

SERIE PIPER
Band 410

Zu diesem Buch

Das Spiel ist ein Naturphänomen, das schon von Anbeginn den Lauf der Welt gelenkt hat: die Gestaltung der Materie, ihre Organisation zu lebenden Strukturen wie auch das soziale Verhalten des Menschen. Die Grundelemente des Spiels, Zufall und Gesetz, bestimmen jegliches Geschehen im Universum. So lassen sich Naturgesetze in Form von Spielregeln abstrahieren. Diese setzen dem Würfelspiel des Zufalls, der Unbestimmtheit der elementaren Ereignisse, enge Grenzen. Auf dem Spielfeld bilden sich Muster, Information entsteht, die Gesetze von Selektion und Evolution treten klar hervor.

Dieses ist die Quintessenz des weltweit bewunderten Buches des Göttinger Biochemikers und Nobelpreisträgers Manfred Eigen und seiner Mitarbeiterin Ruthild Winkler, das in seine subtile, aber stets praxisbezogene Untersuchung auch brisante »apokalyptische« Themen unserer Zeit, z. B. die Frage der Genmanipulation und des Wachstums in einem begrenzten Lebensraum, mit einbezieht.

»... ein Buch, aus dem der Leser höchst komplizierte Fakten und Vorgänge »spielend« lernt.« Die Zeit

Manfred Eigen, geboren 1927 in Bochum. Prof. Dr. rer. nat., Studium der Physik und Chemie in Göttingen. Seit 1964 Direktor am Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie. 1967 Chemie-Nobelpreis.

Ruthild Winkler-Oswatitsch, geboren 1941. Dr. der technischen Wissenschaften, Studium der Chemie in Wien. Seit 1965 Mitarbeiterin von Manfred Eigen am Max-Planck-Institut.

Manfred Eigen
Ruthild Winkler

DAS SPIEL

Naturgesetze
steuern den Zufall



Piper
München Zürich

n-
er
le-
n.
so
e-
ld
n,
n-
ch

t-
at

in
ch
e-
ie
re
ch
i-

p-
le
r-
n
r-

Inhalt

ein entzückendes
Sammlung

Vorwort	II
-----------------	----

TEIL I: DIE ZÄHMUNG DES ZUFALLS	15
---	----

1. Vom Ursprung des Spiels	17
------------------------------------	----

2. Gesellschaftsspiele – Spiele der Gesellschaft	21
--	----

2.1 Glück und Pech	22
----------------------------	----

2.2 Spieltheorie	27
---------------------------	----

2.3 ... und menschliches Verhalten	32
--	----

3. Mikrokosmos – Makrokosmos	35
--------------------------------------	----

3.1 Der Zufall	36
------------------------	----

3.2 Spiel von Leben und Tod	40
-------------------------------------	----

4. Statistische Kugelspiele	47
-------------------------------------	----

4.1 »Kopf oder Adler«	49
-------------------------------	----

4.2 Ehrenfests Urnenspiel	52
-----------------------------------	----

4.3 Das Gesetz der großen Zahl	58
--	----

4.4 Katastrophen	62
--------------------------	----

5. Darwin und die Moleküle	67
------------------------------------	----

5.1 Selektion	68
-----------------------	----

5.2 Was bedeutet »fittest«?	71
-------------------------------------	----

5.3 Überlebensspiel	79
-----------------------------	----

TEIL II: SPIELE IN RAUM UND ZEIT	85
--	----

6. Struktur, Muster, Gestalt	87
--------------------------------------	----

6.1 Konservative Strukturen	89
-------------------------------------	----

6.2 Morphogenese	96
--------------------------	----

6.3 Reaktionsspiele	102
-----------------------------	-----

6.4 Dissipative Muster	110
--------------------------------	-----

ISBN 3-492-00710-4

Neuausgabe 1985

7. Auflage, 50.–61. Tausend April 1985

(1. Auflage, 1.–12. Tausend dieser Ausgabe)

© R. Piper GmbH & Co. KG, München 1975, 1985

Umschlag: Federico Luci

Gesamtherstellung: Clausen & Bosse, Leck

Printed in Germany

7. Symmetrie	123
7.1 Das Platonische Konzept	124
7.2 Gebrochene Symmetrien	133
7.3 Symmetrie a posteriori	140
8. Metamorphosen der Ordnung	153
8.1 Die »gerechte« Ordnung	154
8.2 Die Ordnung der Zahlen	158
8.3 Die Ordnung der Materie	162
Entropie	162
Gleichgewicht	174
8.4 Die Ordnung des Lebenden	181
Gefesselte Dämonen	181
Darwin: Prinzip oder Ismus?	187
Y) Schöpfung oder Offenbarung?	190
TEIL III: GRENZEN DES SPIELS – GRENZEN DER MENSCHHEIT ..	199
9. Die Parabel von den Physikern	201
10. Von selbstreproduzierenden Automaten – und denkenden Maschinen	205
10.1 »Künstliches« Leben?	206
10.2 Genetische Manipulation	207
10.3 Intelligente Automaten	214
11. »Aus eins mach zehn ...«	227
11.1 Ratenansatz und Wachstumsgesetz	228
11.2 Explosives Wachstum	237
12. Begrenzter Lebensraum	245
12.1 Koexistenz	246
12.2 Konkurrenz	249
12.3 Entscheidungsspiel	257
13. Vom Ökosystem zur Industriegesellschaft	267
13.1 Analytische Ökonomie	268
13.2 Flüsse und Kräfte	271
13.3 Grenzen	276

TEIL IV: IM REICHE DER IDEEN	281
14. Poppers drei Welten	283
15. Vom Symbol zur Sprache	291
15.1 Information und sprachliche Kommunikation	292
15.2 Strukturen der Sprache	298
15.3 Molekulare Semantik	304
15.4 Irreversibilität und die Entstehung von Information	310
15.5 Molekulargenetik und generative Grammatik	313
16. Gedächtnis und komplexe Wirklichkeit	317
16.1 Evolutions- und Lernspiele	318
16.2 »Lernende« Netzwerke	326
17. Die Kunst der (richtigen) Frage	333
17.1 Deduktion contra Induktion	334
17.2 Das Experiment	338
18. Mit der Schönheit spielen	343
18.1 Sinn und Grenzen einer Theorie der ästhetischen Information	344
18.2 Rameau und Schönberg	350
18.3 Tonspiele	359
18.4 Kunst und Wahrheit	366
Danksagung	369
Literaturverzeichnis	371
Glossar	377
Personenregister	391
Sachregister	395

an-
her
de-
ien.
so
ge-
ind
ien,
an-
uch
nt-
cht
in
lich
we-
die
eine
lich
oji-
ho-
nde
in-
nen
Ver-
nos

Vorwort

Der naturwissenschaftlich interessierte Leser ist einer ständig anschwellenden Flut von Informationen ausgesetzt. Er mag sich daher oftmals in der Rolle eines Richters fühlen, vor dem die verschiedenen Autoren wie streitende, rechterheischende Parteien erscheinen. Tragen diese ihren Fall nur mit genügender Gewandtheit vor, so wird er auch bald gewogen sein, einem jeden von ihnen recht zu geben. Doch dann erscheint der Rezensent auf der Bildfläche und wendet ein, daß unmöglich alle gleichermaßen recht haben können, zumal doch der eine das Gegenteil von dem behauptet, was der andere sagt – und dem Leser bleibt gar nichts anderes übrig, als auch dem Rezensenten recht zu geben.

Diese altbekannte – von uns etwas abgewandelte – Anekdote enthält eine Lehre: Es könnten in der Tat *alle* recht haben, würde nicht ein jeder darauf bestehen, *allein* recht zu haben.

Alles Geschehen in unserer Welt gleicht einem großen Spiel, in dem von vornherein nichts als die Regeln festliegen. Ausschließlich diese sind objektiver Erkenntnis zugänglich. Das Spiel selber ist weder mit dem Satz seiner Regeln noch mit der Kette von Zufällen, die seinen Ablauf individuell gestalten, identisch. Es ist weder das eine noch das andere, weil es beides zugleich ist, und es hat unendlich viele Aspekte – so viele man eben in Form von Fragen hineinprojiziert.

Wir sehen das Spiel als das Naturphänomen, das in seiner Dichotomie von Zufall und Notwendigkeit allem Geschehen zugrunde liegt. Damit gehen wir in unserer Interpretation weit über das hinaus, was Huizinga ihm in seiner auf den Menschen zugeschnittenen Rolle zuerkennt. In der Anwendung auf die Kunst käme unsere Verallgemeinerung des Spielbegriffs eher den Auffassungen Adornos

verliert sich das Zufällige und gerät unter die Kontrolle des statistischen Gesetzes. Es kommt beispielsweise zum Ausdruck in der Selbstkontrolle der zufälligen Fluktuationen im Gleichgewicht oder ihrer Selbstverstärkung im evolutionären Prozeß. Die Entstehung des genetischen Codes, die Entwicklung der Sprachen, in denen wir unsere Gedanken übermitteln, das Ideenspiel künstlerischer Phantasie, sie alle basieren auf den gleichen fundamentalen Prinzipien der Evolution, wenngleich die Spielergebnisse im einzelnen der Laune und Abwandlungsfreudigkeit des Zufalls unterliegen.

Die Manifestation des Spiels der Materie in Raum und Zeit, seine Auswirkungen auf den Menschen werden vor allem in den zentralen Kapiteln des Buches angesprochen. Sosehr wir in der Darstellung der Molekularbiologie mit Jacques Monod übereinstimmen, so eindeutig grenzen wir uns in den auf den Menschen und die Gesellschaft bezogenen Schlußfolgerungen von ihm ab. In Monods Forderung nach »existentieller Einstellung zum Leben und zur Gesellschaft« sehen wir eine animistische Aufwertung der Rolle des »Zufalls«. Sie läßt den komplementären Aspekt des Gesetzmäßigen weitgehend außer acht. Die – unserer Meinung nach berechnete – Kritik an der dialektischen Überbewertung der »Notwendigkeit« sollte nicht zur völligen Leugnung ihres ganz offensichtlich vorhandenen Einflusses führen.

Wir stimmen Monod vollkommen zu, wenn er sagt, daß Ethik und Erkenntnis nicht beziehungslos nebeneinander stehen dürfen; doch verstehen wir darunter eher einen Auftrag an die großen Religionen und nicht gleich deren Verdammung. »So wenig die Naturwissenschaften einen Gottesbeweis hergeben, so wenig postulieren sie, daß der Mensch eines Gottesglaubens nicht bedarf« (S. 197).

Die Einheit der Natur äußert sich in den Gesetzmäßigkeiten, das heißt, in den Beziehungen *zwischen* den Strukturen, weniger in den Strukturen selbst. Von diesem »Motto« ausgehend, untersuchen wir im Teil IV eine Reihe von Problemen, die in neuerer Zeit mehr und mehr ins Blickfeld der Naturwissenschaften rücken und noch keineswegs als gelöst gelten können. Die Mechanismen der Erkenntnis stehen im Vordergrund unserer Betrachtungen. Im elementaren Detail laufen diese immer auf ein Falsifizieren im Sinne Karl Poppers hinaus. Dennoch können wir uns nicht vollständig mit der Meinung des großen Erkenntnislogikers identifizieren, vor allem wenn er behauptet: »Es gibt keine Induktion.«

entgegen, der sich hinsichtlich einer Identifizierung von Spiel und Kunst deutlich von Huizinga abgrenzt.

