

Alfred Gierer

## „Finitistische" Erkenntnistheorie

Wie weit und in welchem Sinne sind Eigenschaften  
des Lebens physikalisch erklärbar?

### Biologie und Physik

Mit der Quantentheorie, die in den 20er Jahren unseres Jahrhunderts entwickelt wurde, scheint die Physik in ihren Grundlagen für denjenigen Energiebereich abgeschlossen, der für chemische und biologische Vorgänge von Bedeutung ist. Ihre Grundgesetze gelten für das Verhalten der relativ stabilen Bestandteile der Materie. Sie erklären die Eigenschaften der Atome und Moleküle, insbesondere die chemische Bindung. Sie haben sich in allen Bereichen der belebten Natur — von Bakterien bis zum Menschen — als gültig erwiesen. Damit stellt sich die alte Frage mit besonderer Schärfe, ob und in welchem Sinne die Physik Grundlagenwissenschaft der Biologie ist.

Versucht man die charakteristischen Eigenschaften lebender Systeme begrifflich so zu erfassen, daß auch die einfachsten Lebewesen, die Bakterien, in die Definition eingeschlossen sind, ergeben sich drei Merkmale für den Bereich des Lebendigen: Selbstvermehrung, Stoffwechsel und Mutation. Diese Merkmale zu erklären war die große Leistung der „molekularen Biologie" in den 50er und 60er Jahren: Erbsubstanz der Organismen ist Desoxyribonukleinsäure „DNS". Sie besteht aus langen Kettenmolekülen, in denen vier Typen von Gliedern in spezifischen Reihenfolgen angeordnet sind. Diese Sequenzen enthalten „genetische Information" analog zur Information in der Buchstabenkette einer Schrift. Die Sequenz der DNS-Bausteine bestimmt den Aufbau des Organismus. Seine Reproduktion beruht primär auf einem molekularen Kopiervorgang der Erbsubstanz DNS. Die DNS steuert die Proteinsynthese, und Proteine haben unter anderem die Funktion, den gesamten Stoffwechsel der Zelle zu lenken. Mutationen — zufällige Änderungen der Sequenzen der DNS-Bausteine — erfolgen z. B. als Folge von Kopierfehlern; Mutation und Selektion sind Voraussetzungen der Evolution der Organismen.

Die so skizzierte Molekularbiologie klärt allerdings nicht alle Grundprobleme der Biologie — im Gegenteil: Am meisten bewundern wir doch

in der belebten Natur zwei Eigenschaften, komplexe Gestalten und komplexes Verhalten. Sie hängen nur indirekt von der Erbsubstanz ab und wären nicht allein dadurch zu verstehen, daß man alle beteiligten Moleküle ermittelt und in einer Liste zusammenfaßt. Eine Erklärung erfordert andere Ebenen begrifflicher Erfassung. Gestalten und Verhalten sind Systemeigenschaften; notwendig ist daher eine Systemtheorie des Zusammenwirkens vieler Komponenten.

## Biologische Gestaltbildung

Bei der biologischen Strukturbildung wirken verschiedene Mechanismen zusammen. Dazu gehört die Selbstaggregation von Bestandteilen zu energetisch günstigen Konfigurationen, analog zur Kristallisation; viele intrazelluläre Strukturen, z. B. die Ribosomen, werden durch derartiges „self-assembly“ erzeugt. Auch ganze Zellen können durch spezifische Aggregation und Sortierung bestimmte, zum Beispiel geschichtete Strukturen bilden. Ein anderer Grundmechanismus ist die Umsetzung von Ordnung in der Zeit in Ordnung im Raum, etwa indem verschiedene Teile einer Struktur zeitlich nacheinander auswachsen. Sind erst einmal einige Strukturen vorhanden, so können weitere Teilstrukturen auf vielerlei Weise entstehen. Von besonderer biologischer Bedeutung ist dabei die Induktion: Kontakt von Gewebe eines Typs A mit Teilbereichen eines Gewebes von Typ B löst dort die Bildung von Gewebe eines dritten — „induzierten“ — Typs C aus.

