Anzahl von Fehlentscheidungen durch den Mechanismus<sup>122</sup>.

---

<sup>122</sup> Dieser Wert ist zugegebenermaßen kein exaktes Maß für Effizienz. Es wäre durchaus möglich, dass etwa hochgradig betroffene Fischzüchter in den letzten 100 Samples unter- oder überrepräsentiert waren. Andererseits werden für  $k=3000$  und  $m=5$  bereits 3,3 Millionen individuelle Samples ausgewertet. Getestet wurde auch, ob es einen Unterschied macht, 1000 Sampling-Perioden einzubeziehen – die Differenz ist minimal.

In den Tabellen 2a bis 2d sind die Ergebnisse zusammengefasst ( $n = 3, n = 6, n = 12, n = 24$ ):

	m=5, k=30	m=5, k=300	m=5, k=3000
<b>t.t.t.t</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>
$s_* / p(s_*)$	$s_{-2} / \sim 24\%$	$s_{-1} / \sim 40\%$	$s_{-2} / \sim 40\%$
$s'_* / p(s'_*)$	$s_{-1} / \sim 20\%$	$s_{-2} / \sim 33\%$	$s_{-1} / \sim 35\%$
$s''_* / p(s''_*)$	$s_{-3} / \sim 16\%$	$s_{-3} / \sim 16\%$	$s_{-3} / \sim 12\%$
$impl_{100}$	0,1792	0,2398	0,2684

**Tabelle 2a:** Ergebnisse nPBS für  $n = 3, r = 0,5$

	m=5, k=30	m=5, k=300	m=5, k=3000
<b>t.t.t.t</b>	---	<b>nein</b>	<b>nein</b>
$s_* / p(s_*)$	$s_{-1} / \sim 24\%$	$s_{-2} \approx s_{-1} / \sim 26\%$	$s_{-2} / \sim 32\%$
$s'_* / p(s'_*)$	$s_{-2} / \sim 20\%$	$s_{-1} \approx s_{-2} / \sim 26\%$	$s_{-1} / \sim 25\%$
$s''_* / p(s''_*)$	$s_{-3} / \sim 17\%$	$s_{-3} / \sim 20\%$	$s_{-3} / \sim 16\%$
$impl_{100}$	0,0466	0,0570	0,0599

**Tabelle 2b:** Ergebnisse nPBS für  $n = 6, r = 0,5$

	m=5, k=30	m=5, k=300	m=5, k=3000
<b>t.t.t.t</b>	---	---	<b>nein</b>
$s_* / p(s_*)$	$s_{-1} \approx s_{-2} / \sim 18\%$	$s_{-1} \approx s_{-2} / \sim 20\%$	$s_{-2} \approx s_{-1} / \sim 24\%$
$s'_* / p(s'_*)$	$s_{-2} \approx s_{-1} / \sim 18\%$	$s_{-2} \approx s_{-1} / \sim 20\%$	$s_{-1} \approx s_{-2} / \sim 24\%$
$s''_* / p(s''_*)$	$s_{-3} / \sim 14\%$	$s_{-3} \approx s_0 / \sim 15\%$	$s_{-3} / \sim 20\%$
$impl_{100}$	0,0157	0,0047	0,0011

**Tabelle 2c:** Ergebnisse nPBS für  $n = 12, r = 0,5$

	m=5, k=30	m=5, k=300	m=5, k=3000
<b>t.t.t.t.</b>	---	---	---
$s_* / p(s_*)$	---	---	$s_{-2} \approx s_{-1} / \sim 18\%$
$s'_* / p(s'_*)$	---	---	$s_{-1} \approx s_{-2} / \sim 18\%$
$s''_* / p(s''_*)$	---	---	---
$impl_{100}$	0,0054	0,0014	0,0002

**Tabelle 2d:** Ergebnisse nPBS für  $n = 24, r = 0,5$

Unabhängig von drastischen Unterschieden im Detail ist **ein gemeinsames Ergebnis** aller Simulationsläufe hervorzuheben: Es sind nämlich immer dieselben beiden Strategien, die sich als am meisten erfolgreich herausstellen – unabhängig von der Zahl  $n$  der betroffenen Fischzüchter und dem Erfahrungsparameter  $k$ . Diese beiden Strategien, welche sich in den Schlussrunden häufig Kopf an Kopf befinden, sind:

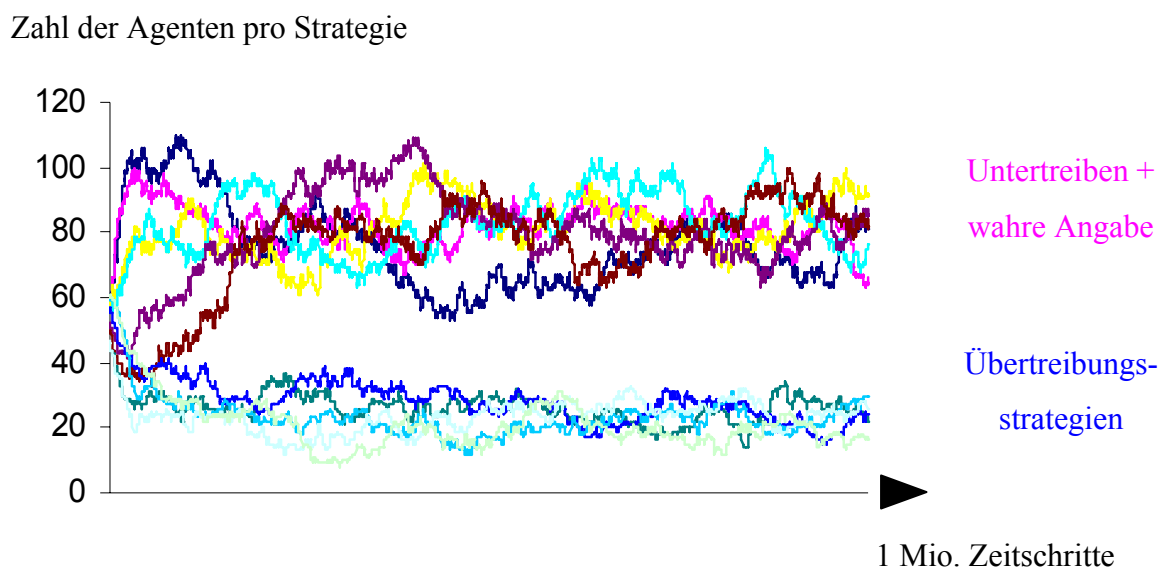
**leichte Untertreibung** ( $s = -2$ ) und **sehr leichte Untertreibung** ( $s = -1$ ).

Moderate Untertreibung ( $s = -3$ ) ist in fast allen Fällen die drittbeste Strategie. Komplettes Freifahrerverhalten ( $s = -5$ ) schafft es niemals in die Top-Ränge, genauso wenig wie starke Untertreibung ( $s = -4$ ). Die Strategie der wahrheitsgemäßen Angabe ( $s = 0$ ) kommt immerhin in einem Szenario dazu, der Strategie ( $s = -3$ ) die Bronze-Medaille streitig zu machen.

Außerdem sind aus Tabelle 2a-2d noch folgende generelle Tendenzen abzulesen:

- *Mit zunehmender Anzahl  $n$  werden die eben beschriebenen Effekte immer undeutlicher.*
- *Mit zunehmendem Erfahrungsparameter  $k$  werden diese Effekte immer deutlicher.*

Entsprechend dieser tendenziellen Einordnung befindet sich also das **unschärfste Szenario** ganz links in Tabelle 2d ( $m = 5, k = 30, n = 24$ ). Bewusst soll aber auch dieses Beispiel illustriert werden. In Abbildung 6-3 ist dazu, wie üblich, die Strategienevolution über 1 Million Schritte dargestellt.



**Abbildung 6-3: Relative Schwächung von Übertreibungsstrategien:  $n=24$ ,  $k=30$**

Trotz aller Unklarheit kann ein gewisser *Lernprozess* konstatiert werden, und dieser hängt mit der Nicht-Übertreibungs-Annahme (siehe Gleichung (33)) zusammen.

Offensichtlich reicht im Beispiel mit 24 Fischzüchtern (je Entscheidungssituation) der relativ geringe Erfahrungsparameter von  $k = 30$  nicht aus, um die Übertreibungsstrategien komplett aus der Population zu verdrängen. Dieses würde sich übrigens selbst mit noch längeren Simulationszeiträumen – 10 Millionen oder mehr – nicht ändern<sup>123</sup>. Andererseits offenbaren *alle* Simulationsläufe für das proportionale Beitragsschema das folgende Muster:

- Die *erste Lektion*, die gelernt wird, ist die, dass zwischen den (dominierten) Übertreibungsstrategien und sämtlichen anderen (nicht dominierten) Strategien diskriminiert wird.
- Diese Lektion wird *immer* gelernt, aber – wie in Abbildung 6-3 zu sehen – bleibt der Adaptionprozess eventuell dabei stehen.
- Wenn der Erfahrungsparameter  $k$  schrittweise erhöht wird (z. B. auf  $k = 3000$  siehe Tabelle 2d rechts), so scheiden die Übertreibungsstrategien allmählich ganz aus der

<sup>123</sup> In Abschnitt 6.3.3 wurde bereits hervorgehoben, dass bei der Sampling-Dynamik noch nicht einmal strikt dominierte Strategien notwendigerweise ausscheiden.

Population aus, und es beginnt ein Lernprozess, bei dem *innerhalb der Klasse der Untertreibungsstrategien* unterschieden wird.

In dem komplizierten Fall mit 24 zugleich betroffenen Fischzüchtern bleibt es dann zwar immer noch bei einem undeutlichen Gesamtbild – allerdings mit einer beachtlichen Ausnahme, denn wie schon erwähnt, sobald überhaupt Unterschiede hinreichend erkennbar werden, stellt sich klar heraus:

Beste und zweitbeste Strategie sind:  $(s = -1)$  und  $(s = -2)$

Die Reihenfolge dieser beiden ist nicht immer gleich. Dennoch sind gewissermaßen “Gold“ und “Silber“ für diese beiden Strategien reserviert – unabhängig von  $n$  und unabhängig von  $k$ .

Für diesen Sachverhalt muss es irgendeinen Grund geben, und auch das vergleichsweise schwache Abschneiden des kompletten Freifahrerverhaltens ( $s = -5$ ) bedarf der Erklärung. Im nächsten Abschnitt wird explizit der Effekt der **Heterogenität** thematisiert, und dabei werden wichtige Details zu Tage gefördert, die bei dieser notwendigen Erklärung weiterhelfen können.

#### 6.4.3 Auswirkungen der Heterogenität

Zunächst wird wegen des zufälligen Zuweisens der Betroffenheitswerte bereits eine gewisse Heterogenität in der Population **exogen** vorgegeben. Ziel dieses Abschnittes ist es zu zeigen, dass daneben – aus dem Modell heraus erklärt (also **endogen**) – zusätzliche Heterogenität entsteht. Erst diese beiden Faktoren zusammen machen plausibel, warum mehr freiwillige Beteiligung bei den Simulationsergebnissen zu finden ist, als zunächst zu erwarten war.

In Abbildung 6-4 wird für den Simulationslauf aus Tabelle 2b-rechts die Strategienevolution wie üblich dargestellt ( $m = 5, r = 0,5, n = 6, k = 3000$ ).

Im Gegensatz zu Abbildung 6-3 ist hier klar zu erkennen, wie zwischen den fünf Untertreibungsstrategien diskriminiert wird. Dagegen verschwinden alle anderen Strategien im Lauf der 1 Million Zeitschritte vollständig aus der Population. Leider gilt dies auch für die wahrheitsgemäße Präferenzangabe.

Zahl der Agenten pro Strategie

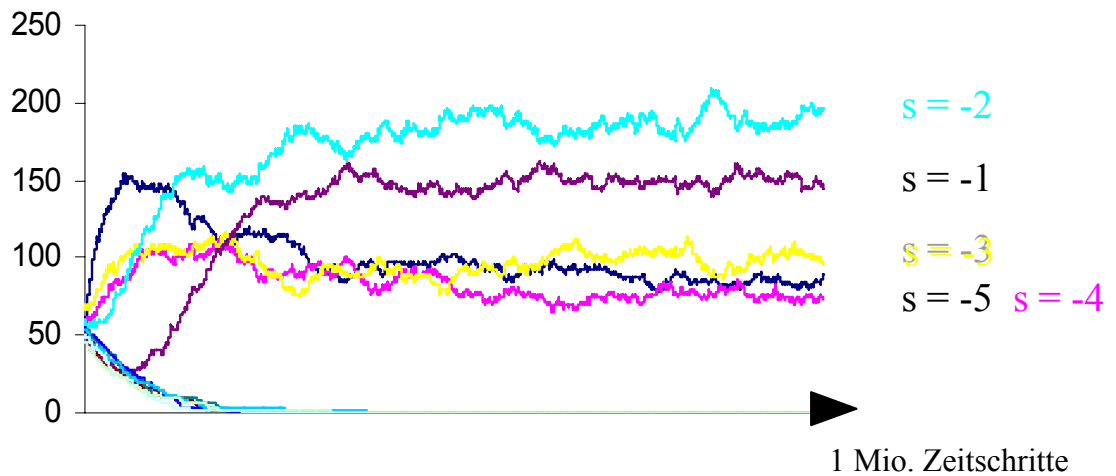


Abbildung 6-4: Diskriminierungsprozess innerhalb der Untertreibungsstrategien:  $n=6, k=3000$

Damit noch weitere Details zu diesem Simulationslauf ausgewertet werden können, wurden die Indizes der Agenten so vergeben (bzw. neu geordnet), dass die Population aufsteigend sortiert ist, und zwar mit Bezug auf den *tatsächlichen* Betroffenheitswert der Agenten.

Als entsprechender Index wird im Folgenden  $i^*$  verwendet.

In Abbildung 6-5 wird für jeden Agenten die individuelle Strategiewahl im letzten Simulationsschritt angegeben. Weil die Population gerade 600 Agenten umfasst, besteht eine derartige Momentaufnahme also genau aus entsprechend vielen (600) Einzelpunkten.

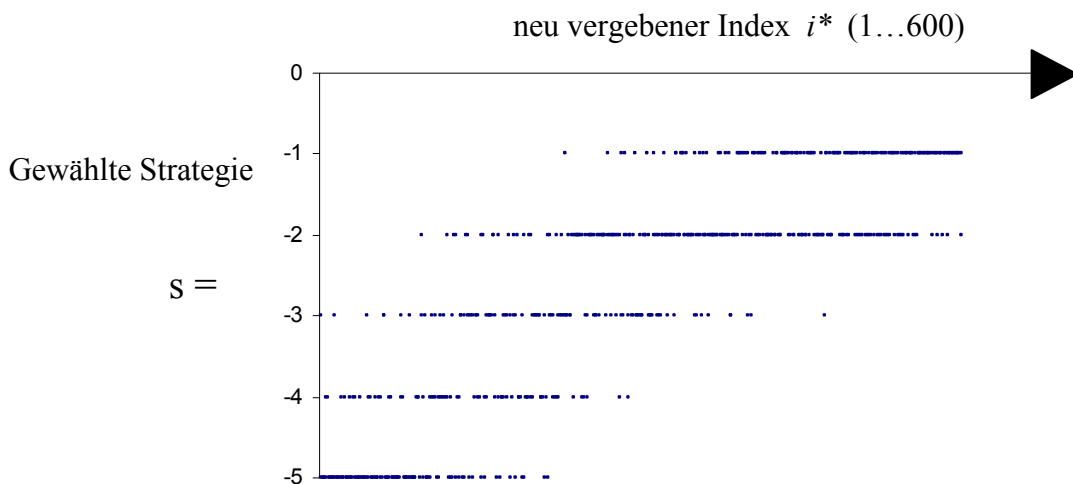


Abbildung 6-5: Individuelle Strategiewahl in der letzten Simulationsperiode ( $T = 1$  Mio.)

## Strategisches Verhalten bei der Finanzierung einer Kläranlage

Es kann eindeutig eine Korrelation zwischen Agentennummern und der jeweils gewählten Strategienummer konstatiert werden. Hätte man eine entsprechende Momentaufnahme für den Zeitschritt 0 gemacht, wäre natürlich kein derartiges Muster beobachtbar gewesen, denn zum Zeitpunkt der Initialisierung wurden die anfangs genutzten Strategien eben für jeden Agenten zufällig vergeben. Folglich muss sich dieses Verhaltensmuster in den 1 Million Zeitschritten **endogen** – durch den Lernprozess – entwickelt haben.

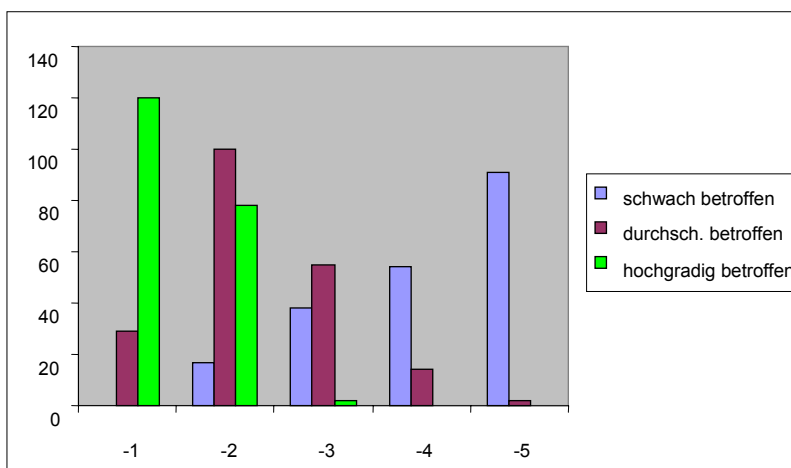
Indem man die Agenten in Untergruppen klassifiziert, kann man nun als nächstes zeigen, dass bei diesem Lernprozess für die unterschiedlichen Untergruppen unterschiedliche Lektionen relevant sind, und eben dieses erklärt die endogene Heterogenität.

Nachfolgend werden dieselben Daten wie in Abbildung 6-5 noch einmal verdichtet dargestellt. Es genügt dazu, die folgende grobe Klassifikation der Agenten vorzunehmen:

- Hochgradig betroffen  $0.67 < x_i < 1$
- Durchschnittlich betroffen  $0.33 < x_i < 0.67$
- Schwach betroffen  $0 < x_i < 0.33$

Abbildung 6-6 zeigt für jede der fünf Untertreibungsstrategien die Anzahl der Agenten pro Subgruppe, welche sich für diese entschieden haben (jeweils in der letzten Runde).

Y-Achse: Zahl der Agenten, die sich von jeder Untergruppe auf die Strategien aufteilen



Ganzzahlige Codierung der Untertreibungsstrategien (-5 = "Freifahrerverhalten")

**Abbildung 6-6: Aufteilung der Gruppen auf die fünf Untertreibungsstrategien**



Ganz entsprechend zu Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 erkennt man, dass das komplette Freifahrerverhalten ( $s = -5$ ) relativ schwach abschneidet.