Ausgangspunkt für unsere Überlegungen waren die vor einigen Jahren ausgearbeitete Molekulartheorie der Evolution sowie die im Zusammenhang damit entwickelten Spielmodelle zur Simulation naturgesetzlicher Erscheinungen wie Gleichgewicht, Selektion und Wachstum. Wenngleich wir im vorliegenden Buch des öfteren auf Beispiele aus dem Bereich der Biologie zurückgreifen, so ist doch der Rahmen wesentlich weiter gespannt und schließt allgemein naturwissenschaftliche, philosophische, soziologische und ästhetische Gesichtspunkte ein. Worauf es uns ankommt, ist, das Spiel in seiner Metamorphose und seiner Symbolhaftigkeit darzustellen und im Lichte seiner alternativen Aspekte unser Weltbild und die existierenden Weltanschauungen zu reflektieren. Daß wir hierbei in Widerspruch zu denen geraten, die nur *einen* bestimmten Aspekt gelten lassen wollen, ist uns bewußt.

Der Abfassung des Manuskripts gingen zahllose Gespräche und Diskussionen, zu einem großen Teil mit Freunden und Kollegen, in unseren Engadiner Winter-Seminaren, auf Bergwanderungen und Skitouren (oder auch beim Veltliner) voraus. Zunächst erschien uns der Dialog als die angemessene Darstellungsform unseres Gedankenaustausches. Wir sind jedoch bald davon abgekommen; die klassischen Dialoge sind durchweg erfunden bzw. konstruiert. Simplicio und Salviati, zum Beispiel, bekamen ihre Rollen von Galilei zudikt. So entschieden wir uns für eine wechselseitige Bearbeitung durch beide Autoren, punctum contra punctum. Zwar haben wir uns mit unseren Ideen auch auf Gebiete vorgewagt, auf denen wir nur Dilettanten sind. Das mag man unseren Bemühungen zugute halten, Parallelen aufzudecken und damit die Einheit von Natur und Geist hervorzuheben.

Zum Inhalt des Buches möchten wir hier nur insoweit Stellung nehmen, als damit sein Bezug zum Titel erhellt wird. Auch die den einzelnen Kapiteln vorangestellten Einführungen sollen an das Thema heranführen, nicht einfach den Inhalt resümieren.

Zufall und Regel sind die Elemente des Spiels. Der Untertitel des Buches deutet ihre Wechselbeziehung an, wobei – korrekterweise – zu ergänzen ist, daß es die *Konsequenzen* des Zufalls sind, die einer Steuerung anheimfallen. Erst in der *großen Zahl* der Einzelereignisse

Gut! – Aber es gibt *verschiedene* Mechanismen der Falsifikation, die sich im Grad der induktiven Anpassung voneinander unterscheiden.

Eines der Hauptanliegen dieses Buches kommt im Teil III zur Sprache. Hier setzen wir uns vor allem mit der (unbewältigten) Hybris unserer Erkenntnis auseinander. Dürrenmatts »kategorischer Imperativ«: »Was alle angeht, können nur alle lösen« richtet sich ebenso an den Physiker, der auf Grund seines Wissens in der Lage ist, die Kräfte der Natur zu entfesseln, wie an den Biologen, der die Möglichkeit zur Manipulation des Erbmateri als oder zur pharmakologischen Beeinflussung psychischen Verhaltens sieht. Dieser Aufruf ist nicht minder dem Ökonomen und Politiker ins Stammbuch geschrieben, der die Voraussetzungen für ein lebenswertes Leben zu schaffen, zu erhalten und zu sichern hat.

Schwarzmalerei auf Grund einfacher Extrapolationen ist heute weit verbreitet. Durch Sparsamkeit allein ist das Problem der begrenzten Ressourcen nicht zu lösen. Ein Rohstoff, der bei der jetzigen Verbrauchsrate nach ca. fünfzig Jahren erschöpft wäre, würde bei Reduzierung des Verbrauchs (die nicht ohne Gefahren für die Stabilität der Wirtschaft ist) vielleicht hundert Jahre reichen. Oder anders ausgedrückt: Die Katastrophe könnte um fünfzig Jahre hinausgeschoben werden. Sollte man nicht alle Bemühungen viel eher auf die unbegrenzte Sicherung der Ressourcen – etwa durch Regenerierung der Rohstoffe in einer Kreislaufwirtschaft und der Erschließung hinreichend ergiebiger Energiequellen – konzentrieren? Wie immer man dieses Problem lösen wird, die Praktikabilität wird in jedem Fall einen Stop des Bevölkerungswachstums, wenn nicht gar eine Reduzierung der Weltbevölkerung zur Voraussetzung haben.

Wir sollten begreifen: Der Mensch ist weder ein Irrtum der Natur, noch sorgt diese automatisch und selbstverständlich für seine Erhaltung. Der Mensch ist Teilnehmer an einem großen Spiel, dessen Ausgang für ihn offen ist. Er muß seine Fähigkeiten voll entfalten, um sich als Spieler zu behaupten und nicht Spielball des Zufalls zu werden.

Manfred Eigen

Ruthild Winkler-Oswatitsch

Göttingen, September 1975

Teil I

Die Zähmung des Zufalls

Schrödinger

»Die physikalische Forschung hat klipp und klar bewiesen, daß zum mindesten für die erdrückende Mehrheit der Erscheinungsabläufe, deren Regelmäßigkeit und Beständigkeit zur Aufstellung des Postulats der allgemeinen Kausalität geführt haben, die gemeinsame Wurzel der beobachteten strengen Gesetzmäßigkeit – der Zufall ist.«

Erwin Schrödinger: »Was ist ein Naturgesetz«

(Antrittsrede an der Universität Zürich, Dezember 1922).

1. Vom Ursprung des Spiels

Das Spiel ist ein Naturphänomen, das von Anbeginn den Lauf der Welt gelenkt hat: die Gestaltung der Materie, ihre Organisation zu lebenden Strukturen wie auch das soziale Verhalten der Menschen.

Die Geschichte unseres Spiels reicht bis an den Anfang der Zeiten zurück. Es war die Energie des Urknalls, die alles in Bewegung setzte, die die Materie durcheinanderwirbelte, um sie nie wieder zur Ruhe kommen zu lassen. Ordnende Kräfte suchten das Auseinanderstrebende einzufangen, den Zufall zu zähmen. Doch was sie schufen, ist nicht die starre Ordnung des Kristalls. Es ist die Ordnung des Lebendigen. Der Zufall ist von Anbeginn unabdingbarer Widerpart der regelnden Kräfte.

Zufall und Regel sind die Elemente des Spiels. Einst von Elementarteilchen, Atomen und Molekülen begonnen, wird es nun von unseren Gehirnzellen fortgeführt. Es ist nicht der Mensch, der das Spiel erfand. Wohl aber ist es »das Spiel, und nur das Spiel, das den Menschen vollständig macht«¹. (S. 10)

Entstammen nicht all unsere Fähigkeiten dem Spiel? Zunächst dem Spiel der Muskeln und Gliedmaßen: Aus ziellosem Greifen und Strampeln wird präzise korrelierter Bewegungsablauf. Sodann dem Spiel der Sinne: Aus spielerischer Neugier wird tiefgreifendes Wissen, aus dem Spiel mit Farben, Formen und Klängen unvergängliches Kunstwerk. Das Spiel steht am Anfang der Liebe: das verstohlene, heimliche Spiel der Augen, der Tanz, das Wechselspiel der Gedanken und Gefühle, das Sichhingeben – im Sanskrit heißt die Verschmelzung der Liebenden *kridaratnam*, »das Juwel der Spiele«².

Jedes Spiel hat seine Regeln. Dadurch grenzt es sich von der Außenwelt, der Wirklichkeit, ab und setzt eigene Wertmaßstäbe. Will man »mitspielen«, so muß man sich dem geltenden Reglement unterwerfen – sonst ist man ein Spielverderber. Bei den Gesellschaftsspielen sind es im vorhinein getroffene Vereinbarungen, die den Ablauf des Spiels steuern und eine Wertskala definieren. Doch kann auch das bloße Resultat eines zufälligen Ereignisses auf seinen Ursprung zurückwirken und Antrieb für einen selbsttätigen Spielablauf werden. So hat das Leben zu spielen begonnen, so spielen unsere Gedanken und Ideen es fort:

»Mitten in dem furchtbaren Reich der Kräfte und mitten in dem heiligen Reich der Gesetze baut der ästhetische Bildungstrieb unvermerkt an einem dritten fröhlichen Reich des Spiels und des Scheins, worin er dem Menschen die Fesseln aller Verhältnisse

abnimmt und ihn von allem, was Zwang heißt, sowohl im Physischen als im Moralischen entbindet«³.

Wir wollen dem aus der Tiefe der Zeiten überkommenen und in der Unerschöpflichkeit unserer Ideen sich vollendenden Wechselspiel von Zufall und Gesetz nachgehen. Es ist das Gleichnis vom Glasperlenspiel, dessen Idee wir in die Wirklichkeit zurückversetzen wollen. Hermann Hesse beschrieb es als ein Spiel mit sämtlichen Inhalten und Werten unserer Kultur:

»Was die Menschheit an Erkenntnissen, hohen Gedanken und Kunstwerken in ihren schöpferischen Zeitaltern hervorgebracht, was die nachfolgenden Perioden gelehrter Betrachtung auf Begriffe gebracht und zum intellektuellen Besitz gemacht haben, dieses ganze ungeheure Material von geistigen Werten wird vom Glasperlenspieler so gespielt wie eine Orgel vom Organisten, und diese Orgel ist von einer kaum auszudenkenden Vollkommenheit, ihre Manuale und Pedale tasten den ganzen geistigen Kosmos ab, ihre Register sind beinahe unzählig, theoretisch ließe mit diesem Instrument der ganze geistige Weltinhalt sich im Spiel reproduzieren«³.

Glasperlen bergen etwas Geheimnisvolles in sich. Spiegelung und Brechung des Lichtes bringen sie zum Leuchten. In der Reflexion unserer Spielidee werden sie zum Leben erweckt. Ihre symbolhafte Bedeutung ist ständigem Wandel, ständiger Metamorphose unterworfen: vom Atom zum Kristall; vom Molekül zum Gen; von der lebenden Zelle zum intelligenten Wesen; vom Buchstaben zum Logos; von der Note zur Harmonie. Ihr Schicksal ist den Würfeln überantwortet und wird dennoch unsichtbar gesteuert von den Regeln des Spiels – so wie auch in der Natur der Zufall in den Bahnen physikalischer Gesetze gelenkt wird. Würfel und Spielregel – sie sind die Symbole für Zufall und Naturgesetz!

gar der Kampf zugrunde. Abgesehen davon, daß es ja auch viele Einpersonenspiele gibt, wie etwa das Patiencelegen, kennen wir auch echte kooperative Spiele, deren wesentliche Idee im Zusammenspiel liegt.

In ihrem Sommerpalast »Katsura« spielte die japanische kaiserliche Familie eine Art Fußball, das »Kemari« (ke = kick, mari = Ball), bei dem alle Mitspieler im Kreis um das Spielfeld laufen und versuchen, sich dabei den Ball so zuzuspielen, daß er nie den Boden berührt. Der Ehrgeiz des einzelnen Spielers beschränkt sich allein darauf, nicht derjenige zu sein, der den Ball verpaßt – ein wundervolles Vorbild für den Politiker.

Auch das Kind beginnt zunächst »nur um des Spieles willen« zu spielen. Bernhard Hassenstein⁶ weist auf diesen »autotelischen« Charakter des Kinderspiels hin. Er sieht seinen teleonomischen Wert im Hinblick auf die möglichen Anwendungen »im Ernstfall«. Doch wird – wie Johan Huizinga betont – damit die primäre Qualität des Spiels, seine Intensität, sein Vermögen »toll zu machen«, nicht berührt.