Ein weiterer, besonders interessanter Vorgang der Strukturbildung ist die „Selbstgliederung“: Im Laufe der Entwicklung können anfangs fast einförmige Zellen und Gewebe verschiedene Teilbereiche ausbilden, ohne daß Wachstum oder Zellwanderung dafür notwendig wären. Prozesse dieser Art zeigen bemerkenswerte „ganzheitliche“ Regeleigenschaften. In manchen Fällen kann ein halbiertes früher Embryo noch ein ganzes Tier in verkleinertem Maßstab bilden. Diese erstaunlichen Fähigkeiten sich entwickelnder Organismen zur Selbstorganisation und zur Korrektur von „Fehlern“ hatten früher zu Zweifeln geführt, ob die gewöhnliche physikalische Denkweise den Vorgängen des Lebens überhaupt gerecht werden kann, ob hier nicht statt dessen eine besondere zielgerichtete „Lebenskraft“ angenommen werden muß.

Mechanismen dieser Art stellen nur einen kleinen Teil der Vorgänge der Entwicklung dar. Für das Verständnis der Logik des Generationszyklus sind sie aber wesentlich. Die genaue Reproduktion komplexer Strukturen erfordert, daß gelegentliche Fehler nicht verstärkt werden,

daß im Gegenteil Korrektur- und Ausgleichsprozesse stattfinden können; dies leisten „ganzheitliche“ Regelvorgänge.

Die biochemischen Vorgänge bei der Selbstgliederung sind zwar noch nicht aufgeklärt. Schon vor 37 Jahren aber konnte Turing — der gleiche Mathematiker, der zuvor die Entscheidungstheorie mitgegründet hatte — in einer theoretischen Untersuchung zeigen, daß gewöhnliche physikalisch-chemische Prozesse hierfür ausreichen: Gekoppelte chemische Reaktionen, die dem Massenwirkungsgesetz folgen, verbunden mit passiver Ausbreitung von Molekülen durch Diffusion sind in der Lage, aus annähernd einförmigen Anfangsverteilungen räumliche Konzentrationmuster zu erzeugen. In der Folge haben mein Kollege Meinhardt und ich versucht, Bedingungen zu charakterisieren, von denen eine derartige räumliche Strukturbildung abhängt, um die Beziehung dieser physikalisch-chemischen Voraussetzungen der Selbstorganisation zu den bekannten »ganzheitlichen« Regeleigenschaften der Entwicklungsbiologie zu analysieren. Dabei ergab sich, daß für die Ausbildung räumlicher Konzentrationmuster eine selbstverstärkende („autokatalytische“) Aktivierung notwendig ist, die mit längerreichweitigen Hemmeffekten gekoppelt sein muß. Ein kleiner Anfangsvorteil kann dann zu einer starken Aktivierung führen, aber Aktivierung eines Teilbereichs führt infolge der längerreichweitigen Hemmwirkung zur Verhinderung von Aktivierung in Nachbarbereichen, so daß eine räumliche Gliederung in aktivierte und nichtaktivierte Bereiche erfolgt. Es läßt sich nachweisen, daß physikalisch-chemische Mechanismen dieser Art „ganzheitliche“ Regeleigenschaften — wie die Anpassung der Größe der Teile an die Gesamtgröße eines Gewebes — in einfacher Weise ermöglichen.

Auf diesem Hintergrund lassen sich einige philosophisch interessante Aspekte biologischer Strukturbildung formulieren:

1. Was ist ähnlich, was ist verschieden bei biologischer und nichtbiologischer Strukturbildung? Gemeinsam ist sehr verschiedenen Vorgängen die Rolle der Selbstverstärkung. Man erkennt sie nicht nur bei biologischer Selbstorganisation, sondern auch bei der Bildung von Dünen, Lawinen, Sternen und Kristallen im anorganischen Bereich und bei unterschiedlichen sozialen Vorgängen: Wo Leute sind, ziehen Leute hin; Kapital erzeugt Kapital; Erfolg erzeugt Erfolg; Frustration erzeugt Frustration. Es gibt aber auch wesentliche Unterschiede zwischen biologischer und nichtbiologischer Strukturbildung. Wolken gleichen sich untereinander nur in wenigen, Elefanten in vielen Eigenschaften. Das liegt daran, daß bei der Wolkenbildung der statistische „Symmetriebruch“ eine große Rolle spielt, bei der Entwicklung des Tieres aus der Eizelle hingegen die Position und Orientierung der Teilstrukturen im Embryo nicht dem Zufall überlas-

sen ist, sondern unter der Kontrolle der Gene in einer genau geregelten Folge von Prozessen festgelegt wird.