Ein solches Verhalten ist praktisch nur für die Gruppe der geringfügig betroffenen Fischzüchter relevant. Nun hat diese Gruppe aber ohnehin nur geringen Einfluss auf die Kollektiventscheidung – auch wenn die betreffenden Fischzüchter angemessene Beiträge anbieten würden, so wären diese doch nur sehr niedrig.

Auf der anderen Seite – und hierauf kommt es an – wählen die hochgradig betroffenen Fischzüchter entweder  $s_{-1}$  oder  $s_{-2}$  (mit Ausnahme eines Ausreißers für  $s_{-3}$ ). Das bedeutet, die Fischzüchter, auf die es in hohem Maße ankommt, lernen, dass es in ihrem Interesse ist, vergleichsweise hohe Beitragsangebote zu machen. Diese Beiträge liegen sogar meist über dem a priori zu erwartenden Durchschnittswert, aber *immer unter der tatsächlichen Bewertung* des öffentlichen Gutes durch den jeweiligen Fischzüchter<sup>124</sup>. Fischzüchter mit mittlerem Betroffenheitswert wählen alle fünf Untertreibungsstrategien, aber sehr selten entscheiden sie sich für die Freifahreroption und am häufigsten für die Strategien  $s_{-2}$  und  $s_{-3}$ .

Die unterschiedlichen Lektionen, welche während des Adaptionprozesses gelernt werden, können für die (extremen) Gruppen also wie folgt zusammengefasst werden:

- Fischzüchter mit einem hohen Interesse zeigen hohe Bereitschaft, sich an der Finanzierung der Kläranlage zu beteiligen. Sie lernen, dass immer, wenn die Kläranlage realisiert wird, ohnehin genug für sie übrig bleibt. Falls aber andererseits *nicht einmal* sie ausreichendes Interesse bekunden, würde das Projekt fast mit Sicherheit scheitern.
- Fischzüchter mit geringem Interesse lernen, dass es auf sie nicht ankommt – sie haben nicht viel zu verlieren, falls die Finanzierung der Kläranlage scheitert, und falls es doch zu deren Realisierung kommt, können sie die Freifahrerposition einnehmen.

#### 6.4.4 Sensitivitätsanalyse

Für einige der Modellparameter kann die Analyse recht kurz zusammengefasst werden: In Abschnitt 6.4.2 wurden bereits hinreichend die Effekte des *Erfahrungsparameters*  $k$  sowie

---

<sup>124</sup> D. h. immer wenn die Kläranlage finanziert wird, so kann von Seiten des hochgradig Betroffenen also mindestens diese Differenz eingestrichen werden. Damit sollen schwach betroffene Freifahrer nicht völlig entschuldigt werden, aber unter Fairness-Gesichtspunkten relativiert sich das Urteil etwas.

von der *Anzahl*  $n$  der betroffenen Fischzüchter behandelt. Je mehr Erfahrung gesammelt werden konnte, umso einfacher ist es für die Fischzüchter, zwischen ähnlich guten Strategien zu unterscheiden. Je mehr Betroffene (bzw. Beteiligte) *mitmischen*, umso schwieriger gestaltet sich diese Aufgabe. Interessant ist noch folgender Zusammenhang der beiden Parameter: Aus Tabelle 2a und 2b ist zu entnehmen, dass bei wenigen Fischzüchtern (etwa  $n = 3$  oder  $n = 6$ ) die Implementierungsrate  $impl_{100}$  mit wachsendem  $k$  ansteigt. Bei vielen Fischzüchtern (deutlich erkennbar in Tabelle 2d für  $n = 24$ ) sinkt aber die Implementierungsrate. Dieser Sachverhalt lässt sich wie folgt interpretieren: Bei sehr vielen Beteiligten lehrt offensichtlich die Erfahrung zunehmend, dass es ohnehin zwecklos sein wird, durch angemessene Beitragsangebote zum Erfolg zu kommen. Dann ist es attraktiver, einen geringen Nutzen anzugeben und dann umso stärker zu profitieren in den ganz wenigen Fällen, bei denen es zufällig (oder aufgrund von suboptimalem Verhalten bei anderen) eben doch zur Realisierung der Kläranlage kommt.

Was die *Populationsgröße*  $N$  betrifft – zu unterscheiden von  $n$ , der Anzahl der jeweils beteiligten Fischzüchter – so kann auf die Überlegungen für das erste Anwendungsbeispiel zurückgegriffen werden<sup>125</sup>. Im Wesentlichen hat eine Erhöhung von  $N$  lediglich eine Glättung der Strategienentwicklung zur Folge und keinerlei Einfluss auf die generellen Aussagen. Der Parameter  $\rho$ , der bei der Sampling-Dynamik die Wahrscheinlichkeit für das Ausscheiden eines Agenten angibt, hat genauso wenig Bedeutung wie die *Zahl der Simulationsschritte*  $T$  (vgl. auch hierzu die entsprechenden Bemerkungen in Abschnitt 5.5).

Für eine genauere Untersuchung verbleiben somit die Parameter  $m$  und  $r$ . Außerdem spielt das *Ausmaß der Heterogenität* eine Rolle. Dagegen zeigt sich das Modell relativ unempfindlich, was die *anfängliche Strategieninitialisierung* betrifft.

### **Zahl der Strategien**

Die Ergebnisse von Tabelle 2a–2d gelten streng genommen nur für den Parameter  $m = 5$ . Dennoch können die Interpretationen und Schlussfolgerungen in den Abschnitten 6.4.2 und 6.4.3 in vollem Umfang aufrechterhalten werden.

**Zur Begründung:** Unter anderem wurden einige Simulationsläufe mit dem Parameter  $m = 50$  wiederholt (bei ansonsten identischen Parameterkonstellationen). Angenommen beim entsprechenden Referenzlauf mit  $m = 5$  war  $s = -1$  am erfolgreichsten, gefolgt von  $s = -2$ .

---

<sup>125</sup> Vgl. insbesondere Abschnitt 5.5

Man betrachte erneut die Transformationsgleichung, mit der das Mechanismus-Objekt die Werte des diskreten Nachrichtenraums in die kontinuierlichen Werte  $y_i$  umwandelt. Ausgehend von Gleichung (39) erkennt man, dass  $s = -1$  nun gerade der Strategie  $s = -10$  entspricht, falls  $m$  von 5 auf 50 erhöht wird. Entsprechend sind  $s = -2$  und  $s = -20$  äquivalent.

Es darf nun nicht erwartet werden, dass bei den zusätzlichen Vergleichsläufen (für  $m = 50$ ) immer gerade  $s = -10$  und  $s = -20$  am erfolgreichsten sind. Typischerweise gehen in einem Simulationslauf Gold und Silber an  $s = -13$  und  $s = -16$ , aber schon im nächsten Lauf etwa an  $s = -14$  und  $s = -12$  usw. Die Methode der Fokussierung auf die erfolgreichsten zwei oder drei Strategien führt also im Falle von  $m = 50$  (dies entspricht 101 Strategien) nicht weiter. Um zu interpretierbaren Ergebnissen zu kommen, müsste also wieder aggregiert werden<sup>126</sup>.

Das Wesen von Aggregationsvorgängen ist aber immer der Verlust von Detailinformation. Ob die stärkere Informationsverdichtung schon durch das Mechanismus-Objekt stattfindet (bei der Interpretation der diskreten Signale) oder erst anschließend bei der Interpretation der Ergebnisse, spielt kaum eine Rolle. Deshalb würde eine Erhöhung von  $m$  nicht nur keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringen, sondern man hätte sich zudem der Gefahr ausgesetzt, den Wald vor lauter Bäumen nicht mehr zu sehen.

### **Pro-Kopf-Kosten der Kläranlage**

Die Ergebnisse von Tabelle 2a–2d gelten streng genommen nur für den Parameter  $r = 0,5$ . Die wesentlichen Schlussfolgerungen in den Abschnitten 6.4.2 und 6.4.3 bleiben aber auch von Änderungen dieses Parameters unberührt. Insbesondere kommt es *weder zur wahrheitsgemäßen Präferenzoffenbarung noch zum kompletten Freifahrerverhalten*. Außerdem gilt: Sobald der Parameter  $k$  hoch genug ist, werden Übertreibungsstrategien vollständig aus der Population verdrängt. Die Populationsanteile der jeweils erfolgreichsten Strategien bewegen sich ebenfalls in ähnlichen Bandbreiten, auch wenn es freilich nicht zu genauer Übereinstimmung kommt. Einen wesentlichen Einfluss haben die pro-Kopf-Kosten (Parameter  $r$ ) allerdings auf die

---

<sup>126</sup> Um zu vergleichbaren Resultaten zu kommen, könnten ausgehend von der Mitte ( $s=0$ ) jeweils 9 Strategien zusammengefasst werden. Somit würden die 101 Strategien ( $m=50$ ) fast exakt auf 11 Strategiegruppen verteilt. Die verbleibenden beiden Einzelstrategien am Rande des Strategienraumes würden jeweils den extremsten Gruppen zugeschlagen. Bei einer solchen Vorgehensweise ist dann  $s=-4$  bis  $s=+4$  als „*wahrheitsgemäße Nutzenangabe*“ zu interpretieren.  $s=-5$  bis  $s=-13$  sind dann zu „*sehr leichter Untertreibung*“ zusammengefasst.  $s=-14$  bis  $s=-22$  werden als „*leichte Untertreibung*“ interpretiert usw.

Implementierungsrate  $impl_{100}$ . Reduziert man etwa  $r$  auf 0,25, so beobachtet man durchgängig, dass die Kläranlage häufiger gebaut wird. Dieser Unterschied ist auch ganz plausibel, denn die Pro-Kopf-Kosten sinken, während der erwartete Nutzen gleich geblieben ist. Die Kläranlage *sollte* a priori dann auch öfters finanziert werden.

An dieser Stelle ist allerdings vor zwei Missverständnissen zu warnen: Erstens muss betont werden, dass der (Pseudo-)Mechanismus auch dann in den allermeisten Fällen zum Scheitern der Finanzierung führt. Insbesondere bei einer hohen Anzahl von Betroffenen bleibt die Performance schlicht jämmerlich. Betrachtet man etwa die Implementierungsraten für  $n = 24$  in Tabelle 2d, so leuchtet sofort ein, dass selbst mit einer Vervielfachung dieser Werte nicht viel gewonnen wäre. Zweitens darf aus einer Erhöhung von  $impl_{100}$  nicht der Schluss gezogen werden, der Pseudo-Mechanismus sei für kleinere Werte von  $r$  effizienter. Insbesondere leidet die Vergleichbarkeit darunter, dass die *Soll*-Implementierungsraten von  $r$  und im Allgemeinen auch noch von  $n$  abhängig sind. Nur bei  $r = 0,5$  liegt diese *Soll*-Implementierungsrate unabhängig von  $n$  konstant bei 0,5. Zu einer endgültigen Beurteilung der Effizienz ist der Indikator  $impl_{100}$  ohnehin nur bedingt geeignet. Es war aber vor allem Zweck in diesem Abschnitt zu zeigen, wie bei einer Erhöhung der Spielerzahl das gesamtwirtschaftliche Verbesserungspotential nahezu vollständig ungenutzt verpufft, falls keine Anreize für wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung vorliegen. Viel interessanter wird die Fragestellung nach der sogenannten Ex-Post-Effizienz deshalb in Abschnitt 6.5.

### 6.4.5 Zwischenfazit

Bisher beschränkte sich die Diskussion auf Situationen, in denen von Anreizkompatibilität keine Rede sein konnte<sup>127</sup>. Mit einem freiwilligen Beitragsschema ist die Tendenz zu verfälschenden (in diesem Fall untertriebenen) Angaben unvermeidlich.

Es zeigte sich aber, dass es in manchen Fällen dennoch möglich war, das öffentliche Gut auf vollständig freiwilliger Basis bereitzustellen – freilich nur dann, wenn mehrere Fischzüchter mit hohem Interesse zugleich beteiligt waren. Immerhin können also die extremsten Beispiele von

---

<sup>127</sup> Die Ausführlichkeit der Diskussion war dennoch angemessen, denn die Ergebnisse entsprechen interessanterweise auch dem, was die Alltagserfahrung lehrt: Häufig gelingt es, dass einige wenige in einer Gruppe (mit hohem Interesse) freiwillig Kooperationsbeiträge leisten. Wie schon OLSON richtig bemerkt hat, ergibt sich deshalb durchaus ein Potential zur spontanen Organisation in mittelgroßen Gruppen (vgl. Olson (1965)).

gesamtwirtschaftlicher Ineffizienz vermieden werden – nämlich genau jene, bei denen ansonsten ein hoher Nutzenverlust eingetreten wäre.

Soweit die gute Nachricht. Wenn aber die Anzahl der beteiligten Spieler erhöht wird, so wird die Wahrscheinlichkeit immer geringer, dass die Beiträge einiger weniger ausreichen, um das öffentliche Gut zu finanzieren. Die Übersichtstabellen 2a-2d liefern ein klares Ergebnis: Betrachtet man beispielhaft jeweils die mittlere Spalte dieser Tabellen ( $k = 300$ ), so sinkt der Indikator für (In)effizienz von ca. 24% für  $n = 3$  auf knapp 1,4 Promille für  $n = 24$ .

Zur Erinnerung: In allen Fällen hätte die First-Best-Lösung statistisch jeweils zu einer Implementierungsrate von 50% führen müssen. Deshalb werden im Folgenden *anreizkompatible Mechanismen* untersucht, die dem Problem theoretisch abhelfen können.

## 6.5 Mechanismus-Design und Mechanismus-Simulation

In diesem Abschnitt wird zunächst auf zwei bekannte Mechanismen eingegangen, zum einem auf GROVES-Schemata und zum anderen auf den Mechanismus von ROB. Bei beiden handelt es sich um sogenannte *direkte Mechanismen*, die das Problem strategischer Falschangaben theoretisch vollständig ausräumen. Von Interesse ist aber, wie gut das praktisch funktioniert, wenn *Abstriche von der vollständigen Rationalität* gemacht werden.

Zur Beantwortung dieser Frage wird erneut das Simulationstool herangezogen<sup>128</sup>. In Abschnitt 6.5.1 werden GROVES-Schemata untersucht. In Abschnitt 6.5.2 wird die Grundidee des ROB-Mechanismus skizziert, und dann werden auch hierfür entsprechende Simulationen durchgeführt. In beiden Fällen wird sich zeigen, dass die generelle Zielsetzung (Vermeidung von Falschangaben) einigermaßen zufriedenstellend erfüllt wird – selbst unter den erschwerten Bedingungen begrenzter Rationalität. Im letzten Abschnitt 6.5.3 wird dann ein eigen entwickelter Mechanismus vorgestellt und gezeigt, wie mit Hilfe des Simulationstools dabei recht schnell weniger brauchbare Ansätze aussortiert werden können

---

<sup>128</sup> Dieses konnte nun ganz einfach umgesetzt werden, denn der Pseudo-Mechanismus (nPBS) ist wie ein echter Mechanismus implementiert worden. Also musste nur noch eine minimale Programmerweiterung erfolgen, und es genügte, im Hauptprogramm einfach Zeiger auf die neu zu implementierenden Mechanismus-Objekte zu legen.

### 6.5.1 GROVES-Schemata

Für den Zweck dieser Arbeit reicht es aus, einen Mechanismus als  $(n + 1)$ -Tupel zu definieren:

$$(b(\mathbf{y}, n, r), c_1(\mathbf{y}, n, r), \dots, c_n(\mathbf{y}, n, r)). \quad (45)$$

Im Falle einer fix vorgegebenen Projektgröße  $R = n \cdot r$  (bzw.  $C = n \cdot r$ ) können die entsprechenden Attribute wahlweise auch weggelassen werden. Im Wesentlichen macht ein Mechanismus also nur Folgendes: Er verarbeitet als Eingangsgröße den Signalvektor  $\mathbf{y}$ , den Vektor der *berichteten* Betroffenheitswerte, und liefert als Output die folgenden beiden Ergebnisse:

- $b(\mathbf{y}) \in \{0,1\}$  gibt die binäre Entscheidung über die Projektrealisierung an<sup>129</sup>.
- $\mathbf{c}(\mathbf{y}) \equiv (c_1(\mathbf{y}), \dots, c_n(\mathbf{y}))$  bezeichnet den Vektor der Ausgleichszahlungen.

Ein spezielles GROVES-Schema, der sogenannte „demand revealing mechanism“ (im Folgenden DRM), kann in dieser Notation wie folgt dargestellt werden:

$$b(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum y_i > n \cdot r \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (46)$$

Im Fall der Projektrealisierung sind zur Finanzierung der Kläranlage folgende Beiträge fällig:

$$c_i(\mathbf{y}) = n \cdot r - \sum_{j \neq i} y_j, \quad i = 1, \dots, n \quad (47)$$

Zu beachten ist, dass die Ausgleichszahlung, die jeder beteiligte Fischzüchter zu leisten hat, offensichtlich von der jeweils eigenen Nutzenangabe unabhängig ist.

Bereits in den 1970er Jahren konnte nachgewiesen werden, dass bei allen GROVES-Schemata die wahrheitsgemäße Präferenzangabe nicht nur ein Nash-Gleichgewicht darstellt, sondern auch *alle anderen Strategien dominiert* (wenn auch nur schwache Dominanz vorliegt). Ein Agent kann also niemals durch Abweichen von der wahrheitsgemäßen Nutzenangabe etwas gewinnen – völlig unabhängig von den möglichen Konstellationen und Strategien bei den Mitspielern<sup>130</sup>. Es liegt also erneut ein perfekter Testfall für die Validierung des Simulationsmodells vor.

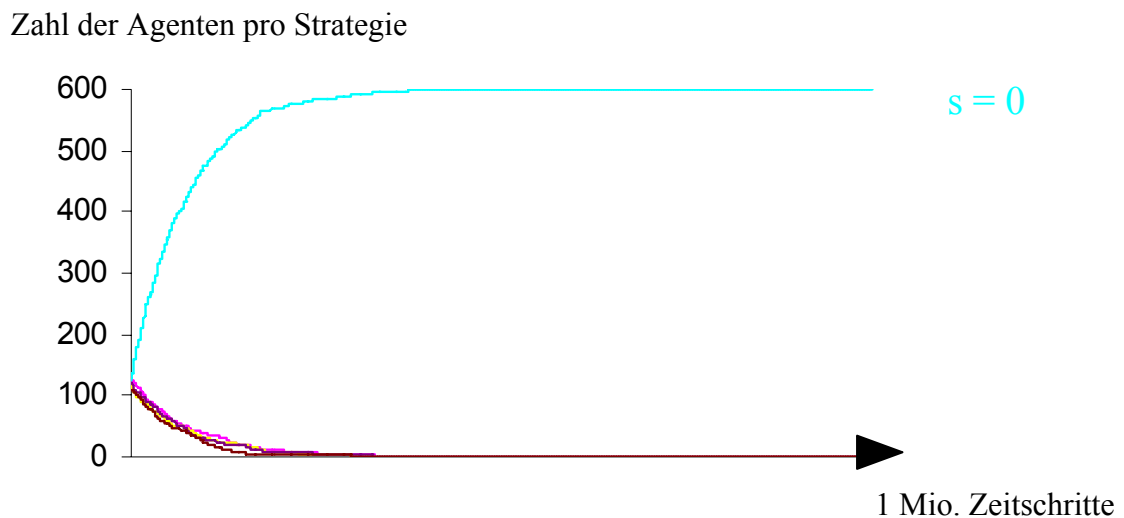
---

<sup>129</sup> Dabei ist  $b(\mathbf{y})=0$  immer als Beibehaltung des Status Quo zu interpretieren.