»Warum kräht das Baby vor Vergnügen? – Die Natur, so scheint der logische Verstand zu sagen, hätte doch alle die nützlichen Funktionen wie Entladung überschüssiger Energie, Entspannung nach Kraftanstrengung, Vorbereitung für Forderungen des Lebens und Ausgleich für Nichtverwirklichtes ihren Kindern auch in der Form rein mechanischer Übungen und Reaktionen mit auf den Weg geben können. Aber sie gab uns gerade eben das Spiel mit seiner Spannung, seiner Freude, seinem Spaß. Wir spielen und wissen, daß wir spielen, also sind wir mehr als bloß vernünftige Wesen, denn das Spiel ist unvernünftig.«²

Vielleicht sollten wir besser sagen: Spiel ist jenseits von Vernunft. Es hat nur Sinn in sich. Becketts Hauptfigur im »Endspiel« zieht das Fazit: »Da es so gespielt wird . . ., spielen wir es eben so.«

3. Mikrokosmos - Makrokosmos

Als Mikrokosmos bezeichnen wir die Welt der Elementarteilchen, Atome und Moleküle. In ihr spielen sich alle physikalischen Elementarprozesse ab. Der Zufall hat seinen Ursprung in der Unbestimmtheit dieser Elementarereignisse. Erst in der großen Zahl, das heißt in vielfacher Wiederholung, kennzeichnen sie das Erscheinungsbild der Materie im Makrokosmos. In der statistischen Überlagerung kann sich die Unschärfe der Einzelprozesse herausmitteln. Die Folge ist deterministisches Verhalten. Unter speziellen Bedingungen kann es aber auch zu einem Aufschaukeln der elementaren Vorgänge und damit zu einer makroskopischen Abbildung der Unbestimmtheit des mikroskopischen »Würfelspiels« kommen.

verschmelzen? Hierzu Richard Feynman:

»Wären die Elektronen im Kern lokalisiert, so würden wir ja ihre relative Position genau kennen. Das Unschärfeprinzip würde dann verlangen, daß die Elektronen einen sehr großen (weil unscharfen) Impuls, also auch eine entsprechend große Bewegungsenergie besitzen, die ausreichen würde, sie sofort wieder ausbrechen zu lassen.«

Natürlich zeigt eine solche Plausibilitätsbetrachtung nur – und darauf kommt es uns im Augenblick allein an –, wie man sich mit Hilfe von Erfahrungssätzen vor den unzulässigen Abstraktionen unseres Geistes schützen kann. Abstraktionen wie: Punkt, Unendlichkeit, Kontinuität, Parallelität und dergleichen sind in der Mathematik gang und gäbe, müssen aber in der Physik mit größter Vorsicht verwandt werden.

Der Hauptanteil des erkenntnistheoretischen Gewinns, der mit der Einführung der Unschärferelation verbunden ist, liegt im Verzicht auf Interpretation. Wahrscheinlichkeitsdenken an sich war der klassischen Physik, zumindest seit Maxwell und Boltzmann, keineswegs mehr fremd. Nur glaubte man eben, daß statistische Unschärfe ihre Ursache im Mangel an – im Prinzip verfügbarem – Detailwissen habe, nicht aber prinzipieller Natur sei. So ist dann auch bei den vielen Interpretationsversuchen der Unschärferelation, denen allen so etwas wie das »Suchen nach verborgenen Parametern« anhaftet, am Ende allein das mit der Erfahrung konforme Prinzip übriggeblieben.

Interpretation ist ein Vorgang, der sich in unserem Denkorgan, dem Gehirn, abspielt. Im allgemeinen handelt es sich dabei um einen kooperativen Prozeß: »Die Wissenschaft« interpretiert – das sind viele Gehirne, die darin übereinstimmen, daß einem gegebenen Sachverhalt etwas Reproduzierbares, Regelmäßiges und auf erkennbare Ursachen Zurückführbares, eben »Interpretierbares« zugrunde liegt.

Das Gehirn ist in allererster Linie ein Speicherorgan, aber die Speicherung selbst erfolgt bereits nach selektiven Kriterien. Die über die Sinnesorgane einfließende Information wird bewertet, das heißt: gefiltert, sortiert, mit der schon gespeicherten Erfahrung verglichen, neu kombiniert und schließlich eingeordnet. Karl Popper⁸ beschreibt diesen selektiven Vorgang als inhärent deduktiv. Er steht

3.1 Der Zufall

Die Elementarvorgänge im materiellen Geschehen entziehen sich grundsätzlich einer exakten raum-zeitlichen Darstellung. Voraussetzen über *Ort* und *Geschwindigkeit* der kleinsten materiellen Partikeln haben immer nur den Charakter von Wahrscheinlichkeitsaussagen. Dieses Grundpostulat der modernen Physik manifestiert sich in der von Werner Heisenberg formulierten Unschärferelation der Quantenmechanik, die besagt, daß man niemals *gleichzeitig* genau wissen kann, *wo* etwas ist und *wie schnell* es sich bewegt. An und für sich ist das Phänomen der Unschärfe schon aus der klassischen Schwingungslehre bekannt. Will man einen Ton genau identifizieren, so muß man eine bestimmte Zeitlang hinhören. Soll die dem Ton zugrunde liegende Schwingung von einem Empfänger aufgenommen werden, so muß sie zumindest für die Dauer einer oder mehrerer Schwingungsperioden auf diesen Empfänger einwirken. Andernfalls ist die Frequenz – die Zahl der Schwingungen pro Zeiteinheit – nicht exakt anzugeben.

Die fundamentale Bedeutung der Unschärferelation erklärt der Physiker Richard Feynman⁷ an einem Paradoxon der klassischen Physik:

Positive und negative Ladungen ziehen sich bekanntlich gegenseitig an, und zwar um so stärker, je kleiner der Abstand zwischen ihnen ist. Dieses Gesetz ist in seiner quantitativen Formulierung nach dem französischen Physiker Charles Augustin de Coulomb (1736 bis 1806) benannt. Wie kommt es nun, daß in den Atomen die positiven und negativen Ladungen fein säuberlich getrennt auftreten? Das kann nicht etwa daran liegen, daß der positiv geladene Atomkern den gesamten vom Atom beanspruchten Raum mit seiner Masse ausfüllt und dadurch die negativ geladenen Elektronen hindert, in ihn hineinzufallen. Die räumliche Ausdehnung des Kerns verhält sich zum Durchmesser der Elektronenbahnen nur etwa wie ein Stecknadelkopf zur Kuppel des St.-Peter-Doms (eine Tatsache, die einmal eine Medizinstudentin im Physikum auf eine diesbezügliche Frage mit Überzeugung antworten ließ: »Die Atome bestehen zum größten Teil aus Luft«).

Was hindert also die Elektronen, unter Abstrahlung elektromagnetischer Energie in den Atomkern hineinzustürzen und mit ihm zu

in Analogie zum »Lernprozeß« der Evolution, in dem die aus Ablesefehlern hervorgegangenen Mutationen ständigen Bewährungsproben ausgesetzt sind und dabei jeweils bis auf wenige »falsifiziert« werden.

Daß so etwas wie Abstraktion überhaupt möglich ist, liegt an einer inneren Konsistenz aller Naturvorgänge, einer Konsistenz von Bild und Spiegelbild. Gesetzmäßigkeiten könnten sonst kaum reproduziert und für alle Individuen übereinstimmend vom Gehirn reflektiert werden. Einen großen Teil des Verstehens macht das Zurkenntnisnehmen und Sichdarangewöhnen aus. Interpretieren läßt sich letzten Endes nur das, was durch Erfahrung und Experiment überprüfbar ist.

Für die Erkenntnistheorie bedeuteten die Ergebnisse der Quantenmechanik eine neue »Dimension«. Hatte nicht Ludwig Wittgenstein in seinem »Tractatus«⁹ gerade erst apodiktisch gefordert:

»Was sich überhaupt sagen läßt, läßt sich klar sagen; und wovon man nicht reden kann, darüber muß man schweigen.«

Wovon kann man dann eigentlich überhaupt noch »klar« reden, wenn alle Aussagen nur innerhalb gewisser Grenzen Gültigkeit besitzen? Selbst die Wegbereiter der modernen Physik – wie Max Planck, Albert Einstein und auch der Begründer der Wellenmechanik, Erwin Schrödinger – haben sich mit dieser letzten, prinzipiellen Konsequenz der Unschärferrelation nie abfinden können:

»Gott würfelt nicht.«¹⁰

Karl Popper⁸ schreibt in seinem Buch »Logik der Forschung« zum Thema Gesetz und Zufall:

»Man pflegt zu sagen, daß die Planetenbewegung strengen Gesetzen gehorcht, während ein Würfelspiel vom Zufall beherrscht ist. Nach unserer Auffassung besteht der angedeutete Gegensatz darin, daß wir die Planetenbewegung (bis jetzt) mit Erfolg prognostizieren konnten, nicht aber einzelne Würfelwürfe.

Zur Prognosendeduktion braucht man Gesetze und Randbedingungen; sie wird versagen, wenn man keine geeigneten Gesetze zur Verfügung hat oder die Randbedingungen nicht feststellen kann. Beim Würfelspiel fehlt es offenbar an den Randbedingungen: zwar ließe sich ein Würfelwurf bei hinreichend genau gemessenen Randbedingungen prognostizieren; die Spielregeln des »richtigen« Würfels jedoch sind so gewählt (Schütteln!), daß

Class
sie mit einer genauen Messung der Randbedingungen kaum vereinbar sind.«

Sehr viele Prozesse in der Wirklichkeit entziehen sich in der Tat nur deshalb einer exakten Beschreibung, weil wir die Anfangs- oder Randbedingungen nicht zur Genüge kennen. In dem von Popper gewählten Vergleich ist aber ein für die »Berechenbarkeit« wesentlicher Umstand außer acht gelassen worden, der nicht der *speziellen Form* der Randbedingungen zuzuschreiben ist.

Nehmen wir – als Vergleich zum Vergleich – an, wir befinden uns auf einer Bergtour. Da macht es einen großen Unterschied, ob wir (auf dem Wege zum Einstieg) durch eine Schlucht wandern, oder ob wir später entlang einer scharfen Gratkante zum Gipfel klettern. Im ersten Falle können wir sorglos sein. Es ist unbedeutend, ob wir mal ein wenig vom Pfad abkommen, wir werden automatisch immer wieder zur Talsohle zurückgelangen. Ganz anders ist es dagegen bei der Gratkletterei. Jeder Fehltritt könnte hier eine Katastrophe bedeuten.

Bei der Planetenbahn wirken sich (kleinere) Störungen nicht als Katastrophen aus, die Bahnkurve ist indifferent, während in der Würfelnbahn ständig instabile Phasen durchlaufen werden.

Der französische Mathematiker René Thom hat auf der Grundlage der Differential-Topologie eine Theorie entwickelt, mit deren Hilfe sich die strukturelle Stabilität materieller Systeme analysieren läßt; er nennt sie zu Recht »Katastrophentheorie«. Die Bahnkurve eines Würfelwurfs enthält viele Gabelungspunkte, an denen eine kleine Störung allein über das weitere Schicksal entscheidet. Stellen wir uns einmal einen Würfel mit ideal scharfen Kanten von atomaren Dimensionen vor. Die Ursache der Störung wäre dann im »Rauschspektrum« der thermischen Bewegung der Atome, die an den Würfelkanten sitzen, zu suchen. Aufgrund der Unschärferrelation ist ein solches Rauschspektrum jedoch nicht im Detail vorhersagbar. Man kann lediglich Durchschnittswerte errechnen. Für ein *stabiles System* würde eine solche Aussage genügen, um seine makroskopischen Eigenschaften deterministisch festzulegen. Für das *instabile System* trifft das dagegen nicht zu. Es ist anfällig gegen mikroskopische Störungen, die sich aufschaukeln, so daß der *mikroskopische* Zufall eine *makroskopische* Abbildung erfährt.