2. Welches ist die Rolle mathematischer im Vergleich zu materiellen Erklärungsprinzipien beim Verständnis der Strukturbildung? Biochemische Kenntnisse allein — etwa eine vollständige Liste aller an der Strukturbildung beteiligten Moleküle — würden niemals unmittelbar einsichtig machen, warum z. B. die Hand fünf Finger hat. Aber auch Konzepte mathematischer Systemtheorie reichen für sich hierzu nicht aus. Sehr allgemeine Begriffe wie „Katastrophen“, „dissipative Strukturen“, „Bifurkationen“ haben nur einen begrenzten Erklärungswert — zum Verständnis der spezifisch biologischen Regeleigenschaften tragen sie ziemlich wenig bei. Zudem ist die molekulare Begründung des mathematischen Formalismus erforderlich, um sicher zu gehen, daß eine formale Theorie stimmt, und um weitergehende Fragen zu beantworten, wie z. B. die nach der Evolution strukturbildender Systeme. Die wissenschaftliche Aufklärung der Strukturbildung erfordert also letztlich die Verbindung molekularer *und* mathematischer Erkenntnisse. Unbenommen bleibt es uns dann, den einen oder anderen Aspekt interessanter zu finden, sei es den materiellen nach Demokrit oder den mathematischen nach Pythagoras und Plato.

3. Von besonderem Interesse ist die Beziehung zwischen *Strukturbildung* und *Strukturerkennung*. Kurzreichweitige Aktivierung und langreichweitige Hemmung sind nicht nur für die Ausbildung von Strukturen bei der *Entwicklung* von Bedeutung, sie spielen auch im Rahmen von Theorien der *Funktion* eine wesentliche Rolle, zum Beispiel in Zusammenhang mit Gestaltwahrnehmung und assoziativem Gedächtnis. Neurobiologisch ist sowohl kurzreichweitige Aktivierung als auch langreichweitige Hemmung experimentell nachgewiesen, und es ist leicht einsehbar, daß derartige Mechanismen geeignet sind, die Konturen eines Objekts im Sehfeld abzuleiten. Formale Ähnlichkeiten von Prinzipien der Strukturbildung und Strukturerkennung gehen vermutlich über dieses Beispiel hinaus. Sie sind für Theorien des ästhetischen Empfindens von Interesse; darüber hinaus rühren sie an sehr alte Probleme philosophisch-theologischer Spekulationen zur Beziehung von Schöpfung und Erkenntnis.

## Informationsverarbeitung im Nervensystem

Das eindrucksvollste biologische Merkmal des Menschen und der höheren Tiere ist die Leistungsfähigkeit des zentralen Nervensystems. Das Gehirn des Menschen enthält etwa 10 Milliarden Nervenzellen und ca. tausendmal mehr an Verknüpfungen zwischen den Zellen. Die einzelne Zelle verarbeitet eingehende elektrische und chemische Signale in ausgehende Signale und wirkt so als Schaltelement der Informationsverarbeitung, analog zum Schaltelement eines Computers. Zwar unterscheiden sich Nervennetze in wesentlichen Merkmalen erheblich von heute üblichen Computern. Für beide Arten von Systemen gilt jedoch das gleiche mathematische Prinzip: Was formalisierbar ist, ist mechanisierbar; jede genau definierte Leistung der Informationsverarbeitung kann bei ausreichender Rechenzeit und Speicherkapazität von einem Netz von Schaltelementen erbracht werden. Daher ist zu erwarten, daß jede noch so komplizierte, abstrakte, integrierende Leistung des Gehirns durch die physikalische Interaktion der Nervenzellen im Nervennetz zu erklären ist, sofern man die Leistung formal genau angeben kann. Dabei bleibt allerdings offen, ob alle Eigenschaften des menschlichen Gehirns formalisierbar sind — eine Frage, die im Zusammenhang mit der Leib-Seele-Beziehung zu diskutieren sein wird.

## Prinzipielle Grenzen wissenschaftlicher Erkenntnis

Insgesamt bestätigen die Erkenntnisse biologischer Forschung die Einheit der Natur in den Grundgesetzen der Physik. Sie gelten uneingeschränkt im Bereich des Lebendigen und erweisen sich als Erklärungsgrundlage der molekularen Genetik, der biologischen Strukturbildung und der Leistung von Nervensystemen im Gehirn.