<sup>130</sup> Vgl. Weimann (1990), S. 227.

Die Strategie ( $s = 0$ ) müsste alle anderen leicht aus der Population verdrängen können – sollte man meinen.

In Abbildung 6-7 ist zu erkennen, dass dieses im Prinzip auch wie gewünscht funktioniert. Wie üblich ist die Strategienevolution über einen Zeitraum von 1 Million Schritten dargestellt. Erneut wurde dazu eine Population von 600 Agenten angelegt und jeweils eine Standard-Gleichverteilung herangezogen, um die Betroffenheitswerte zufällig zuzuweisen.



**Abbildung 6-7: GROVES-Mechanismus: Erfolg der einzigen dominanten Strategie.** X-Achse: Simulationszeit (bis 1 Million Schritte). Y-Achse: Zahl der Agenten pro Strategie. Parameter:  $n=6$ ,  $r=0,5$ ,  $m=2$ ,  $k=300000$ .

Nach relativ kurzer Zeit wählen sämtliche 600 Agenten die wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung. Allerdings war dieses Simulationsergebnis alles andere als leicht zu erreichen.

Man beachte die Parameter des Simulationsszenarios:

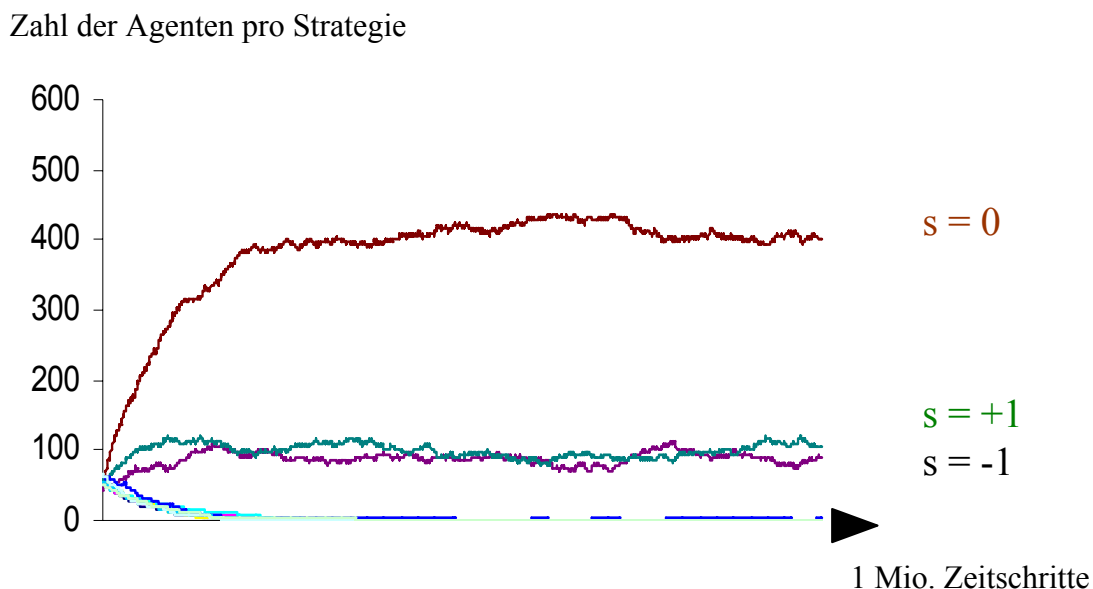
Zunächst war es erforderlich, den Erfahrungsparameter  $k$  bis zu einem Wert von 300.000 anzuheben (das Simulationstool benötigte auch eine entsprechende Laufzeit von fast fünf Tagen). Des Weiteren wurde der Parameter  $m = 2$  gesetzt – d. h. es wurden jeweils nur zwei Strategien für Über- bzw. Untertreibung zugelassen – inklusive der wahrheitsgemäßen Angabe hatte jeder Fischzüchter also lediglich fünf Möglichkeiten zur Auswahl. Mit noch mehr Optionen<sup>131</sup> würde ein noch viel höherer Erfahrungsparameter  $k$  benötigt, denn für die Agenten

<sup>131</sup> Die Standardszenarien in Abschnitt 6.4 bezogen sich alle auf  $m = 5$  und somit auf elf Strategien.

## Strategisches Verhalten bei der Finanzierung einer Kläranlage

ist es schwieriger, solche Strategien auszuschneiden, welche der wahrheitsgemäßen Angabe ähnlicher sind.

Für Abbildung 6-8 wurde  $k$  auf 30.000 verringert,  $m = 5$  verwendet, und erneut ist die Strategienevolution über einen Zeitraum von 1 Million Schritten dargestellt.



**Abbildung 6-8: GROVES-Mechanismus: Performance der nächst besten Strategien.** X-Achse: Simulationszeit (bis 1 Million Schritte). Y-Achse: Zahl der Agenten pro Strategie. Parameter:  $n=6$ ,  $r=0,5$ ,  $m=5$ ,  $k=30000$ .

Diesmal liegt der Populationsanteil der wahrheitsgemäßen Angabe gerade noch bei ca. 65%. Die Strategien, welche daneben den größten Erfolg aufweisen, sind eben jene, die  $s = 0$  am ähnlichsten sind – sehr leichte Übertreibung ( $s = +1$ ) bzw. sehr leichte Untertreibung ( $s = -1$ ).

Alle anderen der insgesamt elf Strategien verschwinden im Lauf der 1 Million Zeitschritte. Man beachte jedoch, dass 30.000 Samples für reale Entscheidungsträger immer noch reichlich unrealistisch sind. Trotz des hohen Erfahrungsparameters  $k$  konnte aber die wahrheitsgemäße Präferenzangabe sich noch nicht einmal vollständig durchsetzen – ein mageres Ergebnis für eine Strategie, die alle anderen (wenn auch nur schwach) dominiert. Bei Simulationsläufen mit noch mehr beteiligten Fischzüchtern als mit  $n = 6$  sind die Ergebnisse noch frustrierender.

Die erzielten Simulationsergebnisse sind dennoch sehr bedeutsam. Zunächst zeigte sich, dass der Mechanismus im Prinzip auch für *begrenzte Rationalität* zu weitgehend korrekten Nutzenangaben führt. Es gibt eine Tendenz zur Strategie  $s = 0$ , und je größer Abweichungen



davon sind, um so stärker wird (im Mittelwert) bestraft. Mit quasi vollständiger Rationalität – simuliert durch hinreichend großes  $k$  – konnten sogar **alle Strategien bis auf die dominante** verdrängt werden. Somit liegt ein weiteres Beispiel für die Verifikation des Modells vor.

Bekannterweise garantiert das spezielle GROVES-Schema in Form des DRM nicht ein ausreichendes Budget zur Finanzierung. Für ein instruktives Beispiel sei dazu auf FELDMAN verwiesen<sup>132</sup>. Der “CLARKE-GROVES-Mechanismus“ (auch “**Pivotal Mechanism**“) gehört ebenfalls zur Klasse der GROVES-Schemata und ist geeignet dieses Finanzierungsproblem zu lösen.

Die Grundidee des CLARKE-GROVES-Mechanismus (im Folgenden PIVOT) ist es, unter genau spezifizierten Bedingungen eine Zusatzsteuer (auch “CLARKE-Tax“) einzusammeln. Der Steueraufschlag betrifft dabei genau jene Fischzüchter, welche durch ihre Angaben den Ausschlag geben (bzw. *pivotal* sind.). Die Höhe des Steueraufschlags wird so bemessen, dass ein Fischzüchter sämtliche Nutzenveränderungen bei anderen Individuen zu tragen hat, falls gerade seine Nutzenangabe dazu führt, dass ein Projekt realisiert wird, welches ansonsten nicht realisiert worden wäre. Damit wird genau jener Mangel behoben, welcher mit externen Effekten verbunden ist. Jeder (Fischzüchter) trägt **alle Folgen** seiner Handlungen.

Die zusätzliche Steuerzahlung (im Vergleich zum DRM) ist dazu wie folgt zu berechnen<sup>133</sup>:

$$S_i = \text{Max} \left\{ 0, \sum_{j \neq i}^n (y_j - r) \right\} \quad i = 1, \dots, n \quad (48)$$

Man kann zeigen, dass eine derartig konzipierte Zusatzsteuer im Vergleich zu DRM die **individuellen Anreize** für die Fischzüchter **völlig unverändert** lässt<sup>134</sup>. Solange also mit dem Tool nur die Strategienentwicklung simuliert wird, müssten dieselben Ergebnisse für DRM und PIVOT resultieren.

Dies ist ein weiterer Testfall, der geeignet ist, das Simulationstool zu validieren, so sollte man meinen. Deshalb wurden zur Kontrolle einige Simulationsläufe für DRM wiederholt und dabei folgende Entscheidungsregeln für PIVOT aus der Arbeit von WEIMANN zugrunde gelegt:

---

<sup>132</sup> Vgl. Feldman (1980), S. 125.

<sup>133</sup> Vgl. Weimann (1990), S. 227 und insb. S. 229 für die Anwendung auf Projekte mit fixer Größe. Allerdings verwendet WEIMANN ein andere Notation. In Anhang 4 erfolgt die Herleitung des Steueraufschlags für den hier relevanten Fall einer binären Projektentscheidung.

<sup>134</sup> Vgl. Weimann (1990), S. 228.

$$b(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum y_i > n \cdot r \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (49)$$

$$\text{falls } b(\mathbf{y}) = 1 \quad c_i(\mathbf{y}) = S_i + n \cdot r - \sum_{j \neq i} y_j, \quad i = 1, \dots, n \quad (50)$$

$$\text{falls } b(\mathbf{y}) = 0 \quad c_i(\mathbf{y}) = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (51)$$

Als die ersten Simulationsergebnisse vorlagen, war die Überraschung perfekt: Die Unterschiede waren signifikant!

Erst nach gründlicher Recherche der zitierten Originalliteratur<sup>135</sup> stand für den Verfasser dieser Arbeit fest, dass der Fehler nicht im Simulationstool zu finden war, sondern statt dessen im Lehrbuch. Es ist nicht die Absicht des Verfassers, durch Erwähnen dieser Episode jemanden zu diskreditieren. Im Gegenteil: Die von WEIMANN angegebene Entscheidungsregel war dem Verfasser dieser Arbeit selbst seit mehreren Jahren bekannt und erschien auch so plausibel, dass keinerlei Verdacht eines Fehlers aufgekommen war.

Auf jeden Fall offenbart diese Geschichte *einige Wahrheiten* und ist für diese Arbeit deshalb in mehrerer Hinsicht relevant<sup>136</sup>.

Zunächst zeigt sich, dass es mit Sicherheit weniger komplizierte Mechanismen gibt als den CLARKE-GROVES-Mechanismus. In ihren Experimenten beobachten übrigens auch KAWAGOE und MORI, dass ihre Versuchspersonen erhebliche Schwierigkeiten hatten zu verstehen, warum die Strategie der wahrheitsgemäßen Nutzenangabe dominant sein soll<sup>137</sup>. Dies sollte nicht verwundern, denn die hier dargestellten Simulationsergebnisse zeigen ganz entsprechend, dass eine unglaubliche Menge an Erfahrung (hoher Parameter  $k$ ) notwendig wäre, um mit *Sampling* herauszufinden, was durch Theorie recht leicht gezeigt werden kann, und selbst mathematisch versierte Wissenschaftler produzieren (oder übersehen) kleine Fehler bei der korrekten Ableitung der Entscheidungsregeln bzw. bei Bestimmung der Kompensationszahlungen.

---

<sup>135</sup> Vgl. Green und Laffont (1977) sowie Feldman (1980).

<sup>136</sup> Das 6. Kapitel basiert weitgehend auf dem Konferenzpaper für die WEHIA 2005 in Essex, vgl. Berkemer (2005) und im englischen Original ging es im Wortsinne um „truth revealing“.

<sup>137</sup> Vgl. Kawagoe und Mori (2001).

*Soll vor diesem Hintergrund wirklich erwartet werden, dass Fischzüchter die Regeln verstehen oder gar die Grundidee des zugrunde liegenden Mechanismus nachvollziehen können?*

Trotz aller berechtigter Zweifel diesbezüglich darf die Leistung, die bereits in den 1970er Jahren mit Entwicklung der GROVES-Schemata begann, nicht klein geredet werden.

Erstens wurden diese (anreizkompatiblen) Mechanismen damals *nicht in erster Linie für den Praxiseinsatz* konzipiert. Vielmehr war es eine interessante theoretische Frage, ob es überhaupt möglich ist, die auf viele Individuen verstreuten Informationen  $x_i$  (niemand kennt ja den kompletten Vektor  $\mathbf{x}$ ) im Sinne einer gesamtwirtschaftlich optimalen Entscheidung einzusetzen. Aus kybernetischer Sicht ist dabei nichts Geringeres gelungen, als den theoretisch optimalen *Beobachter* zu konzipieren – freilich nur unter den bekannten Einschränkungen der vollständigen Rationalität!

Zweitens: Was einen möglichen Praxiseinsatz betrifft, darf die Kritik ebenfalls etwas abgemildert werden, denn man sollte folgenden Gesichtspunkt nicht übersehen:

Selbst wenn die Agenten von der einzig dominanten Strategie  $s = 0$  abweichen, so wählen sie doch mit hoher Wahrscheinlichkeit eine der Strategien, welche  $s = 0$  sehr ähnlich sind. Auch dieses Ergebnis der Simulationsläufe stimmt hervorragend überein mit den experimentellen Untersuchungsergebnissen von KAWAGOE und MORI. Trotz erkennbarem Abweichen vom optimalen Verhalten kann also eine respektable gesamtwirtschaftliche Effizienz konstatiert werden – jedenfalls im Vergleich zu den frustrierenden Ergebnissen in Abschnitt 6.4.

Leider ist für diese hohe – theoretisch sogar vollständige – Effizienz an anderer Stelle ein Preis zu zahlen: Zwar ist das Problem der *Anreizkompatibilität* gelöst, aber das der *Anreizteilnahme* nicht. Es wird nämlich einfach unterstellt, dass sich sämtliche Agenten den Regeln des Mechanismus unterwerfen (müssen). Für viele Agenten wäre es aber nicht rational, sich überhaupt freiwillig an dem Mechanismus zu beteiligen. Zu den wünschenswerten Eigenschaften eines Mechanismus zählt aber auch die Bedingung *individueller Rationalität* (IR-Bedingung). In Kapitel 3 wurde bereits angedeutet, dass diese Bedingung mit anderen wünschenswerten Eigenschaften (Anreizkompatibilität, Ex-Post-Effizienz) in Konflikt steht. Die weiteren Ausführungen werden dies erneut bestätigen.

### 6.5.2 Mechanismus von ROB

RAFAEL ROB entwickelte ebenfalls einen anreizkompatiblen Mechanismus, der aber zusätzlich die Bedingungen individueller Rationalität erfüllt.

Die IR-Bedingung wird dadurch sichergestellt, dass jeder Fischzüchter nur profitieren kann, falls der Mechanismus zur Anwendung kommt<sup>138</sup>. Deshalb haben alle Fischzüchter – anders als beim CLARKE-GROVES-Mechanismus – einen Anreiz, sich freiwillig zu beteiligen.

Auf der anderen Seite wird die Forderung nach Anreizkompatibilität etwas abgeschwächt. ROB verlangt nicht, dass die wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung eine dominante Strategie ist, sondern lediglich, dass sie den Gleichgewichtspunkt eines **Bayes-Nash-Gleichgewichts** konstituiert. Zum generellen Konzept einer Bayesianischen Anreizkompatibilität hat bereits MEYERSON ausführlich Stellung bezogen<sup>139</sup>.

Die Entscheidungsregeln von ROB lesen sich in der für diese Arbeit vereinbarten Notation wie folgt:

$$b(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum_{i=1}^n [y_i + F_i(y_i) / f_i(y_i)] \leq n \cdot r \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (52)$$

Im Falle einer Projektrealisierung erfolgen die Ausgleichszahlungen:

$$c_i(\mathbf{y}) = y_i + \int_{y_i}^{\bar{x}_i} b(\mathbf{y}_{-i}, z_i) dz_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (53)$$

Um zu verstehen, auf welche Weise der ROB-Mechanismus Anreize zu wahrheitsgemäßen Nutzenangaben liefert, ist die Argumentation von ROB in den Grundzügen kurz dargestellt.

ROB führt das Konzept einer *virtuellen sozialen Verlustfunktion* ein, die er wie folgt definiert:

$$h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n [x_i + F_i(x_i) / f_i(x_i)] \quad (54)$$

---

<sup>138</sup> Zumindest steht jedem mit  $s=0$  eine Strategie zur Verfügung, welche mindestens einen vollständigen Schadensausgleich garantiert.

<sup>139</sup> Vgl. Meyerson (1979).

Für ein vorgegebenes  $\mathbf{x}_{-i}$  kann dann  $h(\mathbf{x}|y_i)$  als eine Funktion der  $i$ -ten Variable des Signalvektors, also als eine Funktion von  $y_i$ , betrachtet werden.

Wie erwähnt, ist der Mechanismus so konzipiert, dass die wahrheitsgemäße Präferenzangabe ein Bayes-Nash-Gleichgewicht darstellt. Angenommen die Agenten verhalten sich entsprechend, dann gilt  $\mathbf{y} = \mathbf{x}$ , und die Entscheidungsregel des Papierfabrikanten (des Mechanismus-Designers) kann folgendermaßen interpretiert werden:

- Eine Erweiterung der Fabrikanlagen findet **genau dann** statt, falls

$$h(\mathbf{x}) \leq R \quad (55)$$

- Im Fall der Erweiterung zahle Fischzüchter  $i$  den **maximalen** Betrag  $\tilde{y}_i$ , für den

$$h(\mathbf{x} | \tilde{y}_i) \leq R \quad (56)$$

- Falls das Projekt nicht realisiert wird (die Fabrik nicht erweitert wird), gibt es keinerlei Ausgleichszahlung.

Aus Gleichung (56) ersieht man unmittelbar, dass der maximale Betrag  $\tilde{y}_i$ , den Fischzüchter  $i$  für ein vorgegebenes  $\mathbf{x}_{-i}$  erhalten kann, ohnehin bezahlt wird. Deshalb gibt es keinen Anreiz zur Falschangabe. Bei einem Übertreiben des Schadens scheitert die Erweiterung der Fabrik häufiger, und folglich entstehen dem Fischzüchter Opportunitätskosten (in Form entgangener Kompensationszahlungen). Eine Untertreibung wiederum macht nur dann einen Unterschied, wenn die wahre Angabe zum Scheitern geführt hätte – dann aber reicht die Ausgleichszahlung nicht aus, um den wahren Schaden zu kompensieren.