Diese im Typus des Phänomens begründeten Unterschiede wer-

den für die folgenden Betrachtungen über das Wesen der Zufallsentscheidung von allergrößter Wichtigkeit sein.

Alle unmittelbaren Eindrücke und Erfahrungen unserer Sinnesorgane beziehen sich auf den Makrokosmos. Aber auch hier haben wir uns längst daran gewöhnt, daß selbst ein im Einzelfall unbestimmtes Ereignis im Grenzfall der großen Zahl zum deterministischen Gesetz werden kann.

Wenn wir einen Versicherungsvertrag abschließen, so liegt das wirkliche Risiko, die Ungewißheit nämlich, ob dieser Abschluß sich auch wirklich lohnt, (nahezu) allein beim Kunden. Die Versicherungsgesellschaft wird immer ihren Gewinn davontragen, und um das zu garantieren, kalkuliert sie »statistisch«, das heißt unter Anwendung des »Gesetzes der großen Zahl«. Allerdings hinkt dieser – wie fast jeder – Vergleich etwas. Ein Bankrott der Versicherungsgesellschaft läßt sich nicht vollständig ausschließen. Dagegen gibt es im statistischen Verhalten der Materie den Fall, wir nennen ihn Gleichgewicht, wo auch bei einem im Einzelfall ungewissen Ausgang eine solche »Pleite« mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit vermieden wird. Das Versicherungsgeschäft gehört nicht in diese Kategorie der Statistik.

Als wesentliches Ergebnis der bisherigen Überlegungen halten wir fest: Alle Vorgänge der materiellen Welt – der unbelebten wie der belebten – basieren auf den (in gewissen Grenzen) unbestimmten elementaren Bewegungsprozessen kleinster Materieteilchen.

Wer aber ordnet, wenn zunächst alles dem Zufall überlassen ist, wenn alles »erwürfelt« werden muß? Wie kann ein bestimmter Zustand reproduzierbar auftreten, wenn es für die Elementarvorgänge unzählig viele Alternativen gibt? Wird sich nicht alles wie bei einer Schachpartie in den unübersehbaren Verästelungen des Entscheidungsbaumes verlieren?

3.2 Spiel von »Leben« und »Tod«

Gehen wir von einem konkreten Beispiel aus: Der makromolekulare Aufbau eines Eiweißmoleküls, das in unserem Organismus eine ganz bestimmte Aufgabe zu erfüllen hat, muß in allen Details aufrechterhalten werden. Beim Fehlen der von diesem Molekül repräsentier-

ten Funktion würde der Organismus zugrunde gehen. Andererseits wissen wir, daß materielle Strukturen oder Zustände generell eine begrenzte Lebensdauer besitzen. Das individuelle Proteinmolekül hat eine Lebenserwartung, die im Vergleich zum erreichbaren Alter des gesamten Organismus sehr klein ist. Es wird laufend abgebaut und muß daher in identischer Kopie auch ständig wieder aufgebaut werden. Nur so kann sich der in seiner materiellen Zusammensetzung begründete und funktionell auf den Organismus abgestimmte Zustand des Moleküls über lange Zeiten erhalten.

Ähnlich verhält es sich mit dem Gesamtorganismus eines Lebewesens oder gar mit ganzen Populationen, die – sollen sie nicht aussterben – sich ständig reproduzieren müssen.

Die Bevölkerungsdichte, das ist die Zahl von Individuen in einem abgegrenzten Lebensraum, hängt primär allein vom Verhältnis der Geburten- zur Sterberate ab. Das gilt nicht nur für alle Lebewesen, sondern auch für einzelne Zellen im Organismus und gar für einzelne Moleküle und Atome. Nur spricht der Physiker und Chemiker im letzteren Falle nicht von Geburt und Tod, sondern einfach von Bildung und Zerfall oder Auf- und Abbau.

Die Geburtenrate der Menschen übertrifft zur Zeit bei weitem ihre Sterberate. Wir sprechen von einer Bevölkerungsexplosion. In der Tierwelt kommt es dagegen oft vor, daß die Sterberate höher als die Geburtenrate ist. Viele Tierarten sind vom Aussterben bedroht.

Soll eine Bevölkerungszahl konstant bleiben, so müssen sich die Raten für Geburt und Tod exakt die Waage halten. Wenn zwei Summen, die beide aus einer großen Zahl identischer Einzelterme bestehen, einander *gleich* sein sollen, so muß jedem Term auf der einen ein solcher auf der anderen Seite entsprechen. Das ist aber wegen des Wahrscheinlichkeitscharakters materieller Einzelprozesse – letztlich aufgrund der Unschärferelation – gar nicht möglich. Selbst mit Hilfe eines eingebauten Kontrollmechanismus könnte man allenfalls erreichen, daß eine solche Gleichheit *im Mittel* über größere Zeitperioden erfüllt ist. Wäre es möglich, eine stationäre Populationszahl, in Momentaufnahmen projiziert, festzuhalten, so würde man bemerken, daß sie mal größer und mal kleiner ist als ihr stationärer Mittelwert.

Welche Bedingungen sind erforderlich, damit sich in einem Materiesystem von selbst eine *stabile* Ordnung einstellt? Dies ist eine

fundamentale Frage, die für das statistische Gleichgewichtsverhalten der Materie von ebenso großer Bedeutung ist wie für die biologische oder gesellschaftliche Selbstorganisation.

Betrachten wir doch einmal dieses Spiel zwischen »Leben« und »Tod«, in dem die beiden Kontrahenten um das Schicksal jedes Individuums würfeln müssen. Welche Strategien stehen ihnen zur Verfügung, und welchen Einfluß werden diese auf die Entwicklung der verschiedenen Populationen haben?

Die einzigen registrierbaren Fakten, an denen die Spieler sich orientieren können, sind die Populationszahlen. Es gibt im Prinzip drei Möglichkeiten, auf eine Veränderung der Populationszahl zu reagieren:

1. *Die Wahrscheinlichkeit für Geburt oder Tod hat einen definierten Mittelwert, der unabhängig von der Bevölkerungszahl bzw. deren Veränderungen ist.* Wir bezeichnen diese Art der Reaktion im Sinne der Spieltheorie als »indifferente Strategie« S_0 . Der Index »0« deutet an, daß die Raten durch die Populationszahlen *nicht* zu beeinflussen sind. Eine solche indifferente Strategie ist auf der Ebene der Moleküle gang und gäbe, *im Bereich der Biologie jedoch höchst unrealistisch*. Wo viele Menschen dicht beisammen leben, werden auch viele Geburten zu verzeichnen sein. – Der idyllische Kirchhof von Raron ist verschwindend klein im Vergleich zum Wiener Zentralfriedhof.
2. *Geburten- und Sterberate sind von der Größe der Population abhängig. Die Änderung der jeweiligen Rate erfolgt mit gleichem Vorzeichen wie die Veränderung der Populationszahl.* Das bedeutet: Bei wachsender Bevölkerungszahl nehmen auch Geburten- und Sterberate zu, bei einer Rückläufigkeit nehmen diese dagegen ab. Mit einer so gekennzeichneten »konformen Strategie«, die wir mit S_+ symbolisieren wollen, wird lediglich das Vorzeichen der Ratenänderung in bezug auf die Populationsänderung festgelegt. Die Art der Proportionalität bleibt dabei ausgeklammert. Sie muß keineswegs einfach (zum Beispiel linear) sein, obwohl eine solche in der Natur sehr häufig anzutreffen ist.
3. *Die Veränderung der Populationszahl wird mit einer Gegenläufigkeit der Rate beantwortet.* Dieses Verhalten definiert die

»konträre Strategie« S_- . Sie besagt im einzelnen: Wenn die Bevölkerung wächst, so sinkt die Geburten- und Sterberate. Umgekehrt erhöhen sich die Raten, wenn die Bevölkerung abnimmt.

Eine in diesem Sinne definierte gegenläufige Reaktion entspricht nur im Falle der Geburtenrate auch einer echten Gegensteuerung: Jede Änderung der Bevölkerungszahl wird durch die entgegengesetzt verlaufende Geburtenrate rückgängig gemacht. In bezug auf die Sterberate aber verursacht diese Strategie eine weitere Verstärkung der ursprünglichen Populationschwankung. Bei der konformen Strategie S_+ wirkt sich diese Korrelation gerade umgekehrt aus.

Wir müssen betonen, daß wir mit diesen Strategien lediglich eine Unterscheidung möglicher Reaktionsweisen vorgenommen haben. Welche Strategie im Einzelfall angewandt wird, ist weitgehend in der Natur der betreffenden Spezies begründet.

Bei den Materieteilchen sind es definierte chemische Eigenschaften: Reaktionsmechanismen, die für jede Molekülklasse festgelegt sind und die ihren Ursprung in physikalischen Kraftwirkungen haben. Die Vielgestaltigkeit der Natur ist so groß, daß in der Chemie alle Strategien vertreten sind, und zwar sowohl bei den Bildungs- als auch bei den Zerfallsreaktionen. Es gibt sogar Moleküle, die ihre Struktur in Abhängigkeit von der Umwelt verändern und damit auch ihre Strategie wechseln können. Derartig »intelligente« Moleküle treffen wir vornehmlich im Bereich der Biochemie an.

Die primitiven Lebewesen sind ebenfalls in ihren Verhaltensweisen weitgehend fixiert. Ja, sie haben sich in den frühen Stadien der Evolution erst dadurch zu sinnvollen Funktionsträgern entwickeln können, daß sie von bestimmten in der Natur angebotenen Molekülstrategien *selektiv* Gebrauch machten.

Der Mensch ist bereits in der Lage, seine Strategien innerhalb gewisser Grenzen seinen Lebensbedürfnissen anzupassen, wodurch es auch möglich ist, Sozialsysteme zu steuern.

In welcher Weise beeinflussen nun die verschiedenen Strategien den Zustand der Population? Wir wollen hier einmal im Sinne der Spieltheorie die beiden Kontrahenten – »Leben« und »Tod« – gegeneinander antreten lassen. Um das Schicksal der Population zu beschreiben, können wir so etwas wie eine Auszahlungsmatrix aufstel-

len. Im strengen Sinne ist es natürlich keine Auszahlungsmatrix, die den Gewinn explizit festlegt, denn es handelt sich weder um ein *endliches* Nullsummenspiel, noch sind die Strategien quantitativ, das heißt als vollständige Verhaltenspläne bestimmt. Dennoch ist die so erhaltene qualitative Übersicht recht instruktiv:

		„Leben“		
		S+	S ₀	S-
„Tod“	S+	++ variabel	+0 stabil	+-- stabil
	S ₀	0+ instabil	00 indifferent	0- stabil
	S-	-+ instabil	-0 instabil	-- variabel

Es resultieren drei Grundverhaltensweisen der Population: Wir bezeichnen sie als »stabil«, »indifferent« und »instabil«. Die vierte als »variabel« bezeichnete Verhaltensweise setzt sich aus den drei Grundtypen zusammen, die je nach quantitativem Zusammenhang abwechselnd in Erscheinung treten und das System von einem Zustand in den anderen überführen. Was ist nun im einzelnen unter diesen Begriffen zu verstehen?