Die Erweiterung der Physik zur Grundlagenwissenschaft aller Ereignisse in Raum und Zeit ergab aber auch philosophisch sehr bedeutsame Einsichten über Grenzen der Wissenschaft. Die Quantentheorie verzichtet auf mechanische Anschauung im Bereich des unsichtbar Kleinen; sie ist keine Theorie der Bewegung körperhafter Partikel, die sich zu bestimmten Zeiten an bestimmten Positionen befinden. Sie ist vielmehr Theorie des möglichen Wissens, und dieses Wissen ist wegen der unvermeidlichen Wechselwirkung des Meßvorgangs mit dem gemessenen Objekt begrenzt. Ein quantifizierbares Maß an Unbestimmtheit physikalischer Meßgrößen ist Naturgesetz. Die Auswirkungen der Unbestimmt-

heit beschränken sich nicht auf mikroskopische Dimensionen; es gibt vielmehr Prozesse, bei denen Einzelergebnisse an Atomen bzw. Molekülen zu makroskopischen Effekten verstärkt werden. Besonders betroffen sind hiervon bestimmte biologische Vorgänge: Die Mutationen ebenso wie die genetische Rekombination bei der sexuellen Vermehrung betreffen einzelne Moleküle der Erbsubstanz DNS und unterliegen daher der Quantenunbestimmtheit. Deswegen ist die Konstitution künftiger Lebewesen grundsätzlich nicht vorher berechenbar.

Die Quantenunbestimmtheit läßt sich durch eine Art gedanklicher Vermessung des Meßvorganges begründen, also durch die konsequente Analyse der Voraussetzung der Wissenschaft mit den Mitteln der Wissenschaft selbst. Auf analoge Weise ergaben sich prinzipielle Grenzen im Rahmen der Mathematik: Die Anwendung des formal-logischen Denkens auf formale Systeme zeigt die Grenzen der Formalisierbarkeit auf. In jedem halbwegs leistungsfähigen System der formalen Logik kann man Sätze formulieren, die mit den Mitteln des Systems nicht zu beweisen oder zu widerlegen sind, darunter immer auch der Satz über die Widerspruchsfreiheit des jeweils eigenen Systems. Dies weist uns letztlich darauf hin, daß jedes formale Denken auf intuitiven Voraussetzungen beruht, daß sich also das Denken nicht selbst vollständig erfassen bzw. absichern kann.

## Finitistische Erkenntnistheorie

Ich möchte hier neben physikalischer Unbestimmtheit und mathematischer Unentscheidbarkeit einen dritten Gesichtspunkt über prinzipielle Grenzen der Erkenntnis einführen und der folgenden Diskussion zugrunde legen: Die Endlichkeit der Welt begrenzt auch die wissenschaftliche Lösbarkeit von Problemen. In dieser Einsicht liegt der Ansatz zu einer finitistischen Erkenntnistheorie mit möglichen Konsequenzen für das Leib-Seele-Problem, für algorithmische Theorien der Evolution und für die Frage nach der „Reduzierbarkeit“ der Biologie auf Physik.

Möchte man allgemeine Eigenschaften komplizierter Systeme herausfinden und nachweisen, so bedarf es der gedanklichen Erprobung vieler verschiedener Möglichkeiten und einer umfangreichen Verarbeitung von Information. Dies kann unmittelbar vom menschlichen Gehirn oder mit Hilfe von Computern geleistet werden. Die Leistungsfähigkeit ist aber quantitativ begrenzt durch die endliche Zahl physikalischer Bestandteile im System der Informationsverarbeitung, seien es nun Nervenzellen oder elektronische Schaltkreise. In der Praxis ist die Grenze

durch die biologischen Eigenschaften menschlicher Gehirne sowie durch Umfang und Effizienz verfügbarer Computer bestimmt, aber solche rein praktischen Grenzen haben keine erkenntnistheoretischen Konsequenzen, ebensowenig wie praktische Schwierigkeiten der Weltraumfahrt Zweifel an der Realität von praktisch unerreichbaren Himmelskörpern aufkommen lassen. Prinzipielle Grenzen der Erkenntnis liegen aber dann vor, wenn sie durch physikalische Naturkonstanten bestimmt werden, und dazu gehören die Dimensionen des Kosmos im ganzen.