Für die Simulationsläufe wurde – wie in Abschnitt 6.5.1 – eine Standard-Gleichverteilung herangezogen, um die Betroffenheitswerte zufällig zuzuweisen.

Also gilt entsprechend:  $f_j(\cdot) = 1$  in  $D_j = [0,1]$ ,  $j = 1, \dots, n$ , und  $R = n \cdot r$ .

Aus diesen Annahmen folgt:  $x_i + (F_i(x_i) / f_i(x_i)) = 2x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Entsprechend können die Entscheidungsregeln für den ROB-Mechanismus wie folgt vereinfacht werden:

$$b(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum y_i \leq R/2 \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (57)$$

Im Falle einer Projektrealisierung erfolgen die Ausgleichszahlungen:

$$c_j(\mathbf{y}) = \text{Min} \left\{ 1, R/2 - \sum_{i \neq j} y_i \right\}, \quad j = 1, \dots, n \quad (58)$$

Die Gleichungen (57) und (58) wurden dann benutzt als Grundlage für das in Abbildung 6-9 dargestellte Simulationsergebnis.

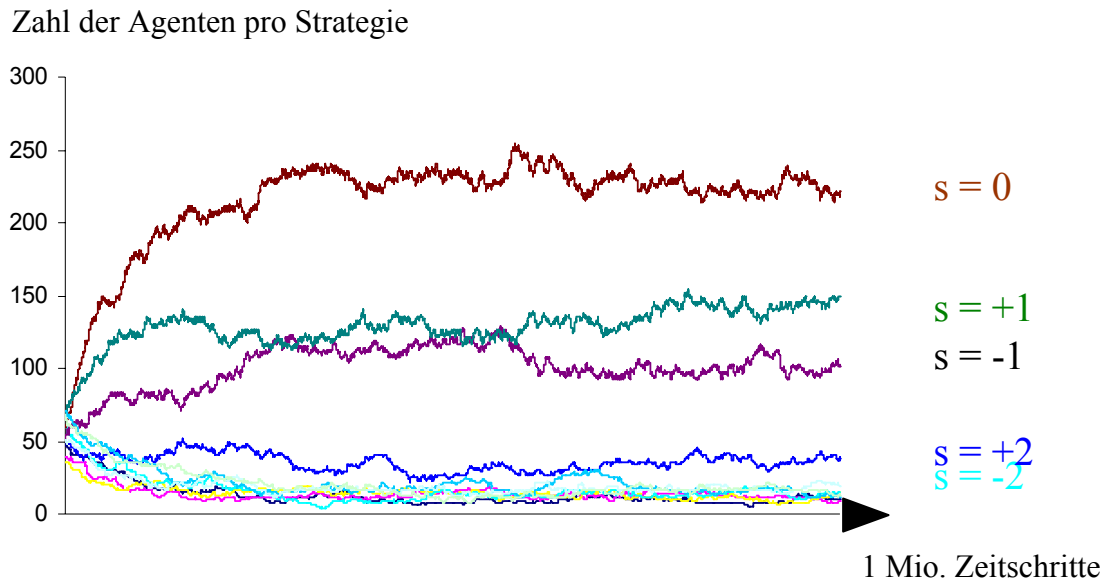


Abbildung 6-9: ROB-Mechanismus: Simulationsergebnis für  $n=6$ ,  $m=5$ ,  $r=0,5$ ,  $k=3000$

Die Ergebnisse für GROVES-Schema (Abbildung 6-8) und ROB-Mechanismus (Abbildung 6-9) weisen eine große Ähnlichkeit auf. Bei beiden Mechanismen ist die wahrheitsgemäße Angabe ( $s = 0$ ) am erfolgreichsten. Die nächstbesten Strategien sind dann jene, bei denen möglichst wenig von  $s = 0$  abgewichen wird. Dieses Verhaltensmuster scheint generell für anreizkompatible Mechanismen typisch zu sein. Darüber hinaus kann der Parameter  $k$  natürlich auch für den ROB-Mechanismus immer weiter erhöht werden, und es bestehen wenig Zweifel, dass schlussendlich erneut die Bedingungen *quasi vollständiger Rationalität* angenähert werden. Das heißt, zu erwarten ist, dass dann ein Verhalten entsprechend der Theorie simuliert wird, bei dem die Agenten lernen exakt das Bayes-Nash-Gleichgewicht spielen.

So ähnlich auch das Verhaltensmuster (also die individuelle Strategiewahl) ist, die Funktionsweise der Mechanismen bei CLARKE-GROVES und ROB ist völlig unterschiedlich. Dies

kann auch gar nicht anders sein, denn an irgendeiner Stelle muss ROB den Preis dafür zahlen, dass sein Mechanismus die IR-Bedingung erfüllt.

Vergleicht man die Gleichungen (46) und (57), so ist zu erwarten, dass dieser Preis in einem drastischen Rückgang der Gesamteffizienz besteht. GROVES Schemata und der ROB-Mechanismus führen nämlich immer dann zu unterschiedlichen Allokationsentscheidungen, falls

$$R/2 \leq \sum y_i \leq R \quad (59)$$

Während also GROVES-Schemata (theoretisch) vollkommen effizient sind, kann dieses beim ROB-Mechanismus nicht der Fall sein. Bei GROVES-Schemata muss man sich um Partizipationsanreize keine Gedanken machen – man kann eine Unterwerfung unter die Mechanismusregeln erzwingen und erst *danach* wird mit Anreizen gearbeitet.

ROB ist anspruchsvoller in Bezug auf die IR-Bedingung und muss seinen Mechanismus deshalb von vornherein so konzipieren, dass *vorab* Anreize zur Partizipation bestehen. Denn es ist die freiwillige Unterstützung sämtlicher Fischzüchter erforderlich. Um deren tatsächlichen Betroffenheitswert in Erfahrung zu bringen, muss ROB einen *Extrapremie* an sie zahlen, weil diese ansonsten ihre (private) *Information strategisch nutzen* würden<sup>140</sup>.

Dieses ist gewissermaßen der *Preis für die Nutzung der ROB-Mechanismus*, oder in anderer Interpretation, dieses sind dessen Transaktionskosten<sup>141</sup>.

Letzten Endes ist es also die Differenz zwischen der *virtuellen* sozialen Verlustfunktion und der *wahren* sozialen Verlustfunktion, welche den Unterschied ausmacht zwischen der First-Best-Lösung und der Second-Best-Lösung.

### 6.5.3 Entwicklung neuer Mechanismen mit Simulationsunterstützung

Im letzten Teil dieses Kapitels wird nun ein eigen entwickelter Mechanismus vorgestellt und dabei gezeigt, wie mit Hilfe des Simulationstools dabei recht schnell weniger brauchbare Ansätze aussortiert werden können.

---

<sup>140</sup> WEIMANN interpretiert dies wie folgt: Der *wahre* soziale Verlust ist die Summe aller Schäden. Der *tatsächliche* soziale Verlust (für ROB „virtual social loss“) umfasst den Schaden, der zusätzlich kompensiert werden muss, damit die Fischzüchter freiwillig auf die strategische Nutzung ihrer Information verzichten (vgl. Weimann (1990), S. 238).

<sup>141</sup> Der Transaktionskostenbegriff wurde ebenfalls von COASE eingeführt und zwar als „*Kosten für die Nutzung des Preismechanismus*“, vgl. Coase (1937).

Ausgangspunkt der Überlegungen ist die sogenannte **VICKREY-Auktion**, welche bekanntermaßen bei der Allokation (rein) *privater Güter* hervorragend funktioniert.

Die Grundidee der VICKREY-Auktion ist bestechend einfach: Wird ein privates Gut versteigert, so gibt jeder Interessent in einem verschlossenen Umschlag ein Angebot ab. Das höchste Gebot bekommt den Zuschlag. Bezahlt werden muss jedoch lediglich der Preis, den der *zweithöchste Bieter* angegeben hat. Es ist leicht nachzuvollziehen, warum diese Auktionsform wahrheitsgemäße Präferenzoffenbarung zur Folge hat. Jede Untertreibung kann nur von Nachteil sein: Bleibt das Angebot das höchste, so verändert sich nichts, und der Zuschlag erfolgt zu denselben Bedingungen wie zuvor. Eventuell fällt die Untertreibung aber so stark aus, dass das Gut an jemand anderen geht – zu einem Preis, den man gerne selbst bezahlt hätte. Auch Übertreibung kann höchstens von Nachteil sein, nämlich dann, wenn das zweithöchste Angebot über der eigenen Zahlungsbereitschaft liegt.

Nun soll die Grundidee der VICKREY-Auktion auf das Fischzüchterbeispiel übertragen werden, also auf die Situation mit einem (rein) *öffentlichen Gut*.

Zunächst werden – innerhalb des Mechanismus-Objektes – die Indizes der Agenten neu geordnet, und zwar so, dass die Agenten einer Entscheidungssituation aufsteigend angeordnet sind mit Bezug auf den *berichteten Betroffenheitswert*. An dieser Stelle hat sich die allgemeine agentenbasierte Konzeption ausgezahlt, die in Abschnitt 4.2 erwähnten *Raumkonzepte* werden nämlich hierfür eingesetzt.

Im nächsten Schritt werden folgende Vektoren eingeführt. Diese werden innerhalb des Simulationstools auch genau so berechnet:

$$\mathbf{y}^* \equiv (y_1^*, \dots, y_n^*) \quad (60)$$

$$\mathbf{z}^* \equiv (z_1^*, \dots, z_n^*) \equiv (0, y_1^*, \dots, y_{n-1}^*) \quad (61)$$

Würde es sich bei den  $y_i^*$  um die Bewertungen eines privaten Gutes handeln, so würde die VICKREY-Auktion das zu versteigernde Gut der Person zuweisen, welche die höchste Bewertung  $y_n^*$  angegeben hat, und bezahlt werden müsste  $y_{n-1}^*$ . Private Güter sind – wie erwähnt – gekennzeichnet durch *Rivalität im Konsum*. Alle anderen Personen sind also von der Nutzung des Gutes ausgeschlossen, und dies ist auch in Ordnung so, denn auf der anderen Seite zahlt ja auch nur eine Person.



Nun geht es beim Fischzüchterbeispiel aber um ein (rein) öffentliches Gut. Niemand kann von der Nutzung des sauberen Wassers ausgeschlossen werden. Deshalb ist es durchaus angemessen, all diejenigen zur Finanzierung der Kläranlage heranzuziehen, die von dieser einen (wenn auch noch so geringen) Vorteil haben. Entwickelt man die VICKREY-Auktion logisch weiter, so würde erneut vom höchsten Bieter die Zahlung von  $y_{n-1}^*$  eingefordert – der zweithöchste Bietbetrag. Dem Fischzüchter mit der zweithöchsten Bewertung würde man den Betrag von  $y_{n-2}^*$  abverlangen, was dem dritthöchsten Bietbetrag entspricht. Die Person mit der dritthöchsten Bewertung zahlt den vierthöchsten Bietbetrag  $y_{n-3}^*$  und so weiter. Nur von dem Fischzüchter mit der geringsten (angegeben) Bewertung wird gar keine Bezahlung erwartet.

Nach genau diesem Prinzip wurde der Vektor  $\mathbf{z}^*$  zusammengesetzt.

### **Erster Ansatz: Ein modifiziertes proportionales Beitragsschema (mPBS)**

Eine unmittelbare Umsetzung des Ansatzes besteht darin, ganz einfach das proportionale Beitragsschema aus Abschnitt 6.4 auf den Vektor  $\mathbf{z}^*$  statt auf den Vektor  $\mathbf{y}$  anzuwenden:

$$b(\mathbf{y}^*) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum z_i > n \cdot r \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (62)$$

Im Falle einer Projektrealisierung erfolgen die Ausgleichszahlungen:

$$c_j(\mathbf{y}^*) = n \cdot r \cdot \left( z_j / \sum_{i=1}^n z_i \right), \quad j = 1, \dots, n \quad (63)$$

**In Worten:** Wenn die Summe über den eben zusammengesetzten Vektor  $\mathbf{z}^*$  gerade ausreicht, um die Kläranlage zu finanzieren, so zahlt jeder Fischzüchter genau jenen Betrag, der als logische Weiterentwicklung der VICKREY-Auktion interpretiert werden kann.

Übersteigt die entsprechende Summe den notwendigen Gesamtbetrag, so reduzieren sich sämtliche Zahlungen proportional entsprechend Gleichung (63) – noch besser für die Fischzüchter –, und das Budget ist dennoch ausgeglichen.

Die Simulationsergebnisse für diese erste Eigenentwicklung eines alternativen Mechanismus sind vom Gesichtspunkt der Effizienz als eher mittelmäßig einzustufen<sup>142</sup>. Der Vorteil war aber, dass dieses mit Hilfe des Simulationstools sehr schnell festgestellt werden konnte.

Genau hierin sollte der praktische Wert des agentenbasierten Ansatzes gesehen werden. Im Falle des Mechanismus-Designs wird folgendes Vorgehen ermöglicht:

- Austesten einer ersten Idee,
- im Fall des Misserfolgs zunächst das Scheitern plausibel machen,
- nach Möglichkeit theoretische Defizite herausarbeiten,
- die ursprüngliche Idee verbessern.

Um das Scheitern dieses ersten Ansatzes plausibel zu machen, genügt eine kurze verbale Beschreibung der beobachteten Effekte:

Bei den Simulationsläufen konnte eine klare **Tendenz zu Untertreibungsstrategien** festgestellt werden – und eigentlich wurde dies auch nicht anders erwartet.

Im Vergleich zum Fall des (naiven) proportionalen Beitragsschemas wird jedoch der Erfolg geringer Untertreibung etwas relativiert. Die entsprechenden Strategien ( $s = -1$ ) und ( $s = -2$ ) hatten in Abschnitt 6.4 den größten Erfolg, und falls  $k$  hoch genug gesetzt wurde, verdrängten sie die Strategie  $s = 0$  vollständig.

Dass es also erneut häufig zu Untertreibungen kam, verwundert nicht. Es bleibt jedoch noch nachzuvollziehen, was nun den Erfolg von  $s = -1$  relativiert:

Angenommen Fischzüchter  $i$  bekommt den Index  $j^*$  zugewiesen, die Übertreibung betrage  $\delta$  und sei hinreichend klein ( $\delta < x_i - z_j^*$ ):

Ist die Übertreibung derart gering ( $y_i \in (z_j^*, x_i)$ ), so hat der Fischzüchter keinerlei Vorteil von der Untertreibung – d. h.  $s = 0$  hat in all diesen Fällen dieselbe Performance wie  $s = -1$  und wird nicht so leicht aus der Population verdrängt. Falls aber andererseits die Übertreibung hinreichend stark ausgefallen ist ( $\delta \geq x_i - z_j^*$ ), schafft es der Agent, einen *günstigeren Index* für den Vektor  $\mathbf{z}^*$  zu bekommen. Betrachtet man die Klasse all der Fälle, in denen es nicht

---

<sup>142</sup> Daher lohnt es sich kaum, an dieser Stelle einzelne Simulationsläufe detailliert zu betrachten.

entscheidend ist, ob  $s = 0$  oder  $s = -1$  gewählt wurde, so ist beim originalen nPBS die wahre Nutzenangabe ( $s = 0$ ) *immer* im Nachteil gegenüber  $s = -1$ , beim mPBS aber nur *manchmal*.

LEKTION: Die Motivation zum Untertreiben ist nicht so direkt und unmittelbar gegeben. Es ist nämlich häufig kein direkter Einfluss auf den eigenen Zahlbetrag möglich, sondern nur indirekt, falls das **Anstreben einer günstigeren Position  $j^*$**  zum Erfolg geführt hat.

Die geringfügige Verbesserung – was die Durchsetzungskraft von  $s = 0$  betrifft – hat jedoch keine nennenswerte Steigerung der Gesamteffizienz zur Folge. Auch dieses Ergebnis ist theoretisch leicht zu erklären. Man vergleiche dazu nur die Differenz von  $\sum y_i$  und  $\sum z_i$ .

Mit dem neuen Ansatz wird also ausgerechnet die höchste Nutzenangabe  $y_n^*$  vollständig ignoriert, wenn es um die kollektive Entscheidung der Projektrealisierung geht.

Nun sollte man meinen, bei einer großen Zahl von Beteiligten falle der Verzicht auf lediglich eine *einzig*e Kompensationszahlung weniger ins Gewicht. In der Tat ist es gravierend, wenn im Falle von  $n = 3$  gerade mal die beiden niedrigsten Nutzenangaben Berücksichtigung finden. Bei  $n = 24$  berücksichtigt man dagegen 23 Angaben (also fast alle), und der Verzicht auf die 24. Nutzenangabe kann eher weggesteckt werden.

Ein gedanklicher Kurzschluss wäre es jedoch zu folgern, dass der Mechanismus bei sehr hohen Werten von  $n$  das Potential für eine signifikante Verbesserung haben könnte.

Man betrachte dazu theoretisch den Grenzfall  $n \rightarrow \infty$ :

Man überlegt sich leicht, dass  $\lim_{n \rightarrow \infty} (y_n^* / \sum_{i=1}^n z_i) = 0$ .

Der Verzicht auf  $y_n^*$  spielt also in der Tat keine Rolle.

Andererseits gilt  $\lim_{n \rightarrow \infty} (z_i) = y_i, \quad \forall i = 1, \dots, n$ .

D.h. der Abstand zwischen jeder Nutzenangabe und der jeweils nächst niedrigen Nutzenangabe wird beliebig klein – letztlich wird somit schlicht das nPBS approximiert.

Zusammenfassend ist also mit diesem ersten Versuch nicht viel erreicht worden: Bei sehr hohen  $n$  irrelevant, bei sehr geringen  $n$  schädlich, und lediglich im Bereich mittlerer Gruppengrößen eine mäßige Steigerung der Effizienz – und dies auch nur im Vergleich zum nPBS.

Indem die theoretischen Nachteile herausgearbeitet werden konnten, wurde zugleich die Grundlage dafür geschaffen, den nächsten Versuch einer Eigenentwicklung vielversprechender zu gestalten.

### **Zweiter Versuch: Kombination mit einem Lotteriemechanismus**

Die erste Lektion aufgrund der bisherigen Überlegungen: Es sollte vermieden werden, die höchste Nutzenangabe unberücksichtigt zu lassen. Also soll  $\mathbf{y}^*$  und nicht  $\mathbf{z}^*$  als Grundlage für die Kollektiventscheidung herangezogen werden!

Um die Individualanreize aufrechtzuerhalten, ist es aber sinnvoll zu garantieren, dass (im Allgemeinen) die Agenten höchstens entsprechend dem Prinzip der VICKREY-Auktion (also entsprechend  $\mathbf{z}^*$ ) belastet werden.

Im ersten Ansatz gab es einen Zusatzanreiz, falls die Summe über  $\mathbf{z}^*$  das erforderliche Finanzierungs-Budget überschritt. Alle eingeforderten Beitragszahlungen wurden dann proportional verringert. Hierauf wird nun verzichtet. Statt dessen kann man dann einen Zusatzanreiz in anderer Form – und viel wirkungsvoller – einführen. Dieser Zusatzanreiz wird nun voll und ganz auf einen Agenten konzentriert, der im Folgenden als **Budget-Ausgleicher** bezeichnet wird.