1. »stabil«: Für einen gegebenen Populationswert halten sich Auf- und Abbauraten (Geburten- und Sterberaten) gerade die Waage. Jede kleine Veränderung des Populationswertes in positiver oder negativer Richtung wird eine oder auch beide Raten so beeinflussen, daß sie die Schwankung rückgängig machen. Der »stabile« Populationswert regelt sich also selbständig ein. Er ist durch interne Steuerung vor Katastrophen geschützt. Für große Populationszahlen hat diese Regelung stets deterministisches Verhalten zur Folge.
2. »indifferent«: Die Populationszahl kann alle möglichen Werte annehmen. Die Mittelwerte der Auf- und Abbauraten sind einander gleich. Da sie aber nicht von der Populationszahl abhängen, ist diese Gleichheit auch immer erfüllt. Es gibt weder rücktreibende noch verstärkende Kräfte. Jede Besetzung ist gleichberechtigter Ausgangszustand für weitere Schwankungen. Es gibt keinerlei regelnden Einfluß.
3. »instabil«: Ein gegebener Populationswert, bei dem sich Auf- und Abbauraten gerade kompensieren, ist »instabil«, wenn eine geringfügige Änderung eine oder beide Raten so beeinflusst, daß sie gerade diese Veränderung weiter verstärken. Dadurch wird eine lawinenartige Katastrophe ausgelöst, bei der entweder »Leben« oder »Tod« siegen, das heißt, es kommt entweder zur Bevölkerungsexplosion oder zum Aussterben der Art. Beide Katastrophen sind bei Koinzidenz der dafür verantwortlichen Strategien letztlich unausweichlich. Das Schicksal der Population ist somit eindeutig determiniert.

Diese drei Grundzustände treten in der Spielmatrix in der sogenannten Nebendiagonale (punktierter Linie) auf. Das interessantere Verhalten kommt aber in der Hauptdiagonale (ausgezogene Linie) zum Ausdruck. Wir hatten bereits vermerkt, daß der Begriff »variabel« alle drei Verhaltensweisen: »stabil«, »indifferent« und »instabil« einschließt und je nach quantitativem Zusammenhang einen dieser Effekte widerspiegelt. Der Mathematiker stößt hier auf die nichttrivialen Stabilitätsprobleme. Regelung und Selbstorganisation in Biologie und Technik basieren vor allem auf diesen in der Hauptdiagonale auftretenden Zuständen. Wir finden sie auf der Ebene der biologischen Makromoleküle sich selbst reproduzierender Strukturen, wo sie die Evolution einleiten. Sie begegnen uns

wieder in der Differenzierung der Zellen, der Morphogenese der Organismen, und sie liegen schließlich der Organisation von Information im Netzwerk unserer Nervenzellen sowie auch (in der Technik) den informationsverarbeitenden kybernetischen Systemen zugrunde.

4. Statistische Kugelspiele

Prototypen statistischer Prozesse lassen sich durch Kugelspiele simulieren. Als Spielelemente dienen Glaskugeln, die je nach Färbung unterscheidbare Arten von Atomen, Molekülen, Lebewesen, Zahlen oder Buchstaben repräsentieren. Ein quadratisches Spielbrett symbolisiert den (begrenzten) Lebensraum, in dem sich die verschiedenen Prozesse abspielen. Alle Felder der Spielfläche sind durch Koordinatenbezeichnung eindeutig festgelegt. Die Aufgabe des Zufallsgenerators wird von einem Würfelpaar wahrgenommen. Die Würfel sind – entsprechend der Größe des Spielbretts – durch die Platonischen Körper: Tetraeder, Kuben, Oktaeder, Dodekaeder oder Ikosaeder dargestellt. Jede Position auf dem Spielbrett kann mit gleicher a-priori-Wahrscheinlichkeit erwürfelt werden. Spielregeln steuern den Zufallsentscheid der Würfel und bestimmen damit das typische Verhalten individueller Populationen wie: indifferentes Driften, stabiles Gleichgewicht, instabiles Wachstum oder katastrophartigen Untergang.

flug«-Kugelspiels. Sie kombiniert die Strategien so, daß Stabilität, Wachstum und Variabilität stets nebeneinander erhalten bleiben.

5. Darwin und die Moleküle

Selektion basiert auf einer speziellen Kombination von Regeln, die ein variables Verhalten ganzer Klassen von Spezies – Molekülen oder Lebewesen – zuläßt. Dieses schließt sowohl die planlose Erzeugung eines breiten Spektrums von Varianten, die Stabilisierung des selektiven Vorteils als auch den Zusammenbruch von Populationen nachteiliger Arten ein. Das zugrunde liegende Konzept offenbart Selektion im Sinne Darwins als kategoriale Eigenschaft. Selbstreplikation bzw. komplementäre oder zyklische Reproduktion sowie Metabolismus sind unabdingbare Voraussetzung; darüber hinaus bedarf es der Erfüllung bestimmter »Umweltbedingungen«. Das Spielprinzip der Evolution ist Naturgesetz, doch die historischen Randbedingungen und die nicht festgelegte zeitliche Abfolge der unbestimmten Elementarereignisse bedingen die Einzigartigkeit des Details.

5.1 Selektion

Stellen wir uns vor, wir stehen am Bahnhof einer großen Stadt. Der Anschlußzug fährt erst in einigen Stunden ab. Zeit genug, um einen alten Bekannten zu besuchen. Wir haben lange nichts von ihm gehört und daher auch keine Ahnung, wo er jetzt wohnt. Wie würden wir am besten vorgehen, um den Freund ausfindig zu machen?

Sicherlich würde man nicht einfach durch die Stadt schlendern, in der Hoffnung, ihm schon irgendwo auf der Straße zu begegnen. Die Chance wäre viel zu gering. Ebenso wenig würde man der Reihe nach Straße um Straße abklappern und an allen Häusern die Türschilder nach seinem Namen absuchen. Die Methode hätte zwar einen gewissen Grad an Sicherheit, aber sie wäre wegen des Zeitaufwandes unpraktikabel – und töricht obendrein. Nein, man würde mit Überlegung selektiv vorgehen, zum Beispiel, indem man anhand bestimmter Kriterien den möglichen Aufenthaltsort systematisch eingrenzt.

Aus dem Telefonbuch läßt sich vielleicht die Adresse des Freundes erfahren, und wenn er nicht zu Hause ist, so wissen sicherlich die Nachbarn, wo er arbeitet. So werden wir bald seinen Aufenthaltsort ermittelt haben und ihm gegenüberstehen.

Ähnlich ist das beim bekannten Quiz »17 und 4«. Ein Gegenstand oder Begriff soll sukzessive durch Fragen, auf die man nur mit »ja« oder »nein« antworten darf, identifiziert werden. Es ist ganz klar, daß man nicht kreuz und quer darauflosfragt oder etwa routinemäßig nach einem Fragenkatalog vorgeht. Man wird vielmehr versuchen, aufgrund einer hierarchischen Klassifizierung der Fragen jeweils eine möglichst große Zahl von Alternativen auszuschließen und damit den gesuchten Gegenstand immer weiter einzugrenzen. Jede neue Frage hängt von der Antwort auf die vorhergehende ab – bis es keine Alternativen mehr gibt.

Den beiden Beispielen ist gemeinsam: daß nur eine unter vielen denkbaren Lösungen die richtige ist und daß diese möglichst rationell und schnell herausgefunden werden soll. Da ist es ebenso unzweckmäßig, einfach herumzuprobieren und sich auf den Zufall zu verlassen, wie etwa der Reihe nach systematisch *alle* Alternativen durchzugehen.

In dem im vorangehenden Kapitel besprochenen Ehrenfest-Mo-

dell sind *alle möglichen* Zustände durch die zeitunabhängigen Mittelwerte ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilung repräsentiert. Wird aber die Zahl der Alternativen sehr groß, so lassen sich diese schließlich innerhalb eines begrenzten Raumes nicht mehr realisieren. Die Chance, eine spezielle unter den zufällig vorhandenen Varianten zu finden, ist schließlich nicht größer als beim »Irrflug«-Modell, es sei denn, sie entsteht auch mit sehr viel größerer a-priori-Wahrscheinlichkeit als die restlichen. Ein Suchmechanismus auf der Grundlage eines Gleichgewichtsprinzips wäre vollkommen ungeeignet. Denn die bereits getesteten und falsifizierten Alternativen würden infolge ihrer Stabilität das räumlich begrenzte System nur blockieren und ein evolutionäres Ausprobieren neuer Möglichkeiten verhindern.

Komplexität ist ein für die Lebenserscheinungen typisches Phänomen. Schon für ein einzelnes Protein ist die Zahl aller denkbaren Molekülstrukturen so groß, daß diese sich innerhalb der räumlichen und zeitlichen Grenzen des gesamten Universums weder gleichgewichtsmäßig vertreten noch überhaupt abzählen ließen.

Wollen wir verstehen, wie in einem System dieser Komplexität eine funktionelle Ordnung entsteht, so können wir weder Gleichgewicht- noch »Irrflug«-Modelle zugrunde legen. Wir benötigen vielmehr die Instabilität, mit deren Hilfe eine eindeutige Auswahl unter vorhandenen Alternativen erzwungen und die Rückkehr in ein früheres, bereits durchmessenes Stadium verhindert werden kann. Allerdings darf die Instabilität nicht zu einem ähnlich unabwendbaren Ende wie in unserem Katastrophenspiel »Alles oder Nichts« führen. Die selektierte Variante selbst muß vielmehr (vorübergehend) stabilisiert werden und damit Bezugszustand für das Aus testen neuer Alternativen sein. Dazu bedarf es einer Kombination von Strategien, die in ihren Auswirkungen sowohl »Irrflug«, »Stabilisierung« als auch »Destabilisierung« einschließt. Wir wollen sie anhand eines Spiels vorstellen, dessen drei Versionen sukzessive zum Phänomen der Selektion führen.

Tafel 5: Kugelspiel »Selektion«

Gespielt wird auf einem quadratischen Spielbrett, dessen Felder durch Koordinatenbezeichnung gekennzeichnet sind. Dazu gehört ein passendes Würfelpaar (zum Beispiel zwei Oktaeder). Das Prinzip des Spiels wird am ehesten offenbar, wenn mehrere, z. B. vier oder sechs, verschiedene Kugelfarben verwendet werden.

1. *Version:* Alle Kugelfarben sind zu Spielbeginn in gleicher Menge auf dem Brett vertreten. Sie sind regellos verteilt und besetzen alle Felder. Im Reservoir befinden sich von jeder Farbe so viele Exemplare, daß mit einer Sorte nötigenfalls alle Felder ausgefüllt werden können.

Nun wird gewürfelt, wobei – strikt abwechselnd – die beiden folgenden Regeln angewandt werden:

1. Die erwürfelte Kugel wird vom Spielfeld entfernt und wandert ins Reservoir.
2. Die erwürfelte Kugel wird verdoppelt. Das heißt: Eine Kugel gleicher Farbe kommt aus dem Reservoir auf den soeben frei gewordenen Platz.

Bei strikter Alternierung beider Prozesse muß also nach einer *ungeraden* Zahl von Würfen immer ein *Leerfeld* vorhanden sein, während nach *gerader* Wurfzahl das gesamte Spielfeld *lückenlos* besetzt ist.

Die Partie ist beendet, wenn eine Kugelfarbe das gesamte Spielfeld erobert hat. Man kann den verschiedenen Farben unterschiedliche Gewinnpunkte zuordnen (zum Beispiel bei vier Kugeln: rot 6, blau 4, grün 2, gelb 1) und somit auch bei vorzeitigem Spielabbruch noch einen Gewinner ermitteln. Diese Gewinnpunkte sind in den späteren Versionen mit selektiven Vorteilen korreliert.