Das Universum ist von endlicher Masse, endlichem Alter und endlicher Größe. Stellen wir uns im Gedankenexperiment einen Computer vor, der so groß ist wie das ganze Universum und seit seinem Anbeginn ununterbrochen gerechnet hat. Das Universum enthält ungefähr  $10^{80}$  langlebige Elementarteilchen wie Protonen, Neutronen und Elektronen. Der größte denkbare Computer kann nicht mehr als  $10^{80}$  Bauelemente enthalten. Aber auch die Informationsverarbeitung pro Bauelement ist durch physikalische Gesetzmäßigkeiten eingeschränkt. Die Quantenphysik besagt nämlich, daß Zustandsänderungen eine Mindestzeit erfordern, wenn die Stabilität eines Partikels nicht in Frage gestellt werden soll; dies gilt natürlich auch für einen Rechenschritt, den ein Bauelement der Informationsverarbeitung ausführt. Rechnet man nun nach den Regeln der Quantenphysik aus, wie groß diese Mindestzeit für ein stabiles Partikel ist und schätzt man dann ab, wie viele solcher Mindestzeiten seit Anbeginn der Welt vergangen sind, so ergibt sich eine Zahl um  $10^4$ . Jedes Bauelement unseres gedachten Supercomputers könnte also nicht mehr als  $10^4$ , und der ganze Computer nicht mehr als  $10^{80} \times 10^4 = 10^{120}$  Operationen ausführen, auch wenn er so groß ist wie der Kosmos und so lange rechnet, wie das Weltall alt ist. Nun ist dies zwar ein reichlich irrales Gedankenexperiment, aber es zeigt uns doch eine oberste Grenze an — eine noch größere Anzahl von Operationen wäre mit den Gesetzen der Physik und der Endlichkeit des Kosmos prinzipiell unverträglich. Diese Überlegung kann als Grundlage einer finitistischen Erkenntnistheorie dienen: Der Endlichkeit der Welt entsprechen prinzipielle Grenzen der Erkenntnis. Was nur in  $10^{120}$  oder mehr gedanklichen Schritten der Informationsverarbeitung entscheidbar wäre, ist unentscheidbar.

Sicher kann man darüber streiten, ob derartige finitistische Argumente philosophisch tragfähig sind. Schließlich können wir uns in mathematischen Gedankenkonstruktionen noch viel mehr Operationen vorstellen. Wir haben aber Grund zur Vorsicht mit unseren „Vorstellungen“: Die Relativitätstheorie zeigte, daß es eine physikalische Obergrenze für die Geschwindigkeit von Signalen gibt, nämlich die Lichtgeschwindigkeit. Als diese Theorie noch neu und ungewohnt war, argumentierte man, daß wir uns noch schnellere Bewegungen — oberhalb der

physikalischen Obergrenze — vorstellen könnten; aber solche Gedankenexperimente führten zu unsinnigen oder falschen Schlüssen. So lernte man die Lichtgeschwindigkeit auch erkenntnistheoretische als maximale Signalgeschwindigkeit zu akzeptieren: Ein stimmiges Konzept für „Zeit“ erfordert letztlich die Anerkennung dieser physikalischen Obergrenze der Signalgeschwindigkeit. Analoge Argumente sprechen für die finitistische Erkenntnistheorie: Man kann sich zwar im Gedankenexperiment Entscheidungsprozesse mit noch mehr als  $10^{120}$  Einzelschritten vorstellen, aber die Schlüsse, die man mit solchen Extrapolationen ziehen würde, sind vermutlich unsinnig, jedenfalls aber ungesichert.

Nun gibt es durchaus gut definierte und sogar interessante Probleme, deren Entscheidung „superkosmische“ Anzahlen von analytischen Operationen erfordern würde. Mathematiker haben ganze Klassen derartig „schwer entscheidbarer“ Probleme beschrieben. Was die Beziehung der Physik zur Biologie angeht, so lassen sich eine Reihe von Fragestellungen angeben, die von einer finitistischen Erkenntnistheorie betroffen sein könnten: Gibt es Leben auch unter ganz anderen chemischen Bedingungen als denen, die wir auf der Erde vorfinden, und welche Merkmale würde es aufweisen? Diese Frage ist sicher nicht so zu entscheiden, daß man alle denkbaren Welten auf die Möglichkeit „Leben“ hin durchspielt. Auch die Frage, welche Merkmale von Lebewesen im Laufe der Evolution rein zufällig und welche mit Notwendigkeit sich entwickelt haben, könnte auf finitistisch bedingte Grenzen der Entscheidbarkeit stoßen.