Der Budget-Ausgleicher wird aus folgendem Grund benötigt:

Für die Kollektiventscheidung ist die Summe über  $\mathbf{y}^*$  ausschlaggebend. Auf individueller Ebene haben aber zunächst (fast!) alle Zahlungen entsprechend  $\mathbf{z}^*$  zu leisten. Offensichtlich ist dann in keiner Weise garantiert, dass das Projekt tatsächlich finanziert ist, wenn  $\sum y_i > C$ , denn es könnte ja sein, dass  $\sum z_i < C$ . Andererseits könnte das Projekt auch überfinanziert sein – nämlich dann wenn  $\sum z_i > C$ .

Im Allgemeinen wäre es also kompletter Zufall, wenn durch die (vorläufigen) Zahlungen exakt ein ausgeglichenes Budget entstünde ( $\sum z_i = C$ ). Fast immer ist also eine Korrektur vorzunehmen, um zum endgültigen Zahlungsschema zu gelangen. Statt die Budgetabweichung aber gleichmäßig auf alle Agenten zu verteilen (und wie beim nPBS eine negative Abweichung erst gar nicht zuzulassen), wird im nun empfohlenen Mechanismus eine **Lotterie** benutzt, mit der ein einzelner Agent dazu bestimmt wird, sämtliche Abweichungen zu tragen. Insbesondere bei einer hohen Anzahl  $n$  tritt dabei eine **anreizverstärkende Hebelwirkung** ein.

Der vorgeschlagene Mechanismus sieht dann formal wie folgt aus:

$$b(\mathbf{y}^*) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \sum y_i > n \cdot r \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (64)$$

In Fall einer Projektrealisierung werden zunächst *vorläufige Ausgleichszahlungen* berechnet:

$$\tilde{c}_j(\mathbf{y}^*) = z_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (65)$$

Anschließend bestimmt man den *Budget-Ausgleicher*:

$$l = g(\mathbf{y}^*), \quad l \in \{1, \dots, n\} \quad (66)$$

Letztlich werden die *endgültigen Ausgleichszahlungen* bestimmt:

$$c_j(\cdot) = \begin{cases} \tilde{c}_j(\cdot), & j = 1, \dots, l-1, l+1, \dots, n \\ n \cdot r - \sum_{i \neq j} \tilde{c}_i(\cdot), & j = l \end{cases} \quad (67)$$

Da zwei Fälle denkbar sind – die Lotterie kann buchstäblich ein Gewinn sein oder aber auch ein Verlustgeschäft –, wird ein wohlüberlegtes Design der Lotterie vorgeschlagen, das in beiden Fällen die passenden Anreize liefert. Zunächst wird das Mechanismus-Objekt bestimmen, ob der Ausgleich des Budgets ein Gewinn- oder ein Verlustgeschäft ist. Im positiven Fall werden systematisch die Chancen der Agenten mit hohen Angaben erhöht – dies soll wahrheitsgemäße Angaben belohnen. Im Falle des Verlustgeschäfts erhöht man die Chancen für den „*Lotteriegewinn*“ der potentiellen Untertreiber, um entsprechendes Verhalten zu bestrafen.

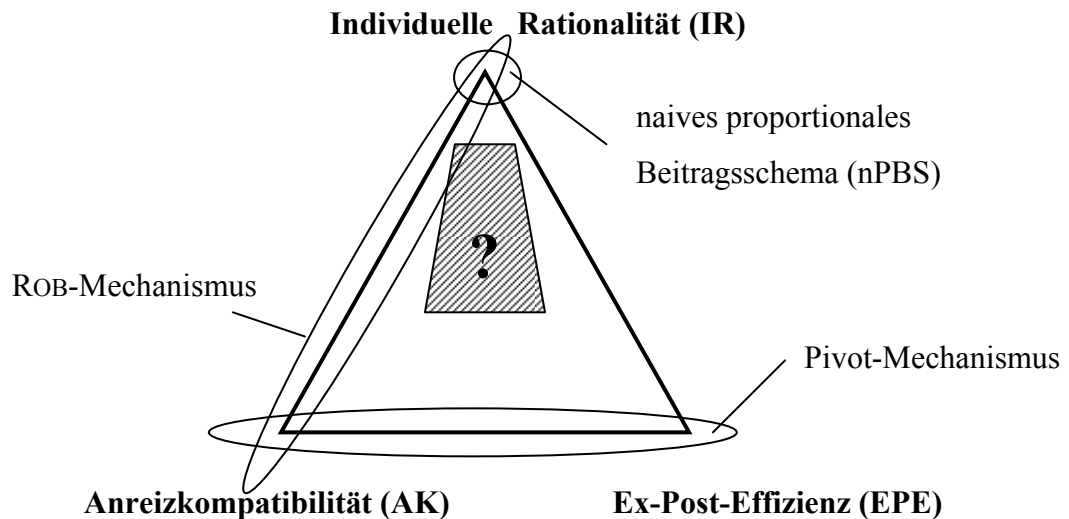
Dieser Mechanismus ist weder anreizkompatibel noch effizient noch individuell rational. Dennoch kann man für einen zweiten Versuch einigermaßen zufrieden sein – es handelt sich nämlich *fast* um einen individuell rationalen Mechanismus. Wie erwähnt bewegt man sich ohnehin unvermeidlich in einem Spannungsdreieck zwischen den drei wünschenswerten Anforderungen (vgl. Abbildung 6-10).

Der hier vorgeschlagene Mechanismus mag aus theoretischer Sicht unbefriedigend sein. Allerdings ist die Kombination mit einem Lotteriemechanismus durchaus interessant<sup>143</sup>, und es mag andere Kombinationsformen für die Lotterie geben, mit denen viel mehr in Bezug auf Anreizkompatibilität erreicht wird. Auf der anderen Seite gibt es theoretisch vollständig

---

<sup>143</sup> Vgl. das Einleitungszitat zu diesem Kapitel von LEDYARD, sowie Ledyard und Palfrey (1994).

befriedigende Mechanismen, die sich in der Praxis nicht bewähren, weil sie offensichtlich “zu viel“ Rationalität bei den Beteiligten voraussetzen.



**Abbildung 6-10: Spannungsdreieck des Mechanismus-Design:** Wünschenswert wäre es, wenn das Dreieck vollständig abgedeckt werden könnte. Der Pivot-Mechanismus deckt nur AK und EPE ab. Der Rob-Mechanismus wiederum erfüllt nur AK und IR. Das nPBS sowie mögliche Modifikationen sind völlig inakzeptabel. Die interessante Frage ist, ob ein Mechanismus entwickelt werden kann, der in etwa die schraffierte Fläche abdeckt **und** diese Eigenschaft auch unter den Bedingungen begrenzter Rationalität nicht verliert.

In diesem Zusammenhang sei nochmals auf die Experimente zum Pivot-Mechanismus verwiesen. Nun ist die Durchführung solcher Experimente aber kostspielig und zeitaufwendig. Deshalb wird es nicht machbar sein, jede theoretische Neuentwicklung von Mechanismen experimentell zu prüfen. Mit Hilfe der Simulation ließe sich schon vorab einiges testen, wobei das in dieser Arbeit vorgestellte Simulationstool insbesondere den Aspekt begrenzter Rationalität einbeziehen würde. Wie bereits erwähnt, sind sämtliche für einen Mechanismus spezifischen Berechnungsvorgänge in einem Mechanismus-Objekt isoliert worden. Im Grunde müssten deshalb lediglich zwei Code-Fragmente zur Verfügung gestellt werden, welche  $b(\mathbf{y})$ , die binäre Entscheidung über die Projektrealisierung, sowie  $c(\mathbf{y})$ , den Vektor der Ausgleichszahlungen, berechnen. Mittels Zeigerverweis auf das neue Mechanismus-Objekt könnten unmittelbar Simulationsuntersuchungen für die Neuentwicklung gestartet werden. Auf diese Weise kann ein effektives Zusammenwirken von Theorie, Experiment und Simulation erreicht werden.

## 7 Zusammenfassende Schlussbetrachtung

### 7.1 Generelle Bedeutung der richtigen Bewertung von öffentlichen Gütern

Das Anwendungskapitel mit den Fischzüchtern steht exemplarisch für *eine ganze Klasse ähnlich gelagerter Probleme*. Zur Erinnerung: Beim ursprünglichen Modell von ROB ging es nicht um eine Kläranlage, sondern ganz allgemein um ein privates Projekt, das bei betroffenen Anliegern externe Schäden in unbekannter Höhe verursachte. Um die generelle Relevanz der Problematik zu unterstreichen, genügt bereits die willkürliche Auflistung einiger Beispiele.

Alleine im Monat August 2006 fanden sich in der überregionalen Presse folgende Artikel:

- Landkreis Waldshut seit 20 Jahren im Streit mit der Schweiz wegen Flugaufkommen des Flughafens Zürich<sup>144</sup>.
- Die Türkei will einen Staudamm am Tigris bauen, um Südostanatolien zu entwickeln. Der antike Ort Hasankeyf wird dann untergehen (nach Einschätzung vieler ein einzigartiges Naturdenkmal)<sup>145</sup>.

Es lassen sich sicher noch unzählige weitere Fragestellungen nennen, bei denen es eine Rolle spielt, dass die Bewertung öffentlicher Güter nicht bekannt ist. Die folgende Auflistung sollte aber genügen<sup>146</sup>:

- Soll die einheimische Landwirtschaft weiter subventioniert werden, da sie zugleich für die Erstellung des öffentlichen Gutes *Kulturlandschaft* sorgt – falls ja, in welchem Ausmaß?
- Wie viel ist der Erhalt eines Naturschutzparks wert?
- Wie soll kollektiv entschieden werden, falls die Trassenführung eines Verkehrsprojekts den Bestand einer seltenen Tierart bedroht?

---

<sup>144</sup> Quelle: Titelzeile aus FAZ 12.8.2006, S. 1. Der Zusammenhang mit dem Coase-Theorem ist naheliegend. Soll der Flughafenbetreiber das Recht haben, die anliegenden Einwohner zu schädigen, oder erlaubt man umgekehrt die Beeinträchtigung des Flugverkehrs durch Schutz der Anwohner?

<sup>145</sup> Quelle: DER SPIEGEL 32 (7.8. 2006) S. 94f.

<sup>146</sup> Vgl. Weimann (2006) auch für weitere Beispiele.

## Zusammenfassende Schlussbetrachtung

Zum Abschluss noch ein Beispiel, das zeigt, dass auch ernstere Konsequenzen auftreten können:

Die ZDF-Sendung *Länderspiegel*<sup>147</sup> behandelte in einem Beitrag die Problematik des Lärmschutzes an der Bundesstrasse B42.

Dort wurde im „*Interesse der Anwohner*“ ein Lärmschutzwall gebaut – allerdings ungefragt auf Kosten der Anwohner. Jeder Grundstücksbesitzer, dessen Lärmbelastung um mehr als drei Dezibel sank, wurde behördlich gezwungen, sich in Abhängigkeit seiner Grundstücksgröße an den Kosten zu beteiligen.

Der in Abschnitt 3.1.2 als abstrakter Begriff eingeführte *wohlwollende Diktator* hat hier wahrlich konkrete Gestalt angenommen. Der *Länderspiegel* gab den *Betroffenen*, die sich plötzlich unfreiwillig auf Seiten der (finanziell) *Beteiligten* wiederfanden, Gelegenheit, ihren Unmut zu äußern. Man kann sich leicht vorstellen, dass kein Grundstücksbesitzer die genannte Regelung akzeptabel fand. Durchgängig stellte sich jeder auf den Standpunkt, dass wegen ihm der Lärmschutzwall gar nicht nötig gewesen sei.

Nach den Erfahrungen mit den Fischzüchtern, welche am liebsten ohne Eigenbeteiligung von der Kläranlage profitieren würden, ist eine andere Argumentationsweise auch gar nicht zu erwarten. Solange die Betroffenen eine Chance sehen, ohne Beteiligung in den Genuss des öffentlichen Gutes zu kommen, werden sie ihren Nutzen untertreiben. Die Gelegenheit, eine überregionale Fernsehsendung als Plattform zu benutzen, kommt dann gerade recht, um eine Korrektur der „*ungerechten Regelung*“ einzufordern und den eigenen Zahlbetrag zu verringern.

Um zu rationalen Kollektiventscheidungen in den genannten Fällen zu kommen, müssen also fundierte Bewertungen der öffentlichen Güter zugrunde gelegt werden. WEIMANN begrüßt, dass „*sich in den letzten Jahren diese Einsicht durchgesetzt hat*“. Ein Beleg dafür, dass die Bedeutung der Problematik erkannt wurde, ist die zunehmende Zahl von Studien, die unter dem Stichwort „*Contingent Valuation*“ (CV) firmieren<sup>148</sup>. WEIMANN kritisiert allerdings auch, dass die Gefahr *strategisch motivierten Verhaltens* in diesem Kontext nach wie vor unterschätzt wird<sup>149</sup>.

---

<sup>147</sup> Quelle: *Länderspiegel* vom 28.3.1998 (ZDF).

<sup>148</sup> Vgl. Weimann (2006), S. 163f. Bereits zur Mitte der 1990er Jahre wurden nach WEIMANN mehr als 1600 CV-Studien gezählt.

<sup>149</sup> Vgl. Weimann (2006), S. 164 dort insbesondere Fußnote 81.



## 7.2 Beitrag der Arbeit zur Analyse strategisch motivierten Verhaltens

*Welcher Beitrag konnte nun im Rahmen dieser Arbeit geleistet werden?*

Zunächst ist es gelungen ein Simulationstool zu entwickeln, mit dem einfachere Spielstrukturen grundsätzlich<sup>150</sup> untersucht werden können. Dazu sind im Wesentlichen lediglich zwei Dinge erforderlich, wie dies im 5. Kapitel am Beispiel des Inspektionsspiels demonstriert wurde:

- Die Spielstruktur ist (am bequemsten in GAMBIT) zu definieren,
- und das Adaptionungsverfahren muss implementiert sein.

Im Anschluss daran kann bereits mit den Simulationen begonnen werden, wobei typischerweise noch die iterative Anpassung einiger Simulationsparameter stattzufinden hat<sup>151</sup>. Beim Anwendungsfall des Inspektionsspiels konnte auf diese Weise mehr erreicht werden als mit einer traditionellen statischen Betrachtung, die sich am Konzept des Gleichgewichts orientiert. Eine konventionelle spieltheoretische Analyse prognostiziert ein gemischtes Nash-Gleichgewicht, gibt jedoch keine Hinweise darauf, *wie* dieses von den Akteuren erreicht wird. Die dynamische Betrachtungsweise widerlegt dieses Ergebnis nicht, sondern präzisiert es in geeigneter Weise. Das gemischte Nash-Gleichgewicht spielt nach wie vor eine Rolle: aber nicht als zu erwartender Endpunkt des Verhaltens, sondern es wird zum Referenzpunkt von ggfs. dramatischen Schwankungen. Dies bedeutet, dass die Umweltverschmutzung phasenweise erheblich von dem ursprünglich angenommenen Wert abweichen wird – an sich schon ein wichtiges Ergebnis. Nachfolgend wurden eine Reihe analytischer Nachbetrachtungen angestellt, um die Simulationsergebnisse zu validieren. Es konnte gezeigt werden, dass das in Kapitel 5 verwendete Imitationslernen bei Annahme geeigneter Parameter geradewegs zur Replikatorgleichung führt. Diese wurde im 2. Kapitel als eines der Hauptkonzepte aus der evolutionären Spieltheorie eingeführt. Bei der Ergebnisdiskussion konnten auch weitere Gesichtspunkte erneut aufgegriffen werden, die im Grundlagenkapitel zur Spieltheorie bereits angesprochen wurden. Insbesondere konnten die Bemerkungen zu den Vorzügen einer dynamischen (oder evolutionären) Analyse bestätigt werden. So zeigte sich etwa, wie die evolutionäre Spieltheorie einen intuitiven Zugang

---

<sup>150</sup> Dieses ist völlig unabhängig davon, ob eine umweltrelevante Problemstellung adressiert wird oder nicht. Jede, einfach zu modellierende, Form einer strategischen Interaktion kommt in Frage.

<sup>151</sup> Dieses betrifft etwa die Populationsgrößen, die Adaptionrate oder die gewünschte Simulationszeit.

zum Konzept der gemischten Strategien erlaubt, und die Beziehung zwischen Replikatorgleichung und den bekannten Lotka-Volterra-Gleichungen ist eine unmittelbare Folge der Denkweise in Populationsanteilen<sup>152</sup>.

Bei der allgemeinen Beschreibung umweltökonomischer Probleme in Kapitel 3 wurde jedoch deutlich, dass oft eine Vielzahl von Akteuren zu berücksichtigen ist, wenn die effiziente Bereitstellung öffentlicher Güter erreicht werden soll. Solche komplexeren Spielstrukturen mit GAMBIT oder gar manuell anzulegen, wäre unhandlich und fehleranfällig.

Deshalb wurden im 4. Kapitel eine Reihe konzeptioneller Überlegungen angestellt, die darauf hinauslaufen, das spieltheoretische Modell in ein **Zustandsmodell** zu übersetzen. Wenn schon ein Interesse an der Problematik öffentlicher Güter besteht, so ist es naheliegend diese in den Mittelpunkt des Modells zu stellen und dort Zustandsinformationen abzulegen. Die Güter werden von einem "Geflecht" der strategisch motivierten Interaktion umgeben, und durch Relationen der **Beteiligung** sowie der **Betroffenheit** wird definiert, welche Akteure wie auf die Zustände einwirken, und wie die Akteure von den Zuständen der öffentlichen Güter betroffen sind (etwa Fischzüchter von der Wasserqualität in einem See).

Beim zweiten Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 wurde diese Konzeption zum Einsatz gebracht. Ausgangspunkt war eine (variabel betrachtete) Anzahl von Fischzüchtern, welche durch die Tätigkeit eines Papierfabrikanten beeinträchtigt werden. Die Problematik steht in engen Zusammenhang zum Coase-Theorem und zum Mechanismus Design. Im Anschluss wurde gezeigt, wie das entwickelte Tool zur Mechanismus-Simulation eingesetzt kann.

Ganz spezifisch wurde dem Fabrikbesitzer die Rolle des Mechanismus-Designers zugewiesen. Zweierlei ist auf diese Weise erreicht worden: Zum einen entspricht die resultierende Problemstellung dann einem Modell von ROB<sup>153</sup>, womit eine theoretische Vergleichsbasis geschaffen wurde. Zum anderen wurde der Papierfabrikant gewissermaßen aus dem Spiel katapultiert, und somit wird schon einmal dem Grundproblem entgegengewirkt, dass der Kreis der Betroffenen mit dem Kreis der Beteiligten nicht übereinstimmt.