2. *Version:* Es gelten die Regeln der 1. Version. Jedoch wird bei jedem Wurf, der eine *Reproduktion* einleitet (also bei gerader Wurfzahl) zusätzlich ein Mutationswurf eingeschaltet. Soll anstelle einer Reproduktion eine Mutation auftreten, so definiert man beispielsweise die »sechs« auf einem kubischen Würfel als Mutation, während die übrigen Zahlen exakte Reproduktion bedeuten. Das heißt, daß die getroffene Kugel im Mutationswurf bei »eins« bis »fünf« verdoppelt wird, während bei »sechs« eine Kugel anderer Farbe (etwa der, die am wenigsten auf dem Spielbrett vertreten ist) ins Leerfeld kommt. (Die Mutationsrate kann vom Spieler beliebig variiert werden.) Der Effekt einer solchen gelegentlichen Mutation bei gleichbleibender Abbaurate bewirkt die Aufhebung einer eindeutigen Selektion.

3. *Version:* Die verschiedenen Kugelfarben werden mit unterschiedlichen Punktwerten ausgezeichnet. Das bedeutet, daß die mittlere Ab- und Auf-

baurate von Sorte zu Sorte variiert. Man verfährt so, daß man gleichzeitig mit den Koordinatenwürfeln einen Wertigkeitswürfel einsetzt. Für vier Kugelfarben gilt folgendes Wertschema:

Befindet sich auf dem erwürfelten Feld die Kugel:	so erfolgt bei den untenstehenden Punktzahlen des Wertigkeitswürfels:	
	<i>Herausnahme</i>	<i>Verdopplung</i>
rot	1	1, 2, 3, 4, 5, 6
blau	1, 2	1, 2, 3
grün	1, 2, 3	1, 2
gelb	1, 2, 3, 4, 5, 6	1

Hier besitzt Rot den höchsten und Gelb den niedrigsten Selektionswert. Für die rote Kugel ist die (mittlere) Aufbaurate sechsmal so groß wie ihre (mittlere) Abbaurate. Bei der gelben Kugel ist es gerade umgekehrt.

Da der Bewertungsmechanismus nicht mehr ein striktes Abwechseln von Herausnehmen und Verdoppeln erlaubt, muß jeweils so lange gewürfelt werden, bis die strikte Alternierung beider Prozesse verwirklicht ist. Nur so kann eine konstante Besetzung beibehalten werden.

Die starke Begünstigung der roten Kugel kann man durch ungleichförmige Anfangssituationen ausgleichen. Auf einem 8×8-Spielbrett werden zu Beginn der Partie 2 rote, 6 blaue, 16 grüne und 40 gelbe Kugeln gesetzt. (Auch in der Natur treten die »hochwertigen« Mutanten nur relativ selten auf.)

In diesem Spiel gewinnt immer nur eine Farbe. Es ist nicht *unbedingt* die Kugel mit dem höchsten Selektionswert. Die Punktzahl für den Sieger einer Partie richtet sich nach der Farbe: rot = 6; blau = 4; grün = 2; gelb = 1. Erst wenn man hier noch zusätzlich die Mutationsprozedur der 2. Version einführt, wird schließlich immer Rot gewinnen.

5.2 Was bedeutet »fittest«?

Im November des Jahres 1859 erschien im Londoner Verlag John Murray eins der größten und aufsehenerregendsten Werke der wissenschaftlichen Weltliteratur: Charles Darwins »The Origin of Species« (Der Ursprung der Arten)¹². Die wesentliche Idee, auf die Darwin sich in seinem Werk beruft, ist das »principle of natural selection«, das Prinzip der natürlichen Auslese. In seiner 1872 erschienenen sechsten Auflage – Darwin betrachtete sie als die endgültige,

der Nachwelt zu überlassende Fassung* – schreibt er: »This principle of preservation or the survival of the fittest, I have called Natural Selection.« (Dieses Prinzip der Erhaltung oder des Überlebens des am besten Angepaßten habe ich natürliche Auslese genannt.)

Leider ist Darwins Formulierung nur zu häufig und oft in dogmatischer Entstellung mißinterpretiert worden. Sehen wir einmal von einer vordergründigen Auslegung ab, die auf dem Wort »fittest« eine *absolute*, auch für den Menschen verbindliche Wertskala aufbauen zu können glaubt, so bleibt vor allem die Mißdeutung des Wortes »Prinzip«.

Ein Prinzip ist nicht geeignet, *historische* Wirklichkeit darzustellen – ebensowenig wie etwa aus den Prinzipien der Thermodynamik sich die Konstruktion eines Rolfs Royce ableitet. Zweifellos hat Darwin – und das ist ein von der Aufstellung des Prinzips ganz unabhängiges Verdienst – sehr viel Material über die *historische* Wirklichkeit der Evolution zusammengetragen. Das Prinzip ging daraus lediglich als abstrahierte Erfahrung hervor und fand erst sehr viel später, vor allem in den Arbeiten der Populationsgenetiker John B. S. Haldane, Ronald A. Fisher und Sewall Wright, eine exaktere Begründung. Obwohl die als neo-darwinistisch bezeichnete Schule in ihren Arbeiten die Voraussetzungen für die Selektion innerhalb einer gegebenen Population von Spezies mathematisch klar formulieren konnte, findet man bis auf den heutigen Tag unter den Biologen keine Einigkeit über die wahre Natur des Selektionsprinzips. Darwin selber ging von der realen Existenz lebender Populationen aus. Dabei blieb die Frage ausgeklammert, ob das Prinzip tautologischer Natur sei, ob es einen Erfahrungssatz darstelle, der die Eigengesetzlichkeit der belebten Materie belege, oder ob es eine aus fundamentalen Materieeigenschaften ableitbare Gesetzmäßigkeit zum Ausdruck bringe, die lediglich bei den Lebewesen bevorzugt in Erscheinung trete, aber keineswegs auf diese beschränkt sei. Es ist nur von historischem Interesse, welche Auffassung Darwin selber, der sich hier keineswegs klar geäußert hat, vertrat. Entscheidend ist, daß sich die Frage heute, nachdem die wesentlichen den

* Die erste Veröffentlichung erfolgte sehr überstürzt, nachdem Darwin erfahren hatte, daß unabhängig von ihm Alfred R. Wallace zu ganz ähnlichen Schlußfolgerungen gekommen war.

Lebenserscheinungen zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Mechanismen erkannt sind, eindeutig beantworten läßt.

Man kann im Reagenzglas unter künstlichen Bedingungen und in zellfreien Systemen Selektions- und Evolutionsverhalten im Sinne Darwins eindeutig reproduzieren¹³. Dabei ist es reine Semantik, ob man die materiellen Träger dieser Eigenschaft – auch wenn sie aus natürlichen Zellen isoliert wurden – als Evolutionsprodukte oder einfach als Makromoleküle bekannter chemischer Zusammensetzung ansieht. Im Prinzip kann der Chemiker solche Strukturen aus den Elementen synthetisieren. Man benutzt in den Evolutionsexperimenten allein aus Gründen der Zeitersparnis das von der Natur angebotene Material wie Enzyme und Nukleinsäuren.

Das Darwinsche Prinzip ist physikalisch erklärbar und bei genauer Spezifizierung der Voraussetzungen und Randbedingungen exakt begründbar. Das geht aus dem soeben beschriebenen Kugelspiel »Selektion« eindeutig hervor.

Die 1. Version zeigt, daß es viel mehr auf eine nach einem bestimmten Konzept erfolgende Reaktionsweise ankommt als auf ein unterschiedliches Verhalten der einzelnen dem Konkurrenzprozeß der Auslese unterworfenen Individuen oder Arten, wie es dann in der 3. Version vorausgesetzt wird. Wir haben hier ein Paradoxon, daß jedes Spiel mit einem eindeutigen Ausleseergebnis abschließt, obwohl sich die Konkurrenten in keinerlei Weise voneinander unterscheiden. Es kann mit Sicherheit bei jedem Spiel die *Tatsache* der Selektion vorausgesagt werden, nicht dagegen das *Detailergebnis*, nämlich *welche* Kugelfarbe selektiert wird (s. Abb. 8). Die

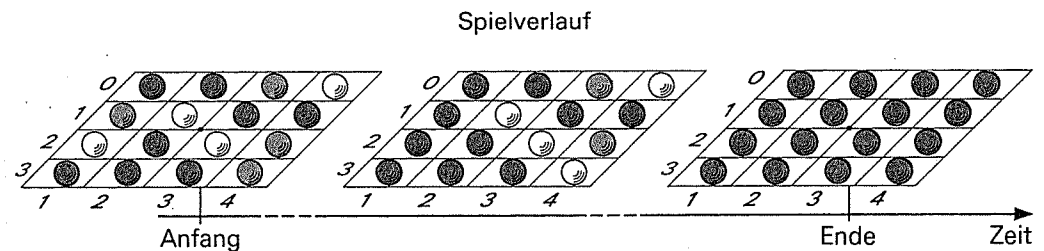


Abb. 8 »**Selektion**«. Das Spiel beginnt mit einer größeren Anzahl verschiedener Kugelsorten, die etwa in gleicher Menge repräsentiert sind. Allein durch alternierende Anwendung der Strategie S_+ für Auf- und Abbau der jeweils erwürfelten Kugel kommt es immer zur Selektion *einer* Kugelfarbe.

gener. Diffe.
Tatsache der Selektion ist vor allem eine Konsequenz der Anwendung der Strategie S₊ für den Auf- und Abbau der Kugelpopulationen. Sie ist nicht an *unterschiedliches* Verhalten der einzelnen Kugeln gebunden, obwohl sie quantitativ von diesen abhängt. Würden wir hier die Frage stellen: »Welcher der Konkurrenten ist »fittest«, welcher ist am besten angepaßt?«, so würde die Antwort lauten: »Der, der schließlich als Sieger aus der Konkurrenz hervorgeht.« Es gibt kein anderes Kriterium als das Resultat der Auslese selbst. Darwins Prinzip besteht in dieser Spielversion aus der bloßen Tautologie: »survival of the survivor«.

Für ein Verständnis der Selektion ist es wichtig, daß wir uns diesen singulären Fall, der eine Selektionswertentartung beinhaltet (und ausschließlich bei Wachstumsbeschränkung zu beobachten ist), klar vor Augen führen. Er zeigt, daß es in der Evolution auf einen bestimmten Mechanismus ankommt.

Andererseits handelt es sich hier um einen Idealfall, der in dieser extremen Form in der Natur gar nicht verwirklicht sein kann. Ein solches Verhalten hätte die vollständige Gleichheit der dynamischen Eigenschaften aller materiellen Träger der Evolution zur Voraussetzung. Die tautologische Interpretation hat die Populationsgenetiker zunächst sehr irritiert. Gerade bei einem so komplexen System wie einem Lebewesen ist es unmöglich, die für Geburt und Tod entscheidenden dynamischen Faktoren im vorhinein zu berechnen und somit voraussagen zu können, welcher der Konkurrenten »fittest« ist, und was dieser Begriff physikalisch bedeutet. Mithin blieb nur die tautologische Interpretation: »fittest« ist der, der überlebt.

Eine eindeutige Charakterisierung von Selektion ist demnach nur unter extremen Konkurrenzbedingungen möglich. Daß diese im allgemeinen im historischen Verlauf der Evolution nicht erfüllt waren, zeigt das Phänomen des »genetischen Driftens«, welches erst in den letzten Jahren aufgrund genauer Sequenzanalysen der biologischen Makromoleküle in verschiedenen phylogenetischen Entwicklungsstadien in seinen Auswirkungen vollständig erkannt wurde. Die Tatsache, daß man dieses Verhalten als »non-Darwinian« bezeichnete, ist auf die enge historische Auslegung von Darwins Prinzip zurückzuführen. Die Existenz des genetischen Driftens ist in der Art des Wahrscheinlichkeitsverhaltens selektiv (ungefähr) gleichwertiger Spezies begründet und im Rahmen des Selektionsspiels durchaus verständlich.