### Die „Leib-Seele-Beziehung“: Grenzen der Dekodierbarkeit

Von besonderem Interesse sind solche Grenzen im Zusammenhang mit der Leib-Seele-Beziehung, dem schwierigsten, zugleich aber auch dem interessantesten Problemkreis im Grenzbereich zwischen Physik und Biologie: Welche Beziehung besteht zwischen physikalischen Vorgängen im Gehirn und bewußtem Erleben? Dies ist kein Scheinproblem; zwar läßt sich Bewußtsein nicht objektiv definieren, es ist uns unmittelbar gegeben in Form von Gefühlen, Absichten, Verhaltensdispositionen, Ängsten usw., aber wir können diesen Zustand durch Worte und Gesten ausdrücken und anderen mitteilen. Man kann sich anhand eines Synonymlexikons überzeugen, daß Tausende von Worten unserer Sprache dem geistig-seelischen Bereich angehören. Durch deren Kombination läßt sich eine ungeheure Vielfalt seelischer Zustände beschreiben.



Damit ergibt sich eine klare, wissenschaftlich definierte Fragestellung: Welcher Zusammenhang besteht zwischen seelischen Zuständen einerseits und dem objektiv meßbaren physikalischen Zustand seines Nervensystems im Gehirn andererseits?

Die meisten Theorien zum Leib-Seele-Problem lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Theorien der Leib-Seele-Interaktion und Theorien der Seele-Leib-Entsprechung. Interaktionstheorien, die letztlich auf Descartes zurückgehen, besagen, daß seelische Ereignisse unabhängig von physikalischen Prozessen entstehen und dann auf physikalische Vorgänge im Gehirn und im übrigen Körper einwirken. Dies würde jedoch der allgemeinen Gültigkeit der Physik im Gehirn widersprechen, da sie mit außerphysikalischen Einwirkungen auf physikalische Vorgänge unverträglich ist. Die empirisch gut bestätigte Gültigkeit der Physik im Gehirn spricht für Theorien der Leib-Seele-Entsprechung: Einem bestimmten physikalischen Gehirnzustand entspricht immer nur ein Bewußtseinszustand. Entsprechungstheorien gibt es in verschiedenen Varianten und begrifflichen Fassungen, z. B. in Form des psychophysischen Parallelismus (physikalische Gehirnprozesse und Bewußtseinsprozesse verlaufen zeitlich parallel in eindeutiger Zuordnung) oder des Monismus (physikalische Gehirnprozesse und bewußtes Erleben sind zwei Aspekte eines einzelnen, identischen Geschehens). Welche dieser Versionen man auch immer bevorzugt, Entsprechungstheorien („Jedem physikalischen Gehirnzustand kann nur ein Bewußtseinszustand entsprechen“) wird in der Regel die „selbstverständliche“ Konsequenz zugeschrieben, daß es eine algorithmische Theorie der Leib-Seele-Beziehung geben müßte („Wenn man den Gehirnzustand kennt, ist der Bewußtseinszustand berechenbar“). Ich möchte diese Konsequenz mit Argumenten finitistischer Erkenntnistheorie bestreiten.

Nehmen wir als Beispiel seelischer Zustände die Verhaltens-Dispositionen, die eine Person in der Gegenwart in bezug auf ihr zukünftiges Verhalten hat. Solche Dispositionen umfassen Absichten, Tendenzen, Strategien, die sich auf eine offene Zukunft beziehen. Sie sind gespeichert im Gehirn, sie sind zugänglich im Bewußtsein; deshalb eignen sie sich dafür, die Beziehung zwischen Gehirnzustand und Bewußtseinszustand zu diskutieren. Beispiel einer Disposition wäre: „Wenn der Winter sehr kalt wird, reise ich in den Süden.“ Selbst eine einfache Verhaltensdisposition gilt für eine ungeheure Anzahl physikalisch verschiedener Zustände, die in allgemeinen Begriffen (wie zum Beispiel „kalter Winter“) zusammengefaßt sind. Darüber hinaus ist aber auch die Zahl verschiedener möglicher Verhaltensdispositionen sehr groß. Im Prinzip sind diese Zahlen zwar endlich, und von einem rein mathematischen Standpunkt aus könnte man sagen, daß man wenigstens im Gedankenexperi-

ment einen Computer bauen könnte, der ein Abbild des Gehirns ist; damit müßte man doch mit genügend Arbeit und Geduld alle Möglichkeiten einzeln hintereinander prüfen können, um so die dem Gehirnzustand entsprechenden Verhaltensdispositionen zu ermitteln.