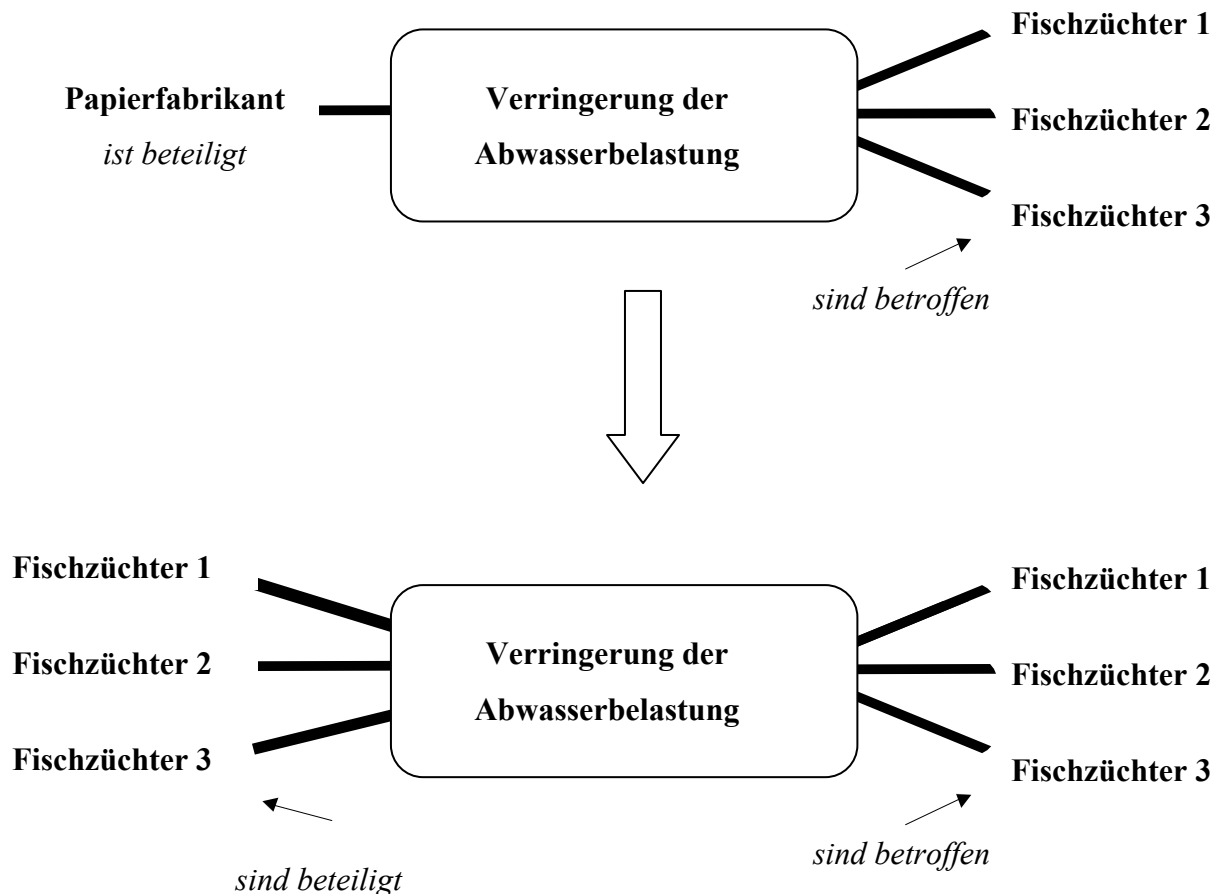
Abbildung 7-1 veranschaulicht diesen Transformationsvorgang. Sobald der Papierfabrikant den Mechanismus festgelegt hat, ist er selbst *außen vor*, und für die Fischzüchter wiederum sind die

---

<sup>152</sup> Vgl. Hofbauer und Sigmund (1984), S. 189 sowie Helbing (1993), S. 186ff. Dort wird allgemein der Bezug zu den Boltzmann-artigen Gleichungen hergestellt.

<sup>153</sup> Vgl. Rob (1998).

Regeln des Spiels eindeutig definiert. Auf diese Weise kann die Problematik, wenn auch nicht vollständig gelöst, so doch einer möglichen Lösung nähergebracht werden.



**Abbildung 7-1: Umwandlung der Spielstruktur durch Mechanismus-Design:** der obere Teil der Abbildung entspricht gerade Abbildung 4-1, mit deren Hilfe das Konzept der Beteiligungs- bzw. Betroffenheitsrelation eingeführt wurde.

Die Fischzüchter haben es nun selbst in der Hand, sich angemessen an der Finanzierung einer Kläranlage zu beteiligen – dazu müssten sie nur ihre Präferenzen korrekt angeben. Mit Hilfe des Simulationstools konnte untersucht werden, ob ihnen dieses gelingt oder ob es zur ineffizienten Untertreibung kommt. Des Weiteren konnte geprüft werden, welches Verhalten anreizkompatible Mechanismen induzieren, falls *begrenzt rationale* Akteure explizit einbezogen werden. Zu diesem Zweck wurde die Sampling-Dynamik als Adaptionverfahren implementiert.

### 7.3 Typische Fallstricke bei strategischer Interdependenz

Im Folgenden wird das Beispiel aus Kapitel 6 leicht modifiziert. Es wird nun angenommen, dass die *Fischzüchter* nicht an einem See, sondern *an einem Fluss* angesiedelt sind.

#### Ein Gedanke – zwei Experimente

In diesem Abschnitt werden keine weiteren Simulationsexperimente vorgenommen, sondern zwei Gedankenexperimente. Zuerst wird versucht, aus dem neuen Szenario (Anlieger am Fluss) *zusätzliche Information* für das Mechanismus-Design herauszuziehen. Beim zweiten Gedankenexperiment wird eine *Zusatzoption* ins Spiel gebracht.

#### 7.3.1 Fragwürdige Nützlichkeit zusätzlicher Information

Es ist plausibel anzunehmen, dass mit zunehmender Entfernung von der Einleitungsstelle des Abwassers die Schadstoffkonzentration abnimmt. Ordnet man die Fischzüchter aufsteigend nach ihrer räumlichen Entfernung von der Papierfabrik, so ist es also relativ wahrscheinlich, dass die tatsächliche Schädigung von Fischzüchter  $j$  geringer ausfällt als die tatsächliche Schädigung von  $j+1$ . Nun könnte doch der Mechanismus-Designer versucht sein, diesen Sachverhalt in seine Vorgehensweise einzubeziehen.

Man rekapituliere die bittere Hauptlektion, die aus dem Scheitern des ersten Versuchs in Abschnitt 6.5.3 gelernt werden musste: Die Fischzüchter werden untertreiben, obwohl sich ihre Zahlung nicht *unmittelbar* an der eigenen Nutzenangabe bemisst. Es bestand nämlich ein *indirekter Anreiz* zum Untertreiben, weil so ein *günstiger Index  $j^*$*  angestrebt wird. Dieser Anreiz kann vollständig beseitigt werden, indem der Mechanismus-Designer ankündigt, dass die Reihenfolge durch die räumliche Anordnung der Fischzüchter am Fluss bereits unwiderruflich vorgegeben ist. Entsprechend könnte ein proportionales Kompensationsschema, entsprechend Gleichung (63) angewendet, diesmal doch zum Erfolg führen – oder nicht?

Ein etwas tieferes Nachdenken führt dazu, dass statt dessen Anreize viel schlimmerer Art erzeugt werden dürften. Fischzüchter  $j$  beeinflusst zwar nicht seine eigene Zahlung, aber unmittelbar die von Fischzüchter  $j+1$ . Dieses ist auch ein *externer* Effekt. Sobald die Fischzüchter das Schema durchschauen, werden sie in Verhandlungen eintreten und ihre Angaben zu Lasten der Funktionsweise des angestrebten Mechanismus eben doch verzerren. Um dieses theoretisch

abzubilden, bedürfte es eines Modells mit Seitenzahlungen. An dieser Stelle wird das Gedankenexperiment abgebrochen. Es sollte nur gezeigt werden, dass immer sorgfältig geprüft werden muss, ob tatsächlich *alle* strategischen Optionen der Beteiligten adäquat erfasst worden sind. Falls nicht, so helfen auch agentenbasierte Testumgebungen nicht weiter.

### 7.3.2 Potentielle Schädlichkeit zusätzlicher Handlungsoptionen

Beim zweiten Gedankenexperiment wird angenommen, dass die Fischzüchter eine zusätzliche technische Option zur Verfügung haben, falls die Finanzierung einer Kläranlage scheitert. Der erste Fischzüchter, der ja der Papierfabrik am nächsten ist, könnte mit einer Pipeline die Schadstoffe am eigenen Platz vorbeileiten. Falls sich der erste für diese Option entscheidet, kann der zweite Fischzüchter die Pipeline auf seine Kosten weiter verlängern, usw.

Diese möglichen Erweiterungen können im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlich behandelt werden – ein weiteres Kapitel wäre dazu erforderlich. Eine traditionelle spieltheoretische Analyse zeigt jedoch bereits, dass sehr einfache Beispiele konstruiert werden können, bei denen sich sämtliche Fischzüchter sukzessive für eine Verlängerung dieser Pipeline entscheiden – selbst dann, wenn sich letztlich herausstellen sollte, dass die Gesamtkosten der Pipeline die Kosten einer Kläranlage bei weitem übersteigen.

**Schlimmer noch:** Mit etwas mehr Mühe konnte sogar ein Fall konstruiert werden, bei dem die Pipeline-Lösung (gesamtwirtschaftlich) noch teurer wird, als wenn gar nichts unternommen worden wäre! Der Nachweis wird durch ein Beispiel im Anhang geliefert.

Der bloße Sachverhalt, dass so etwas denkbar ist, zeigt nochmals mit aller Deutlichkeit:

*Bei interdependenten Entscheidungssituationen führt die Einführung zusätzlicher Handlungsoptionen eben nicht zwangsläufig zu besseren Lösungen!*

Im Gesamtzusammenhang dieser Arbeit kann dieser Befund eigentlich nicht überraschen. Bereits bei dem Wohngemeinschaftsdilemma lag diese Problematik vor. Ebenso wie dort die zusätzliche Option (Geschirr in die Spüle stellen und abwarten) das Problem lediglich verschoben hat (irgendwann ist die Großspülaktion doch fällig), führt die zusätzliche Pipeline-Option im letzten Beispiel nur zu einer Problemverschiebung. Die resultierenden Kosten waren in beiden Fällen erheblich höher, als wenn man sich schon zu Beginn dem Problem gestellt hätte.

## 7.4 Resümee

Eine wichtige Besonderheit interdependenter Entscheidungssituationen sind die *constraintuitiven* Konsequenzen, die sich bei erweiterten Handlungsoptionen ergeben können. Ingenieure sehen sich gerne als diejenigen, welche die Handlungsspielräume der Menschen ausdehnen durch neue Verfahren, leistungsfähigere Maschinen, etc. Auf solche Leistungen kann auch – gerade mit dem Blick auf Umweltprobleme – in Zukunft sicher nicht verzichtet werden. Man denke nur an neue Energieträger, Entwicklungen wie die Brennstoffzelle und vieles mehr.

Andererseits macht jede zusätzliche Handlungsoption Entscheidungssituationen komplexer. Im Falle eines einzelnen Entscheidungsträgers bleibt dies noch relativ unproblematisch. Es muss zwar eine weitere Alternative bewertet werden, aber im Falle der Verschlechterung verzichtet man eben auf die Zusatzoption. Bei interdependenten Entscheidungssituationen wird es schwieriger, insbesondere wenn die Zusatzoption eine (auf den ersten Blick) billige Problemverschiebung suggeriert. Umweltprobleme erreichen ihre Brisanz meist erst dann, wenn man sie entsprechend lange vor sich herschiebt. Dabei bietet sich eine Reihe von Möglichkeiten:

Das Problem kann *zeitlich* verschoben werden wie im Wohngemeinschaftsdilemma oder zu Lasten anderer Generationen. Eine *räumliche* Verschiebung wie im Fall des Pipeline-Beispiels hat in großem Ausmaß während der 1960er Jahre stattgefunden (Politik der hohen Schornsteine). Des Weiteren ist eine Problemverschiebung *zwischen den verschiedenen Umweltmedien* (Luft, Wasser, Boden) festzustellen.

Umweltexperten sind sich weitgehend einig, was die Ineffizienz derartiger Methoden betrifft. Durchgehend findet sich das Plädoyer, sich der Umweltproblematik so früh wie möglich zu stellen. Etwa wird gefordert, Abfallvermeidung schon in der Konstruktionsphase (mit wieder verwendbaren Bauteilen) zu berücksichtigen, anstatt sich erst in der Entsorgungsphase mit End-of-Pipe-Technologien darum zu kümmern<sup>154</sup>.

Soziale Systeme können jedoch so konstruiert sein, dass die Problemverschiebung trotz offensichtlicher gesamtwirtschaftlicher Nachteile zur dominanten Strategie wird. Will man dem entgegensteuern, so ist die allgemeine Kenntnis sozialer Dilemmata von Vorteil. Dies trägt dazu bei, entsprechende Gefahren zu erkennen. Mit Hilfe eines durchdachten Mechanismus-Designs

---

<sup>154</sup>Auch wenn in einigen Fällen End-of-Pipe-Technologien zur Problembewältigung unverzichtbar sind (vgl. Hampicke (1992), S. 345), ändert dieses nichts daran, dass mit integrierten Lösungen meist die nachhaltigeren Effekte erreicht werden.

können passende Vorschläge für institutionelle Veränderungen generiert werden. Es ist aber zu beachten, dass man sich dabei immer in einem Spannungsverhältnis sich widersprechender Anforderungen bewegt. Effizienz, Anreizkompatibilität und individuelle Rationalität sind nie zugleich erreichbar. Außerdem ist immer grundsätzlich zu fragen, ob wirklich alle denkbaren Ausweichmanöver berücksichtigt wurden und ob die neu zu schaffenden Regeln nicht zu unverständlich werden. Im Verlauf der Arbeit konnte mehrfach gezeigt werden, dass dies eine diffizile Angelegenheit ist. Um dieses Grundproblem in den Griff zu bekommen, muss man die Komplexität interdependenter Entscheidungsprozesse aber zunächst einmal verstehen. Spieltheorie und Kybernetik können sicherlich Beiträge zu diesem Verständnis leisten.

## Anhänge

### Anhang 1: Das Softwaretool GAMBIT

Das Gambit-Projekt wurde (unterstützt von der „National Science Foundation“ der USA) am California Institute of Technology sowie an der University of Minnesota im Laufe der 1990er Jahre durchgeführt. Ziel des Projektes war es, eine Software zu entwickeln, mit der die Lösungen von extensiven sowie Matrix-Normalform-Spielen automatisch generiert werden können. Die im Rahmen des Projektes entwickelte Software ist public domain und von den Entwicklern zum kostenlosen Download zur Verfügung gestellt worden:

Im Wesentlichen besteht die Gambit-Software aus den beiden Modulen „Gambit Graphics User Interface“ (Gambit GUI) sowie „Gambit Command Language“ (GCL). Die weiteren Darstellungen in diesem Abschnitt beziehen sich auf die Version 0.94 vom 28. Februar 1997. Für diese Version liegt dem Verfasser dieser Arbeit auch der C++-Quellcode beider Module vor. Das Hauptinteresse an Gambit im Rahmen dieser Arbeit bestand darin, die aufwendige Implementierung einer eigenen Benutzeroberfläche zu vermeiden. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich daher auf das Modul Gambit GUI. Mit Hilfe des „Graphics User Interface“ von Gambit kann einfach und bequem die wesentliche Spielstruktur einer Entscheidungssituation modelliert werden. Theoretisch können dabei allgemeine N-Personenspiele sowohl in extensiver Form als auch in Matrix-Normalform definiert werden.

In Abbildung A-1 wird anhand des Inspektionsspiels dargestellt, wie vorzugehen ist, wenn ein einfaches Zwei-Personenspiel modelliert werden soll. Man kann (aber man muss nicht) jede Zelle der Bimatrix und damit jedes mögliche Auszahlungsergebnis benennen. Man kann alternativ auch in die Sicht wechseln, in der die konkreten Auszahlungswerte zu sehen sind. Dieses ist in Abbildung A-2 dargestellt. Will man einen Wert ändern, etwa um die Strafverschärfung von einer NE auf drei NE abzubilden, so genügt ein Doppelklick auf die entsprechende Zelle, und es öffnet sich ein Popup-Fenster. Das mit dem Label „ertappt“ bezeichnete Auszahlungsergebnis (*Outcome*) ist für den Fall relevant, dass die Firma verschmutzt und auf frischer Tat ertappt wird, weil zugleich die Behörde die Strategie *Kontrolle* gewählt hat. Die Auszahlung für den ersten Spieler (die Firma) ist dann von -1 auf -3 hochzusetzen.



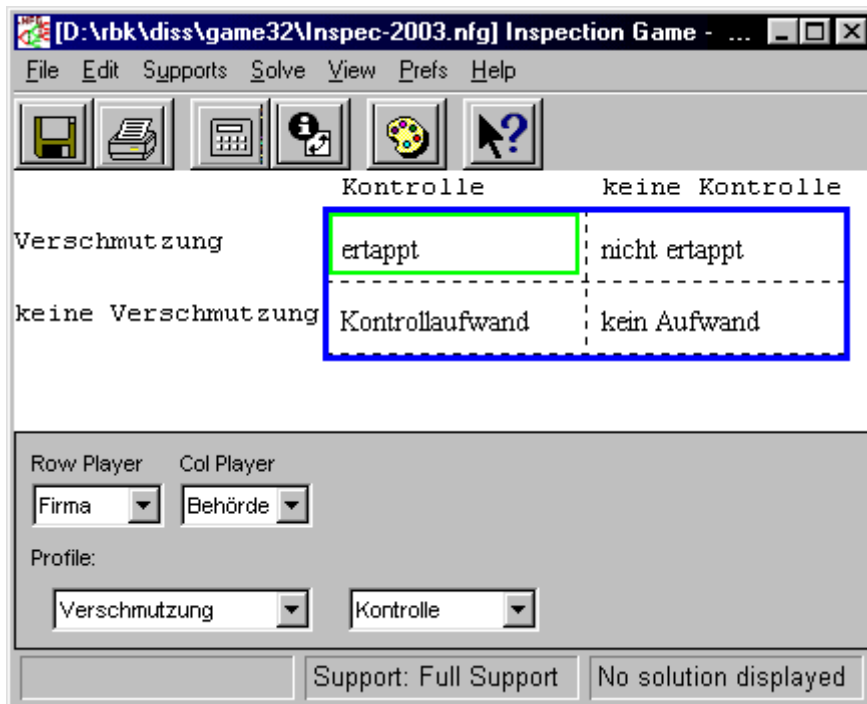


Abbildung A-1: Eingabe des Inspektionsspiels mit Hilfe von GAMBIT

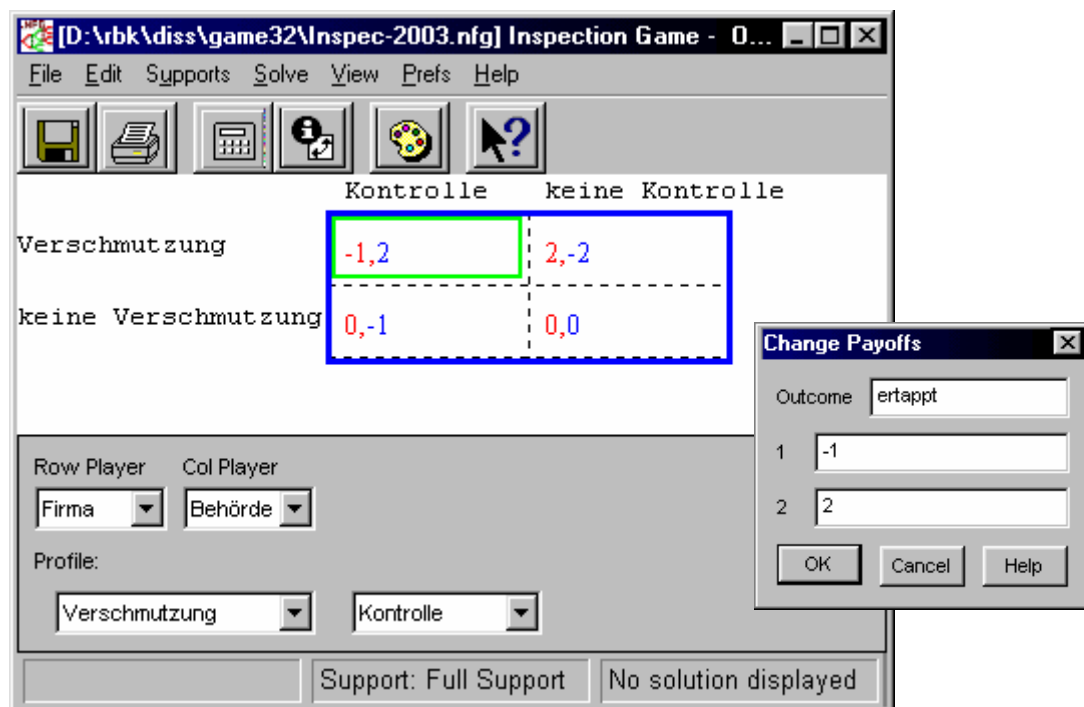


Abbildung A-2: Wechsel der Auszahlungswerte für das Inspektionsspiel (Strafverschärfung)

**Anhang 2: Weitere Einsatzgebiete des Simulationstools**

Da im Hauptteil der Arbeit eine Beschränkung auf zwei Anwendungsbeispiele vorgenommen wurde, ist die Notwendigkeit mancher Konzepte (siehe Kapitel 4) nicht unmittelbar einsichtig.