Wenngleich in den Wahrscheinlichkeitsansätzen der neo-darwinistischen Schule die logische Struktur der Darwinschen Aussage geklärt wurde, ist eine Zurückführung des Begriffs »fittest« auf molekularkinetische und thermodynamische Parameter sowie die experimentelle Überprüfung dieses Zusammenhangs erst auf der Ebene selbstreplizierender Makromoleküle gelungen. Dabei zeigt sich auch, daß die in Konkurrenz stehenden Individuen sich sehr wohl in den für die Selektion wichtigen physikalischen Eigenschaften unterscheiden: Man kann ihnen einen charakteristischen, physikalisch definierten und im vorhinein berechenbaren Selektionswert zuordnen. »Fittest« entspricht einem Optimum dieses Selektionswertes. (Der Begriff des Optimums wurde bereits auf S. 31 im Zusammenhang mit v. Neumanns Spieltheorie erklärt.)

Selektionsverhalten basiert also in allererster Linie auf den zur Anwendung gelangenden Strategien. Geburt und Tod, Bildung und Zerfall, beide bedienen sich hier der konformen Strategie S₊. Für die Zerfalls- bzw. Sterberate hatten wir S₊ längst als die durchaus *natürliche Strategie* erkannt: Wenn jedes Individuum eine von der Populationszahl *unabhängige* mittlere Lebenserwartung hat, so ist die Abbaurate der gesamten Population einfach proportional zur Zahl der vorhandenen Individuen. Bezogen auf die Bildungsrate bedeutet S₊ autokatalytische Vermehrung: Reproduktion. Diese ist unabdingbare Voraussetzung der biologischen Evolution. Darüber hinaus bedarf es ständiger Energiezufuhr, also eines Metabolismus, zur Unterhaltung der autokatalytischen Vervielfachung. Die Makromoleküle werden ständig aus energiereichen »Bausteinen« auf- und in energiearme Zerfallsprodukte abgebaut (s. S. 273). Das System darf nicht in den Gleichgewichtszustand übergehen, der für die Aufbaureaktion nur die Verwendung der konträren Strategie S₋ erlaubt, wie mit dem Ehrenfest-Modell gezeigt wurde. Diese – etwas komplexen, jedoch heute vollkommen durchschaubaren – Zusammenhänge sind an anderer Stelle ausführlich dargestellt¹⁴.

Die mit einem Metabolismus ausgerüsteten Lebewesen machen sämtlich von der Aufbaustrategie S₊ Gebrauch. Die sexuelle Fortpflanzung ist nur eine spezielle Spielart dieser generellen autokatalytischen Mechanismen. Auf der molekularen Ebene finden wir auch noch andere Formen der Autokatalyse und Reproduktion. In der Photographie läuft die Kopierung zum Beispiel über die Zwischen-

stufe eines Negativs. Ähnlich verfahren die molekularen Träger unserer Erbanlagen, die im Zellkern lokalisierten Nukleinsäuren. Sie kopieren über die Zwischenstufe des Komplementärstranges. Dieser Prozeß wird noch im 15. Kapitel ausführlicher beschrieben. Es existieren außerdem noch zyklische Reproduktionsverfahren. Die eigentlich interessanten Fragestellungen in der heutigen experimentellen Evolutionsforschung beziehen sich allein auf das *wie* der autokatalytischen Selbstorganisation.

Wir halten fest: Es gibt – bis hinunter zur molekularen Ebene materieller Organisation – eine Reihe von Mechanismen, die eine Reproduktion oder allgemeiner: die Anwendung der konformen Strategie S_+ in der Aufbaurate ermöglichen (das ist inhärente Autokatalyse). Die Tatsache, daß die Strategie S_+ verschiedene Realisierungsmöglichkeiten hat – z. B. lineare Autokatalyse, zyklische oder hyperzyklische Reproduktion (s. 11. und 12. Kapitel) –, bedingt darüber hinaus, daß bei einer Kombination der gleichen Strategie für den Auf- und den Abbau einer Population keineswegs immer das gleiche Resultat herauskommt. Ist die Aufbaurate höher als die Abbaurate, wird die Besetzungsdichte der betreffenden Spezies katastrophenartig anwachsen. Aufgrund der Verschiedenartigkeit der Mechanismen verändern sich aber beide Raten mit wachsender Populationsdichte so, daß die Abbaurate die Aufbaurate »einholen« und die bestangepaßte Spezies, oder eine bestimmte Gruppierung von solchen, stabilisieren kann. Daneben sind auch bei Konkurrenten (Mutanten) mit vergleichbaren Selektionswerten »Irrflug«-Situationen für die Besetzungsverteilung möglich. Sie sind die Quelle weiteren Fortschritts. Eine für das Zustandekommen eindeutiger Selektionsentscheidungen wichtige Bedingung ist die Begrenzung des Lebensraumes bzw. der zur Verfügung gestellten Aufbaustoffe und Energieträger. Im Spiel entspricht diese der Begrenzung des Bretts und der endlichen Zahl von Kugeln.

Auch in der Natur treten Beschränkungen im Lebensraum sowie in der Materie- und Energiezufuhr auf, doch selten in der Form so klar definierter Randbedingungen wie im Spiel. Daß Darwins Prinzip so oft mißinterpretiert wurde, liegt gerade darin begründet, daß man Gesetz und Randbedingung nicht klar genug auseinanderhielt. In der Natur gibt es keine Vorschrift, bestimmte Begrenzungen einzuhalten, wohl aber ist der für gegebene Randbedingungen gesetz-

mäßig formulierbare Ablauf der Evolution *Notwendigkeit*, wenn gleich auch innerhalb dieser noch eine Freiheit der individuellen Kopienwahl als Konsequenz einer undeterminierten Abfolge der Elementarereignisse existiert.

Bei der Deutung der Spielergebnisse müssen wir unserer Phantasie ein wenig freien Lauf lassen. Was im Spiel nur mit einer sehr geringen Zahl von Kugeln demonstriert werden kann, vollzieht sich in der Wirklichkeit mit unvorstellbar großer Variabilität. Ja, gerade wegen dieser komplexen Fülle möglicher alternativer Materiezustände bedarf es der Selektionsmechanismen. Sie allein können die äußerst seltenen lebensfähigen Varianten auswählen und vor dem Aussterben bewahren. Die Notwendigkeit, diese Mechanismen zu praktizieren, setzt bereits auf der Ebene der biologischen Makromoleküle – der Nukleinsäuren und Proteine – ein und liegt der Evolution aller die Erde bevölkernden Lebewesen zugrunde.

In der ersten Spielversion kommt klar zum Ausdruck, daß Eindeutigkeit der Auslese aus der Anwendung der konformen Strategie S_+ für Bildung und Zerfall folgt. Die zweite Version zeigt, daß Mutationen bei Gleichwertigkeit der Raten wieder Variabilität ins Spiel bringen. Erst in der dritten Version erleben wir die mit einer Vorzugsrichtung ausgestaltete Evolution, die aus dem Zusammenwirken von Reproduktion, Mutation und selektiver Bewertung resultiert und die wir mit dem von Darwin geprägten Begriff »survival of the fittest« umschreiben können. »Fittest« ist hier durch eine Bewertung nach den Gesetzen der molekularen Kinetik festgelegt und nicht mehr – wie in der 1. Version – allein ein Produkt des Zufalls. Zufällig ist, in *welcher Reihenfolge welche Mutationen* erscheinen. Gesetzmäßig notwendig ist, daß Mutationen auftreten und daß darüber hinaus das »Wenn-Dann«-Prinzip der Selektion gilt. Diese Kombination von Gesetz und Zufall ist hinreichend, die zeitliche Vorzugsrichtung der Evolution zu erklären.

In einer polemischen Schrift gegen die Selektionstheorie fanden wir folgenden Satz: »Man macht keine Umwege (sprich: planlose Mutationen), wenn man auf ein Ziel lossteuert.« Es ist richtig, daß der prozentuale Anteil vorteilhafter Mutationen im Verhältnis zur Gesamtzahl relativ klein ist. Es ist dagegen *nicht* richtig, daß die Mutation zielstrebig erfolgt. Erst durch die Selektion wird das Ziel eindeutig festgelegt – damit aber auch ein Umweg vermieden.

Dieses Beispiel zeigt deutlich die Gefährlichkeit einer gewissen Art von Argumentation, und wir möchten an dieser Stelle eine längst fällige Erklärung nachholen: Gleichnisse können die wissenschaftliche Beweisführung niemals ersetzen. Man kann allenfalls nach Abschluß einer Beweisführung versuchen, mit ihrer Hilfe komplexe Zusammenhänge darzulegen. Ein Beweis kann nur durch sorgfältige Analyse auf dem Boden *überprüfbarer* Naturgesetze erfolgen – unter Klarstellung der Voraussetzungen und ständiger Kontrolle der Ergebnisse, durch Experiment und Beobachtung. Freilich sind auch Fehlschlüsse möglich, doch wird man sie rücksichtslos ausmerzen, sobald sich auch nur die geringste Inkonsistenz mit der Erfahrung ergibt.

Ist nun die Strategienkombination (+ +) die einzige, die in der Lage ist, evolutionäres Verhalten zu erklären?

Eine genaue Analyse der Spielmatrix zeigt, daß die Kombinationen (+ +) und (--) im Grunde genommen gleichwertig sind. Man könnte also sowohl die Strategie S₊ als auch S₋ verwenden, sofern man dieselbe Strategie simultan für den Auf- und Abbau einsetzt. Diese Gleichwertigkeit existiert aber nur »de jure«, nicht dagegen »de facto«. In der Natur bedarf es ausgeklügelter chemischer Reaktionsmechanismen, um die konträre Strategie S₋ für beide Raten gleichzeitig zu realisieren. So gibt es Enzyme, die in der Lage sind, aufgrund einer Steuerung durch das Substrat ihre katalytischen Fähigkeiten an- und abzuschalten. Vor allem in den Reaktionszyklen der Gärung und Atmung wird von derartigen allosterischen Enzymen zur Regelung von Angebot und Nachfrage extensiv Gebrauch gemacht. Doch handelt es sich hier um hochspezialisierte singuläre Evolutionsprodukte. Es gibt keine Klasse von Makromolekülen, die sich generell durch eine solche Strategie auszeichnet. Überdies kann die Regelung nur in einem engen Konzentrationsbereich des Substrats wirksam sein. Gerade auf dem für die Evolution interessanten Gebiet sehr kleiner Konzentrationen – jede Mutante erscheint zunächst einmal als Einzelkopie – versagt diese Methode vollkommen.

Zur Selbstorganisation einer Molekülklasse benötigt man immer eine Strategie, die der gesamten betreffenden Klasse inhärent ist. Nur so ist eine kontinuierliche Entwicklung möglich. Aus diesem Grunde mußten von der Natur die Nukleinsäuren geradezu er-

funden werden. Alle Lebewesen spiegeln ihre fundamentale Reproduktionsstrategie S₊ wider, und diese war die wesentliche Voraussetzung für die molekulare Selbstorganisation lebender Strukturen. Allein wo im vorhinein programmierte Regelmechanismen eingesetzt werden, findet die konträre Strategie S₋ simultan für beide Prozesse Verwendung. Auch der Mensch bedient sich in seinen technischen Regelkreisen spezieller Schaltelemente, die diese Strategie simulieren.