Dies stimmt aber nicht, wenn wir die Endlichkeit der Welt als grundsätzliche Erkenntnisgrenze ansehen — wenn wir also beachten, daß innerweltlich aus grundsätzlichen, physikalischen Gründen nicht mehr als  $10^{120}$  gedankliche, analytische Operationen ausführbar sind. Derartig große Zahlen — eine Eins mit 120 Nullen — treten nämlich schon bei ganz alltäglichen Problemen als Zahl der *Möglichkeiten* auf; die Zahl der *möglichen* Briefe verschiedenen Inhalts, auch wenn sie nur eine einzige Seite lang sind, ist noch viel größer. Das gleiche gilt für die Zahl möglicher physikalischer Zustände der Zukunft, auf die sich eine bestimmte Verhaltensdisposition bezieht; und die Anzahl verschiedener denkbarer Verhaltensdispositionen ist so groß, daß sie erst recht nicht in einem finitistischen Entscheidungsverfahren alle einzeln nacheinander daraufhin geprüft werden könnten, ob sie einem vorgegebenen Gehirnzustand entsprechen oder nicht.

Nun wird man, wie in anderen Bereichen der Naturwissenschaft, auch im Rahmen der Psychophysik viele allgemeine Zusammenhänge zwischen Hirnzuständen und Bewußtseinsvorgängen entdecken — kennen wir doch bereits heute zahlreiche Beziehungen zwischen physikalischen Einflüssen auf das Nervensystem wie etwa Reizungen, Unfallfolgen oder Drogen einerseits und seelischen Zuständen andererseits. Es kann aber kein allgemeines Verfahren geben, um jeden Zusammenhang mit finitistischen Mitteln aufzufinden. Es ist vielmehr zu vermuten, daß wesentliche Aspekte der Leib-Seele-Beziehung in einer sinnvoll begrenzten Zahl von Schritten nicht „dekodierbar“ sind, wie ja z. B. auch ein Geheimschlüsselcode so raffiniert verschlüsselt sein kann, daß er mit begrenzten Mitteln nicht zu entziffern ist.

Welche Aspekte des Bewußtseins sich einer vollständigen Theorie entziehen, darüber kann man nur Vermutungen anstellen. Hinweise geben Analogien zur mathematischen Entscheidungstheorie: Zu den mit keinem endlichen Verfahren entscheidbaren Sätzen gehört innerhalb jedes einigermaßen leistungsfähigen mathematisch-logischen Systems immer der Satz über die Widerspruchsfreiheit des eigenen Systems, also eine typisch „selbstbezogene“ Aussage. In Analogie hierzu sind die charakteristischen Eigenschaften des Bewußtseins, wie die Bildung von Verhaltensdispositionen, ebenfalls selbstbezogen: Sie werden von immer unvollständigen, oft widersprüchlichen „Selbstbildern“ mitbestimmt, von abstrakten Repräsentationen der Person in ihrem eigenen Gehirn. Vielleicht gehören solche multiplen Selbstbilder zu den Aspekten von Be-

wußtsein, die aus dem physikalischen Gehirnzustand nicht vollständig zu erschließen sind.

Es ist somit keine logisch zwingende Folge der Gültigkeit der Physik im Gehirn und der eindeutigen Beziehung des jeweiligen seelischen zum physikalischen Zustand, daß alle Verhaltensdispositionen in finitistischen Verfahren aus dem Gehirnzustand ableitbar sind. Wir haben vielmehr gute Gründe für die Vermutung, daß es Grenzen der Dekodierbarkeit der Gehirnzustände in bezug auf seelische Zustände gibt. Zwar folgt, nach allem, was wir wissen, das Gehirn den gleichen physikalischen Gesetzen wie eine Maschine; aber eine Maschine, die wir verstehen, könnte nicht alles wie ein Mensch, und eine Maschine, die alles könnte wie ein Mensch, würden wir nicht verstehen. Kennen wir den seelischen Zustand eines Menschen, ausgedrückt durch Sprache und Gestik, so wissen wir weit mehr, als dies durch eine noch so umfassende rein physikalische Analyse seines Gehirns möglich wäre. Wenn es aber keine vollständige, formale Theorie der Leib-Seele-Beziehung gibt, so ist kaum jemals eine vollständige, objektive Definition von Bewußtsein, und daher auch kein eindeutiges Kriterium für Bewußtsein, zu erwarten.