Eine kurze Beschreibung von Workshopbeiträgen und Konferenzpapers soll dazu dienen, weitere Einsatzmöglichkeiten aufzuzeigen. Vor allem im Verkehrsbereich sind soziale Dilemmata mit einer Vielzahl von Beteiligten relevant, und entsprechend wurden vom Verfasser auch einige Arbeiten zu dieser Thematik vorgelegt. Die folgende (chronologisch absteigende) Auflistung zeigt, dass sich das Thema *“Kooperation in sozialen Dilemma-Situationen“* wie ein roter Faden durchzieht. Die meisten Arbeiten wurden in einer Serie von WEHIA-Workshops vorgestellt (Workshop on Economics and Heterogenous Interacting Agents).

<p><b>WEHIA 2006</b></p>	<p><b>Tit-For-Tat-like Conditional Strategies – A generalization for arbitrarily large groups.</b>                  Verallgemeinerung der Tit-for-Tat-Strategie auf Spiele mit mehr als zwei Beteiligten. Kontrolltheoretische Betrachtungen. Zur Konzeption wurden Moore-Automaten verwendet. Agentenbasierte Modellierung und Simulation. Wurde bei der WEHIA 2006 in Bologna zum Vortrag angenommen und dort vorgestellt.</p> <p><a href="http://www.empire-institute.com/papers/wehia2006/short_proposal.pdf">www.empire-institute.com/papers/wehia2006/short_proposal.pdf</a></p>
<p><b>WEHIA 2005</b></p>	<p><b>Mechanism Simulation.</b>                  Mechanismus Design und Coase-Theorem. Kollektivgutproblematik und soziale Dilemmata. Lösungsansatz für sehr große Teilnehmerzahlen. Agentenbasierte Modellierung und Simulation. Wurde bei der WEHIA 2005 in Essex zum Vortrag angenommen und dort vorgestellt.</p> <p>Konferenz-Website: <a href="http://www.essex.ac.uk/wehia05">www.essex.ac.uk/wehia05</a></p> <p><a href="http://www.empire-institute.com/papers/wehia2005/berkemer.pdf">www.empire-institute.com/papers/wehia2005/berkemer.pdf</a></p>
<p><b>WEHIA 2003</b></p>	<p><b>Can voluntary self-restriction on sovereignty emerge?</b>                  “Voluntary Contribution Games”. Kollektivgutproblematik und soziale Dilemmata. Lösungsansatz für sehr große Teilnehmerzahlen – Bildung von Sub-Gruppen und Verzicht auf absolute Souveränität. Agentenbasierte Modellierung und Simulation. Wurde bei der WEHIA 2003 in Kiel zum Vortrag angenommen und dort vorgestellt.</p> <p><a href="http://www.empire-institute.com/papers/wehia2003/berkemer.pdf">www.empire-institute.com/papers/wehia2003/berkemer.pdf</a></p>

<b>Dresden 2003</b>	<p><b>Kollektivgutprobleme im Verkehrswesen – können intelligente Akteure Abhilfe schaffen.</b>  Co-Autor in Zusammenarbeit mit Matthias Lenz (Hauptautor).  Wurde bei den Verkehrswissenschaftlichen Tagen 2003 in Dresden zum Vortrag angenommen und dort von Matthias Lenz vorgestellt. Basiert auf eigener Arbeit von 1999 (Modal Split und Social Dilemmas) und bestätigt einige der dort angestellten Überlegungen experimentell.</p> <p><a href="http://www.empire-institute.com/papers/dresden/Kollektivgutprobleme_Verkehr.pdf">www.empire-institute.com/papers/dresden/Kollektivgutprobleme_Verkehr.pdf</a></p>
<b>WEHIA 2002</b>	<p><b>Endogenous Interaction Environments.</b>  Kooperatives Verhalten wird mit einer möglichen Ausweitung des Aktionsradius „belohnt“. Ergibt einerseits potentielle Zusatzgewinne durch weitere Interaktionen. Andererseits entstehen soziale Dilemmata in größeren Gruppen. Kontrolltheoretische Betrachtungen (Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit).  Wurde bei der WEHIA 2002 in Triest zur Posterpräsentation angenommen  Liegt als abstract und unveröffentlichtes draft vor.</p> <p><a href="http://www.empire-institute.com/papers/wehia2002/abstract.pdf">www.empire-institute.com/papers/wehia2002/abstract.pdf</a></p> <p>Konferenz-Website:  <a href="http://agenda.ictp.trieste.it/agenda/current/fullAgenda.php?ida=a01141">http://agenda.ictp.trieste.it/agenda/current/fullAgenda.php?ida=a01141</a></p>
<b>WEHIA 2001</b>	<p><b>Learning Reciprocal Cooperation in Extending Groups.</b>  Kooperationswahrscheinlichkeit von Kleingruppen im Vergleich zu größeren Gruppen. Verallgemeinerung der Tit-for-Tat-Strategie auf Spiele mit mehr als zwei Beteiligten. Dazu wurden Moore-Automaten verwendet.  Agentenbasierte Modellierung. Wurde bei der WEHIA 2001 in Maastricht zur Posterpräsentation angenommen. Liegt als abstract und unveröffentlichtes draft vor.</p> <p><a href="http://www.empire-institute.com/papers/wehia2001/abstract.pdf">www.empire-institute.com/papers/wehia2001/abstract.pdf</a></p>
<b>WEHIA 2000</b>	<p><b>Endogenous Heterogeneity in Traffic Behavior.</b>  Paradoxe Situationen im Verkehrsbereich (Braess-Paradox und Bezug zu Social Dilemmas). Agentenbasierte Modellierung und Simulation mehrstufiger Entscheidungsprozesse. Imitations-Lernen und Bezug zur Replikatorndynamik aus der evolutionären Spieltheorie. Basiert auf der Arbeit von 1999.  Wurde bei der WEHIA 2000 in Marseille zum Vortrag angenommen – wurde als vollständiges paper auf der Konferenz-Website zur Verfügung gestellt.  Der Beitrag wird in unveränderter Form weiterhin zur Verfügung gestellt.</p> <p><a href="http://www.empire-institute.com/papers/wehia2000/wehia2000.pdf">www.empire-institute.com/papers/wehia2000/wehia2000.pdf</a></p>

<p><b>TGF 1999</b></p>	<p><b>Modal Split and Social Dilemmas.</b>          Soziale Dilemmata im Verkehrsbereich. Kollektivgut-Problematik von Straßen und öffentlichen Verkehrsmitteln. Zuordnen der jeweils möglichen Situationen zu spieltheoretischen Standardmodellen.          Wurde bei der TGF 1999 in Stuttgart zur Posterpräsentation angenommen. Der Beitrag wurde <b>2000</b> im Springer-Verlag veröffentlicht:</p> <p style="text-align: center;"><i>Berkemer, R., 2000, Modal Split and Social Dilemmas. In: Helbing, D., H.J. Herrmann, M. Schreckenberg, D.E. Wolf: Traffic and Granular Flow '99. Social, Traffic and Granular Dynamics. Springer: Heidelberg</i></p>
<p><b>Buchenbach 1996</b></p>	<p><b>Kooperation in „social-dilemma“ Situationen.</b>          Theorie von Mancur Olson (Logic of Collective Action). Kooperation in größeren Gruppen sehr problematisch. Analyse dieser Problematik für Spiele mit mehr als zwei Beteiligten. Agentenbasierte Modellierung.          Wurde bei dem Buchenbach-Workshop (organisiert von Prof. Ulrich Witt) zum Vortrag angenommen. Der Beitrag wird in unveränderter Form weiterhin zur Verfügung gestellt.</p> <p style="text-align: center;"><a href="http://www.empire-institute.com/papers/buchenbach/buchenbach.pdf">www.empire-institute.com/papers/buchenbach/buchenbach.pdf</a></p>

Aus der obigen Auflistung ergibt sich auch grob die Entwicklungsgeschichte des Simulationstools. Im Wesentlichen ist zu erkennen, dass ab WEHIA 2003 auch explizit Simulationsergebnisse vorgestellt wurden. Die Arbeiten zuvor befassten sich meist mit konzeptionellen Fragen der agentenbasierten Modellierung.

Unter der Adresse [www.empire-institute.com/papers/phdthesis](http://www.empire-institute.com/papers/phdthesis) werden weitere Simulationsergebnisse vorgestellt, sowohl zu den beiden Anwendungsbeispielen in dieser Arbeit als auch zu den weiteren Einsatzgebieten. Dort befindet sich auch ein Link zum C++-Programmcode.

### Anhang 3: Fischzüchterbeispiel am Fluss

Mit zunehmender Entfernung von der Einleitungsstelle des Abwassers nimmt die Schadstoffkonzentration ab – typischerweise exponentiell. Um diese Annahme plausibel zu machen, wird beispielhaft auf das IIASA Workingpaper WP-93-049 sowie die dort angegebene Literatur verwiesen<sup>155</sup>.

Man könnte analog zur Vorgehensweise in Kapitel 6 (Fischzüchter am See) ein Szenario mit privater Information und heterogener Nutzenverteilung konstruieren. Dann schwanken die erwarteten Schäden des Abwassers – respektive der erwartete Nutzen der Kläranlage – um einen entfernungsabhängigen Mittelwert, sind also von Fischzüchter zu Fischzüchter verschieden.

Für den einfachsten Fall von Gleichverteilungen gilt dann:

$$f_j(\cdot) = \frac{1}{\mu^{j-1}} \text{ in } D_j = [0, \mu^{j-1}], \quad j = 1, \dots, n, \quad 0 < \mu < 1 \quad (68)$$

Im Folgenden interessiert nur der im Resümee angekündigte Nachweis der Behauptung, dass die Zusatzoption in Form einer Pipeline die Situation noch verschlimmern kann. Dazu reicht *ein* spezifisches Beispiel aus.

**Annahme:**  $\mu = 1/2$  und für den ersten Fischzüchter sei ein Schaden von 8 NE unterstellt. Damit das Beispiel einfach nachvollzogen werden kann, werden nur drei Fischzüchter betrachtet. Dann gilt  $x_1 = 8$ ,  $x_2 = 4$ ,  $x_3 = 2$ . Bleibt es beim Status Quo, so erhalte jeder Fischzüchter eine negative Auszahlung in entsprechender Höhe.

Nun wird die Pipeline-Option zugelassen. Für ein Stück Pipeline werden Kosten von 5 NE veranschlagt. In Abbildung A-3 ist die entsprechende Spielstruktur mit Hilfe von GAMBIT in der extensiven Spielform dargestellt. Falls sich der erste Spieler für die Pipeline-Option entscheidet, so kann er *unilateral* seine Auszahlung von  $-8$  auf  $-5$  verbessern. Es wird dann unterstellt, dass das Schadstoff belastete Wasser unverändert<sup>156</sup> um den ersten Fischzuchtbereich herumgeleitet wird.

---

<sup>155</sup> Vgl. Berkemer, Makowski und Watkins (1993).

<sup>156</sup> In diesem Fall kommt die exponentielle Schadstoffabnahme *nicht* zur Wirkung. Auch dies sollte als Beispiel für einen externen Effekt erkannt werden. Die Schadstoffe, die sich ansonsten in den Fischen und Uferanlagen des ersten Fischzüchters angesammelt hätten, gelangen nun ungefiltert in den Fischzuchtbereich des Zweiten.

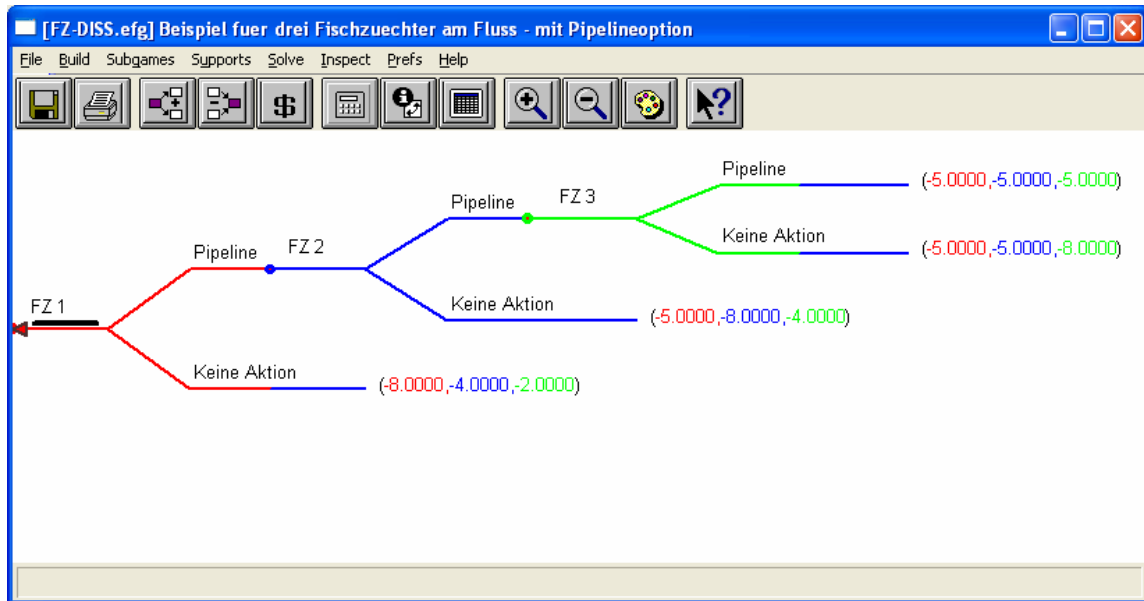


Abbildung A-3: Eingabe eines extensiven Spiels mit Hilfe von GAMBIT

Nur falls der erste Fischzüchter (FZ 1) die Option Pipeline gewählt hat, kommt der zweite Fischzüchter (FZ 2) überhaupt zum Zug. Nur wenn der zweite Fischzüchter die Pipeline des ersten weiter verlängert, kommt der dritte Fischzüchter (FZ 3) zum Zug. In Abbildung A-4 ist die Normalform dieses Beispiels dargestellt.

		Fischzüchter 3: <i>pipeline</i>		Fischzüchter 3: <i>nichts tun</i>		
		<i>pipeline</i>	<i>nichts tun</i>	<i>pipeline</i>	<i>nichts tun</i>	
Fischzüchter 1	<i>pipeline</i>	$-5, -5, -5$	$-5, -8, -4$	$s = -1$	$-5, -5, -8$	$-5, -8, -4$
	<i>nichts tun</i>	$-8, -4, -2$	$-8, -4, -2$	$s = 0$	$-8, -4, -2$	$-8, -4, -2$

Abbildung A-4: Die strategische Normalform für das Beispiel mit Pipeline-Option

Man kann das Nash-Gleichgewicht ermitteln und wird dabei feststellen, dass sich alle drei sukzessiv für die Pipeline-Option entscheiden „sollten“, was insgesamt Kosten von 15 NE verursacht und damit gesamtwirtschaftlich teurer ist als die Beibehaltung des Status Quo mit Gesamtkosten von 14 NE.

### Anhang 4: Funktionsweise des Pivot-Mechanismus bei binärer Projektentscheidung

Da postuliert wurde, dass der Pivot-Mechanismus zum gleichen Allokationsergebnis wie der Demand Revealing Mechanismus (DRM) führt, muss die kollektive Entscheidungsregel auch dieselbe sein. Die Frage, ob die Kläranlage gebaut werden soll oder nicht, wird also von beiden Mechanismen gleich beantwortet (vgl. dazu die beiden folgenden Hauptfälle). Unterschiedlich bestimmt wird jedoch die Höhe der Kompensationszahlungen. Beim Pivot-Mechanismus wird nämlich explizit mitberücksichtigt, ob die Nutzenangabe eines Agenten für die Frage der Projektrealisierung ausschlaggebend (“pivotal“) war oder nicht.

Damit ergeben sich folgende vier Unterfälle<sup>157</sup>:

Fall 1:  $\sum_{i=1}^n y_i > C = n \cdot r$  dann wird das Projekt realisiert ( $\rightarrow$  pro-Kopf-Kosten von  $r$ )

- Fall 1a:  $\underbrace{\sum_{j \neq i} y_j}_{\text{Nutzen aller ohne } i} \geq \underbrace{(n-1) \cdot r}_{\text{Zahlung aller ohne } i}$   $c_i = r$

- Fall 1b:  $\underbrace{\sum_{j \neq i} y_j}_{\text{Nutzen aller ohne } i} < \underbrace{(n-1) \cdot r}_{\text{Zahlung aller ohne } i}$   $c_i = r + (n-1) \cdot r - \sum_{j \neq i} y_j$

Fall 2:  $\sum_{i=1}^n y_i \leq n \cdot r$  dann wird *kein* Projekt realisiert ( $\rightarrow$  pro-Kopf-Kosten von 0)

- Fall 2a:  $\underbrace{\sum_{j \neq i} y_j}_{\text{Nutzen aller ohne } i} \leq \underbrace{(n-1) \cdot r}_{\text{Zahlung aller ohne } i}$   $c_i = 0$

- Fall 2b:  $\underbrace{\sum_{j \neq i} y_j}_{\text{Nutzen aller ohne } i} > \underbrace{(n-1) \cdot r}_{\text{Zahlung aller ohne } i}$   $c_i = 0 + \sum_{j \neq i} y_j - (n-1) \cdot r$

Im Allgemeinen orientiert sich der eingeforderte Zahlungsbetrag an den pro-Kopf-Kosten des Projektes (siehe Fall 1a und Fall 2a), und nachfolgend werden die Abweichungen von diesem Prinzip motiviert. Am besten zu verstehen ist die Funktionsweise des Pivot-Mechanismus anhand der Diskussion von Unterfall 1b:

---

<sup>157</sup> Auf der rechten Seite ist jeweils die Kompensationszahlung angegeben.