Darwin waren derartige Einsichten ins Detail natürlich noch verwehrt. Die Überschrift zu diesem Kapitel stellt mit den Worten »Darwin« und »Moleküle« eine Verbindung her, die erst in unserer Generation durch die Molekularbiologie, man kann auch sagen: durch die großartige Gemeinschaftsleistung von Biologie, Chemie und Physik geknüpft wurde. Was Darwin durch scharfsinnige Beobachtung erschloß und auf eine einfache Formel brachte, findet in der Zurückführung auf die statistische Theorie der Materie ihre naturgesetzliche Bestätigung. Beide Disziplinen entstammen derselben historischen Ära. Ludwig Boltzmann und Charles Darwin waren Zeitgenossen. Jener führte die statistische Aussage in die Physik ein, dieser entdeckte die Gesetzmäßigkeiten in der Entwicklung der Lebewesen. Wir werden auf die Synthese dieser Erkenntnisse und damit auf die physikalische Begründung des Selektionsprinzips im Teil II noch zu sprechen kommen.

5.3 Überlebensspiel

Wir haben nunmehr alle prinzipiellen Strategien des Spiels kennengelernt. Auch in den klassischen Gesellschaftsspielen kommen diese – in mehr oder minder abgeänderter Form – vor. Natürlich lassen sie sich quantitativ in sehr spezieller Weise ausführen. Beispiele hierfür sind in den kooperativen Spielversionen enthalten und werden uns auch in den folgenden Kapiteln noch in mannigfacher Abwandlung begegnen. Als Prototyp eines Gesellschaftsspiels betrachten wir abschließend noch ein Selektionsspiel, in dem die bisher diskutierten Strategien kombiniert erscheinen. Seiner Natur nach ist es ein Überlebensspiel, wir nennen es daher »Survival«.

Tafel 6: Kugelspiel »Survival«

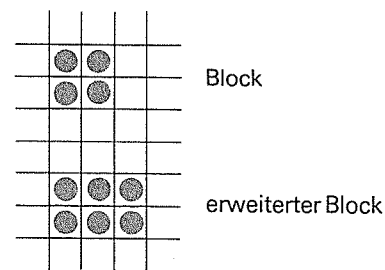
Es wird auf einem durch Koordinatenbezeichnung in 8×8 Felder eingeteilten Brett gespielt und – wie im Selektionsspiel – um das Schicksal der Kugeln gewürfelt. Geburt, Tod, Konkurrenz und Absicherung von Lebensraum kennzeichnen den Spielablauf, der sich zwar nach den in den vorangehenden Kapiteln diskutierten Regeln vollzieht, andererseits aber dem Spieler genug Freiheit läßt, die Zufallsentscheidung des Würfels mit Geschick zu seinen Gunsten auszunutzen. Sieger ist, wer am Ende die meisten auf »sicheren« Positionen befindlichen Kugeln hat.

Beide Spieler setzen zu Beginn abwechselnd Kugeln ihrer Farbe – nach taktischen Gesichtspunkten, um schon in dieser Phase möglichst viele Survival-Positionen zu erzielen –, und zwar bis die Hälfte aller Felder (32) bedeckt ist. Dann wird gewürfelt – wiederum strikt abwechselnd –, und hier gelten folgende Regeln:

1. Erwürfelt ein Spieler ein leeres Feld, so darf er eine Kugel (seiner Farbe) aus dem Reservoir auf dieses Feld setzen. Gibt es keine Kugel seiner Farbe mehr im Reservoir, so darf er eine seiner ungünstig platzierten Kugeln auf das getroffene Feld überführen. (Sollten sich seine Kugeln schon in günstigen Positionen befinden, so darf der Spieler passen.)
2. Wird ein Feld erwürfelt, das von einer gegnerischen Kugel besetzt ist, so muß diese entfernt werden, das heißt, sie kommt ins Reservoir. Das kann aber nur dann geschehen, wenn die Kugel *nicht* in einer Survival-Position liegt.
3. Wird ein Feld getroffen, das von einer eigenen Kugel – gleichgültig in welcher Konfiguration – besetzt ist, so wird diese verdoppelt. Hierzu entnimmt man dem Reservoir oder einer ungünstigen Position eine Kugel und platziert sie auf ein beliebiges leeres Feld. Darüber hinaus darf in diesem Falle der erfolgreiche Spieler noch einmal würfeln, wobei jeweils nach den Regeln zu verfahren ist. Wenn man weiterhin Glück hat, kann sich diese Prozedur beliebig oft wiederholen.

Die Felder erhalten hier strategische Bedeutung. Zu Beginn des Spiels sind alle Felder gleichwertig. Durch die Besetzung wird die Gleichwertigkeit aber aufgehoben. Dieser Effekt simuliert spezifische Wechselwirkungen zwischen materiellen Partikeln.

a) *Survival-Positionen*: Befinden sich vier Kugeln in einer Region (s. Abb. 9), die aus mindestens vier zusammenhängend, quadratisch angeordneten Feldern besteht, so sind diese »stabil« und können nicht mehr aussterben, es sei denn, sie werden durch feindliche Umzingelungsmanöver instabil.



Blockkomplettierung

Umzingelungen

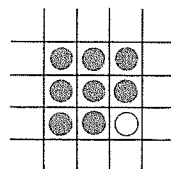
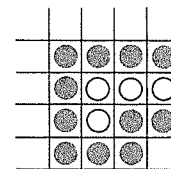
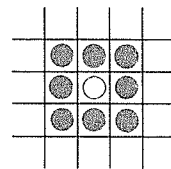
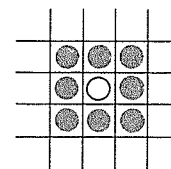
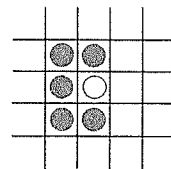
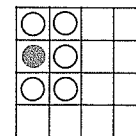
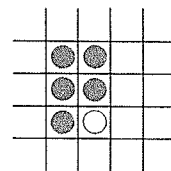
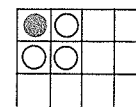
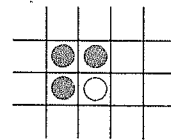


Abb. 9 Illustration verschiedener Survival-Positionen, die aus Blockkomplettierungen hervorgehen, sowie einige Beispiele für Umzingelungsmöglichkeiten.

Diese blockartigen Survival-Regionen können sich leicht ausdehnen, zum Beispiel erhält man durch Hinzufügen zweier Kugeln einen neuen Block. Bei Vollendung *jedes* neuen Viererblocks darf dem Gegner jeweils eine beliebige, nicht-stabile Kugel abgenommen werden, die dann ins Reservoir wandert. Entscheidend ist dabei, wie viele Blöcke durch den betreffenden Zug (gleichzeitig) entstehen (s. Abb. 9).

b) *Umzingelung*: Wenn eine gegnerische Region vollständig umzingelt ist, darf sie ausgeräumt werden, das heißt, diese Kugeln wandern ins Reservoir. Als Umzingelungsfronten gelten aber nur geschlossen besetzte Kugelreihen mit orthogonalen Kanten (s. Abb. 9). Auch Randfelder können umstellt werden.

Das Spiel endet, wenn ein Spieler *alle* ihm gehörenden Kugeln auf dem Spielbrett in stabilen (»survival«) Positionen untergebracht hat. Es zählen als Punkte alle Kugeln in Survival-Regionen. Sieger ist, wer die höchste Punktzahl erreicht.

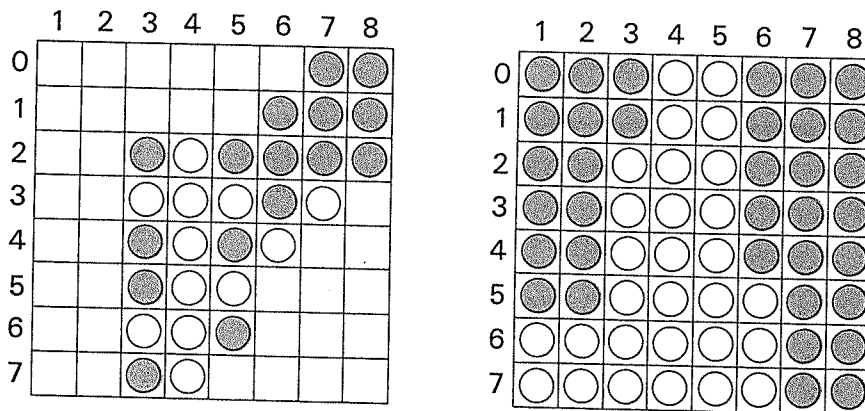


Abb. 10 »Survival«. Das linke Spielbrett zeigt eine typische Kugelverteilung nach Abschluß der »Setzphase«. Blau ist es gelungen, vier (überlappende) Survival-Blöcke zu bilden, wodurch Gelb vier Kugeln eingebüßt hat. Die Endverteilung nach der Würfelphase ist im rechten Schaubild wiedergegeben. Blau hat knapp gewonnen. In der Regel endet das Spiel mit ungleichförmigeren Kugelverteilungen.

Dieses Spiel ähnelt – rein äußerlich – dem japanischen Go. Das gilt vor allem für die Anfangsphase, in der die Kugeln nach gewissen strategischen Gesichtspunkten gesetzt werden. Diese Phase dient aber nur zum Aufbau einer – für den einzelnen Spieler mehr oder weniger vorteilhaften – Ausgangslage. Das eigentliche Selektionsspiel beginnt mit dem Würfeln, und jetzt können aufgrund der Regeln alle Möglichkeiten statistischer Fluktuationen auftreten.

Da gibt es zunächst die Regel, daß ein (beim Würfeln getroffenes) leeres Feld besetzt, ein vom Gegner okkupiertes Feld dagegen ausgeräumt werden darf. Diese Regel, für sich allein genommen, würde eine stabile mittlere Besetzung bewirken, wie sie zum Beispiel in den Gleichgewichtsspielen veranschaulicht wird. Sind viele Felder besetzt, so werden auch viele ausgeräumt. Jede Neubesetzung eines erwürfelten Leerfeldes entspricht einer »Urzeugung«. Eine solche fällt bei höherer Besetzungsdichte aber kaum ins Gewicht. Das Vermehrungsgesetz lebender Strukturen ist autokatalytischer Natur. Das heißt: nur da, wo schon Lebewesen vorhanden sind, können weitere entstehen. Die Verdoppelungsregel trägt dem Rechnung.

Würden Auf- und Abbau exakt proportional zur Zahl der besetzten Felder sein, so würde die Populationsdichte – wie im »Irrflug«-Spiel – unkontrolliert fluktuieren. Aus diesem Grunde wurden noch zusätzliche besetzungsabhängige »selektive Vorteile« eingeführt: Survival-Regionen, nochmaliges Würfeln, Umzingelungen usw. Diese bewirken eine »nicht-lineare« Zuspitzung des Spielverlaufs.

Alle drei Einflüsse: Stabilisierung, Driften und Destabilisierung bestimmen – wie in der natürlichen Selektion – den Spielablauf. Es hängt allein von der aus Zufallsentscheidungen resultierenden Situation ab, welcher Einfluß sich schließlich durchsetzt. Das »Survival«-Spiel schließt des öfteren mit einem Patt-ähnlichen Ergebnis ab. Es können sich aber auch Katastrophen ereignen, bei denen möglicherweise alle Kugeln eines Spielpartners aussterben. Das Auftreten solcher Katastrophen läßt sich in gewissem Maße durch die Spielstrategie verhindern, aber auch provozieren.

Gesellschaftsspiele sind zumeist so eingerichtet, daß die Spieler das Geschehen beeinflussen können. Die in den Tafeln 2 bis 5 besprochenen Kugelspiele sind dagegen so konzipiert, daß sie sich praktisch »von selber spielen«, denn sie simulieren natürliche Prozesse.