In diesem Fall wird das Projekt realisiert aber die Summe der Zahlungen, die von allen anderen Agenten (außer  $i$ ) zu leisten ist, übersteigt den Gesamtnutzen aller anderen (außer  $i$ ) aus der Projektrealisierung. Die Nutzenangabe des Agenten  $i$  hat also *den Ausschlag gegeben*, denn wäre  $i$  insofern passiv geblieben, dass lediglich die pro-Kopf-Kosten  $r$  angegeben worden wären, so wäre den anderen dieser aus ihrer Sicht ungünstige Unterfall erspart geblieben.

Anders formuliert: Die Nutzenangabe des  $i$  hat einen negativen *externen Effekt* verursacht

$$\text{(in der Höhe von } (n-1) \cdot r - \sum_{j \neq i} y_j \text{ )}$$

und deshalb wird die Zahlung  $c_i$  so festgesetzt, dass zusätzlich zu den pro-Kopf-Kosten  $r$  ein Steueraufschlag (die Clarke-Steuer) gefordert wird, der gerade dem externen Effekt entspricht.

Weniger plausibel – aber genauso wichtig – ist es im Fall 2b den richtigen Steueraufschlag einzuführen. Dort entsteht nämlich ebenfalls ein externer Effekt durch die Nutzenangabe des Agenten  $i$ . Das Projekt wird nicht realisiert, hätte aber  $i$  die pro-Kopf-Kosten  $r$  angegeben, so wären die anderen zu einem günstigeren Ergebnis gekommen. Diesmal übersteigt nämlich der Nutzen, den alle anderen aus dem fraglichen Projekt ziehen würden, die Beiträge, die von ihnen zu leisten wären.

***Worin besteht nun der Zusammenhang zwischen dem Pivot-Mechanismus und dem DRM?***

Zur Erinnerung: Die Kompensationszahlungen für den Pivot-Mechanismus müssen so bestimmt sein, dass die *individuellen Anreize* im Vergleich zum DRM unverändert bleiben.

Erneut ist es hilfreich, die Diskussion anhand des Unterfalles 1b zu beginnen. Vergleicht man die Kompensationszahlungen, so fällt auf, dass in diesem Fall ohnehin kein Unterschied besteht.  $r + (n-1) \cdot r$  entspricht nämlich gerade den Projektkosten  $C = n \cdot r$ , und deshalb kann der Zahlungsbetrag umgeschrieben werden zu  $c_i = C - \sum_{j \neq i} y_j$ .

Dies entspricht exakt dem, was beim Zahlungsschema des DRM *immer* anfällt, sobald das Projekt realisiert wird. Beim Unterfall 2a gibt es ebenfalls eine genaue Entsprechung, denn sowohl bei DRM als auch beim Pivot-Mechanismus wird gar keine Zahlung eingefordert.



Dagegen ist beim Unterfall 2b der Unterschied offensichtlich: Beim DRM wäre erneut keine Zahlung angefallen. Beim Pivot-Mechanismus ist aber  $\sum_{j \neq i} y_j - (n-1) \cdot r$  als Ausgleich für den externen Effekt zu entrichten, welchen Agent  $i$  zu verantworten hat, weil seine Nutzenangabe ausschlaggebend war. Im Vergleich zum DRM musste also gerade dieser Betrag addiert werden. Bleibt noch der letzte Unterfall (1a) offen: Was geschieht, wenn im Vergleich zu DRM wieder genau der selbe Unterschiedsbetrag hinzugezählt wird?

Als Ergebnis erhält man dann:

$$c_i = C - \sum_{j \neq i} y_j + \sum_{j \neq i} y_j - (n-1) \cdot r,$$

womit exakt die pro-Kopf-Kosten  $r$  übrigbleiben, was wiederum gerade dem entspricht, was der Pivot-Mechanismus in Fall 1a als Kompensationszahlung einfordert.

Zusammengefasst: Die Zahlung bei Pivot-Mechanismus und DRM unterscheidet sich entweder gar nicht (Fall 1b und Fall 2a) oder um die Differenz  $\sum_{j \neq i} y_j - (n-1) \cdot r$  (Fall 1a und Fall 2b).

**Nun kann man das Vorgehen für alle vier Unterfälle wie folgt integrieren:**

Um den Pivot-Mechanismus abzuleiten, wird im Vergleich zum DRM *immer*

$$S_i = \text{Max} \left\{ 0, \sum_{j \neq i}^n (y_j - r) \right\} \text{ hinzugezählt.}$$

Man beachte, dass diese Differenz weder direkt noch indirekt von Agent  $i$  beeinflusst werden kann. Deshalb bleibt die individuelle Anreizstruktur wie gewünscht erhalten. Des Weiteren ist der Term  $S_i$ , der im Vergleich zum DRM addiert wird, auf jeden Fall *nicht-negativ*. Manchmal verschwindet dieser Term (Fall 1b und 2a) aber unter Umständen kommt etwas Positives hinzu. Die Gesamtbeitragseinnahmen können also eventuell höher ausfallen. Damit ist abschließend auch erklärt, warum der Pivot-Mechanismus die Finanzierung des Projektes garantieren kann. Während es beim DRM vorkommen kann, dass die eingenommenen Kompensationszahlungen dazu nicht ausreichen, muss bei den entsprechenden Situationen für den Pivot-Mechanismus gerade etwas dazugekommen sein – in Hauptfall 1 (Projektrealisierung) zahlen nämlich alle zumindest die pro-Kopf-Kosten  $r$ .

## Literaturverzeichnis

- Andreozzi, Luciano (2004): Rewarding Policeman Increases Crime: Another Surprising Result from the Inspection Game, *Public Choice*, 121, 62-82, 2004
- Arifovic, Jasmina und Ledyard, John (2002): Computer Testbeds: The Dynamics of Groves-Ledyard Mechanisms, manuscript. Simon Fraser University and California Institute of Technology, December 2002
- Axelrod, Robert (1984): *The Evolution of Cooperation*. New York, 1984
- Berkemer, Rainer (1991): Analyse der Aufbau- und Ablauforganisation für die Planung in mehrstufigen Textilbetrieben – Objektorientierte Modellierung und Simulation, Diplomarbeit Universität Stuttgart, 1991
- Berkemer, Rainer; Makowski, Marek und Watkins David (1993): A Prototype of a Decision Support System for Water Quality Management in Central and Eastern Europe, IIASA Workingpaper WP-93-049. Laxenburg bei Wien, 1993
- Berkemer, Rainer (1996): Kooperation in „social-dilemma“ Situationen, Workshopbeitrag. Buchenbach bei Freiburg, 1996
- Berkemer, Rainer (2000a): Modal Split and Social Dilemmas. In: Helbing, Dirk, Hans J. Herrmann, Michael Schreckenberg, Dietrich E. Wolf: *Traffic and Granular Flow '99*. Social, Traffic and Granular Dynamics. Heidelberg, 2000
- Berkemer, Rainer (2000b): Endogenous Heterogeneity in Traffic Behavior, Workshopbeitrag WEHIA 2000. Marseille, 2000
- Berkemer, Rainer (2001): Learning Reciprocal Cooperation in Extending Groups, unveröffentlicht, Workshopbeitrag WEHIA 2001. Maastricht, 2001
- Berkemer, Rainer (2002): Endogenous Interaction Environments, unveröffentlicht, Workshopbeitrag WEHIA 2002. Triest, 2002
- Berkemer, Rainer (2003): Can voluntary self-restriction on sovereignty emerge?, Workshopbeitrag WEHIA 2003. Kiel, 2003

- Berkemer, Rainer und Lenz, Matthias (2003): Kollektivgutprobleme im Verkehrswesen – können intelligente Akteure Abhilfe schaffen?, Konferenzbeitrag Verkehrswissenschaftliche Tage 2003. Dresden, 2003
- Berkemer, Rainer (2005): Mechanism Simulation, Workshopbeitrag WEHIA 2005. Essex, 2005
- Berkemer, Rainer (2006): Tit-For-Tat-like Conditional Strategies – A generalization for arbitrarily large groups, Workshopbeitrag WEHIA 2006. Bologna, 2006
- Binmore, Ken (1992): Fun and Games : A text on Game Theory. Toronto, 1992
- Brenner, Thomas (1999): Modelling Learning in Economics. Cheltenham, 1999
- Bruns, Hermann (1995): Neoklassische Umweltökonomie auf Irrwegen : Eine exemplarische Untersuchung der neoklassischen Methode. Marburg, 1995
- Burger, Christina (1994): Spieltheoretische Analyse umweltrelevanten Verhaltens, in: Bartel, Rainer und Hackl, Franz (Hrsg.), Einführung in die Umweltpolitik. München, 1994
- Camerer, Colin F. und Ho, Teck-Hua (1999): Experience Weighted Attraction Learning in Normal Form Games, *Econometrica*, 67, 827-873, 1999
- Chan, Kenneth S.; Mestelman, Stuart; Moir, Rob und Muller, R. Andrew (1998): Heterogeneity and the voluntary contribution of public goods, unpublished manuscript. McMaster University, 1998
- Clarke, Edward H. (1971): Multipart pricing of public goods, *Public Choice*, 11, 17-33, 1971
- Coase, Ronald (1937): The Nature of the firm, *Economica*, 4, 386-405, 1937
- Coase, Ronald (1960): The problem of social cost, *Journal of Law and Economics*, 3, 1-44, 1960
- Deutsch, Karl Wolfgang (1973): Politische Kybernetik, 3. Auflage. Freiburg, 1973
- Endres, Alfred (2000): Umweltökonomie, 2., überarbeitete Auflage. Stuttgart, Berlin, Köln, 2000
- Farrel, Joseph (1987): Information and the Coase Theorem, *Journal of Economic Perspectives*, 1, 113-129, 1987
- Feess, Eberhard (1995): Umweltökonomie und Umweltpolitik. München, 1995
- Fehr, Ernst und Gächter, Simon (2000): Cooperation and punishment in public goods experiments, *The American Economic Review*, 90 (4), 980-994, 2000
- Feldman, Allan (1980): Welfare economics and social choice theory, Boston, 1980

- Fischbach, Kai (2006): Strukturbildung in Peer-to-Peer-Netzwerken. Dissertation, Vallendar :  
Wissenschaftliche Hochschule für Unternehmensführung, 2006
- Fischer, Thomas (1994): Koordination betriebswirtschaftlicher Regelungsaufgaben im Rahmen  
eines integrierten Informationssystems der Unternehmung. Ehningen bei Böblingen, 1994
- Green, Jerry R. und Laffont, Jean-Jacques (1977): Characterization of satisfactory mechanisms  
for the revelation of preferences for public goods, *Econometrica*, 45, 427-438, 1977
- Groves, Theodore (1973): Incentives in teams, *Econometrica*, 41, 617-631, 1973
- Groves, Theodore und Ledyard, John O. (1987): Incentive Compatibility Since 1972, in: Groves,  
Theodore; Radner, Roy und Reiter, Stanley (Hrsg.), *Information, Incentives, and  
Mechanisms. Essays in Honor of Leonid Hurwicz*. Oxford, 48-111, 1987
- Gigerenzer, Gerd und Selten, Reinhard (2001): Rethinking Rationality, in: Gigerenzer, Gerd und  
Selten, Reinhard (Hrsg.), *Bounded rationality: the adaptive toolbox*. Cambridge (Mass.),  
London, 2001
- Güth, Werner und Stadler, Manfred (2007): Path dependence without denying deliberation – a  
continuous transition model connecting teleology and evolution, *Journal of Evolutionary  
Economics*, 17, 45-52, 2007
- Hampicke, Ulrich (1992): *Ökologische Ökonomie : Individuum und Natur in der Neoklassik*.  
Opladen, 1992
- Hardin, Garrett (1968): The Tragedy of the Commons, *Science*, 162, 1243-1248, 1968
- Hargreaves Heap, Shaun P. und Varoufakis, Yanis (2004): *Game Theory : a critical text*.  
London, 2004
- Helbing, Dirk (1993): *Stochastische Methoden, nichtlineare Dynamik und quantitative Modelle  
sozialer Prozesse*. Aachen, 1993
- Hinterberger, Friedrich; Luks, Fred und Stewen, Marcus (1996): *Ökologische Wirtschaftspolitik:  
Zwischen Ökodiktatur und Umweltkatastrophe*. Berlin, Basel, Boston, 1996
- Hofbauer, Josef; Schuster, Peter und Sigmund, Karl (1979): A note on evolutionary stable  
strategies and game dynamics. *Journal of Theoretical Biology* 81: 609-612, 1979
- Hofbauer, Josef und Sigmund, Karl (1984): *Evolutionstheorie und dynamische Systeme –  
Mathematische Aspekte der Selektion*. Berlin, Hamburg, 1984

- Holler, Manfred J. (1993): Fighting Pollution When Decisions are Strategic, *Public Choice*, 76, 347-356, 1993
- Holler, Manfred J. und Illing, Gerhard (2005): Einführung in die Spieltheorie, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg, 2005
- Isaac, R. Marc und Walker, James M. (1988): Group Size Effects in Public Goods Provision: The Voluntary Contributions Mechanism, *Quarterly Journal of Economics*, 103 (February), 179-199, 1988
- Junne, Gerd (1972): Spieltheorie in der internationalen Politik: die beschränkte Rationalität strategischen Denkens. Düsseldorf, 1972
- Kawagoe, Toshiji und Mori, Toru (2001): Can the Pivotal mechanism induce truth-telling? An experimental study, *Public Choice*, 108, 331-354, 2001
- Kirchkamp, Oliver (1996): Evolution and Learning in Spatial Models. Dissertation, Bonn : Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, 1996
- Kirsch, Guy (1997): Neue Politische Ökonomie, 4. Auflage. Düsseldorf, 1997
- Ledyard, John und Palfrey, Thomas R. (1994): Voting and Lottery Drafts as Efficient Public Goods Mechanisms, *Review of Economic Studies*, 61, 327-355, 1994
- Luce, Robert Duncan und Raiffa, Howard (1957): Games and Decisions. Introduction and Critical Review. New York, 1994
- Marwell, Gerald und Ames, Ruth E. (1981): Economists Free Ride, does Anyone Else?, *Journal of Public Economics*, 15, 295-310, 1981
- Maynard Smith, John und Price, George R. (1973): The Logic of Animal Conflict, *Nature*, 246, 15-18, 1973
- Milgrom, Paul (2004): Putting auction theory to work. Cambridge (UK), 2004
- Myerson, Roger B. (1979): Incentive Compatibility and the Bargaining Problem, *Econometrica*, 47, 61-74, 1979
- Neumann, John von und Morgenstern, Oskar (1947): The Theory of Games and Economic Behavior, 2<sup>nd</sup> edition. Princeton, 1947
- Olson, Mancur (1965): The Logic of Collective Action: Public Goods and the Theory of Groups. Cambridge (Mass.), 1965

- Osborne, Martin J. und Rubinstein, Ariel (1998): Games with Procedurally Rational Players, *The American Economic Review*, 88 (4), 834-47, 1998
- Pigou, Arthur Cecil (1923): *The Economics of Welfare*. London, 1923
- Rieck, Christian (1993): *Spieltheorie: Einführung für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler*. Wiesbaden, 1993
- Rob, Rafael (1989): Pollution Claim Settlements under Private Information, *Journal of Economic Theory*, 47, 307-333, 1989
- Samuelson, Larry und Zhang, Jianbo (1992): Evolutionary stability in asymmetric games. *Journal of Economic Theory*, 57, 363-391, 1992
- Samuelson, Larry (1993): Does evolution eliminate dominated strategies? in: Binmore, Ken; Kirman, Alan und Tani, Piero (Hrsg.), *Frontiers of Game Theory*, Cambridge (Mass.), 1993
- Sethi, Rajiv (2000): Stability of Equilibria in Games with Procedurally Rational Players, *Games and Economic Behavior*, 32 (1), 85-104, 2000
- Schüßler, Rudolf (1990): *Kooperation unter Egoisten: vier Dilemmata*. München, 1990
- Schelling, Thomas C. (1960): *The Strategy of Conflict*. London, 1960
- Selten, Reinhard (1978): The Chainstore Paradox, *Theory and Decision*, 9, 127-159, 1978
- Selten, Reinhard (2001): What Is Bounded Rationality?, in: Gigerenzer, Gerd und Selten, Reinhard (Hrsg.), *Bounded rationality: the adaptive toolbox*. Cambridge (Mass.), London, 2001
- Sigmund, Karl (1995): *Spielpläne: Zufall, Chaos und die Strategien der Evolution*. Hamburg, 1995
- Simon, Herbert Alexander (1982): *Models of Bounded Rationality (Volume 2: Behavioral Economics and Business Organization)*. Cambridge (Mass.), 1982
- Streissler, Erich (1993): Das Problem der Internalisierung, in: Hans König (Hrsg.), *Umweltverträgliches Wirtschaften als Problem von Wissenschaft und Politik*, 87 – 110, Berlin, 1993
- Taylor, Michael (1994): *The Possibility of Cooperation*. Cambridge (Mass.), 1994
- Taylor, Peter D. und Jonker, Leo B. (1978): Evolutionary stable strategies and game dynamics. *Mathematical Biosciences*, 40, 145-156, 1978

- Waldrop, Mitchell M. (1993): Inseln im Chaos: die Erforschung komplexer Systeme. Reinbek bei Hamburg, 1993
- Weibull, Jörgen W. (1995): Evolutionary game theory. Cambridge (Mass.), London, 1995
- Weimann, Joachim (1990): Umweltökonomik: Eine theorieorientierte Einführung. Berlin, Heidelberg, 1990
- Weimann, Joachim (1995): Freifahrer im Test: Ein Überblick über 20 Jahre Freifahrerexperimente, in: Ökonomie und Gesellschaft, Jahrbuch 12: Soziale Kooperation, 168-241, 1995
- Weimann, Joachim (2006): Wirtschaftspolitik: Allokation und kollektive Entscheidung, 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, 2006
- Worobjew, N.N. (1981): Spieltheorie, in: Günter Laux (Hrsg.), Lexikon der Kybernetik. Berlin, 1981
- Zürn, Michael (1992): Interessen und Institutionen in der internationalen Politik : Grundlegung und Anwendung des situationsstrukturellen Ansatzes. Opladen, 1992