## Die „Physikalisierung“ der Biologie

Nach dieser kurzen Diskussion der Leib-Seele-Beziehung unter finitistischen Gesichtspunkten möchte ich die Beziehung der Biologie zur Physik im allgemeinen unter Aspekten finitistischer Erkenntnistheorie betrachten. Dabei möchte ich den Begriff „Reduktionismus“ zunächst weitgehend vermeiden und erst im letzten Satz auf ihn zurückkommen. Über die tatsächliche Beziehung der Biologie zur Physik wissen wir ziemlich viel. Die Frage, ob man diese Beziehung als „reduktionistisch“ bezeichnen soll oder nicht, ist hingegen weniger ein faktisches als ein semantisches Problem und hängt von der Definition des Begriffs „Reduktion“ ab. Fragen wir statt dessen, worin denn eigentlich die Einheit der Natur in den Grundgesetzen der Physik besteht, eine Einheit, zu der auch die belebte Natur einschließlich der Menschen gehört. „Einheit“ bedeutet, daß alles, was in der Natur objektiv beobachtbar ist, gedanklich mit den Grundgesetzen der Physik zu verknüpfen ist, und daß letztlich auf diese Weise alles mit allem vernetzt ist. Einheit bedeutet *nicht*, daß man bei genügender Anstrengung aus den Grundgesetzen der Physik allein alle Eigenschaften der Natur herleiten könnte.

Dieser grob zusammengefaßte Gedankengang sei etwas näher ausgeführt: Die Gesetze der Physik bilden die allgemeine Erklärungsgrund-

lage der objektivierbaren Vorgänge in Raum und Zeit, einschließlich chemischer und biologischer Prozesse. Erklärung erfolgt in Stufen. Zunächst kommen wir durch Anschauung und Erfahrung zur begrifflichen Fassung dessen, was wir erklären wollen; erst über eine Kette von Zwischenstufen führen die Erklärungen auf die Grundgesetze der Physik. In der Biologie, zum Beispiel, erklären wir Lebensvorgänge unter anderem mit Hilfe des Begriffs der Vererbung, Vererbung durch Gene, Gene als DNS, die Funktion und besonders die Selbstvermehrung der DNS durch die physikalisch-chemischen Eigenschaften der molekularen Bestandteile von DNS, und diese wiederum durch Wechselwirkung von Atomkernen und Elektronen entsprechend den Grundgesetzen der Quantenphysik. Ohne Anschauung und Erfahrung, nur durch Nachdenken über die physikalischen Grundgesetze selbst, könnte man nicht herausfinden, daß es Leben gibt und wie es beschaffen ist. Die physikalisch begründete Erklärung hebt die Unterschiede zwischen belebter und unbelebter Natur keineswegs auf; sie macht im Gegenteil die unterscheidenden Merkmale — Selbstvermehrung, Stoffwechsel und Mutation — einem naturwissenschaftlichen Verständnis erst richtig zugänglich.

„Einheit der Natur“ heißt also keineswegs, die verschiedenen Erscheinungen der Natur seien „in Wirklichkeit“ „nichts als“ Physik, sie bedeutet vielmehr, daß alles Geschehen in Raum und Zeit den gleichen einfachen, abstrakten, dem menschlichen Geist zugänglichen Gesetzmäßigkeiten folgt, und auf diese Weise alles mit allem verknüpft ist. Die so erfaßte Einheit ermöglicht, ja verlangt, für jeden Zweig der Wissenschaft, wie Biologie und Chemie, seine eigene Begrifflichkeit und spezialisierte Methodik. Nur in dieser qualifizierten Form dürfen wir von der „Einheit der Natur in den Grundgesetzen der Physik“ sprechen. Die Physik ist die Erklärungsgrundlage für alle Ereignisse in Raum und Zeit. Die Erklärung selbst ist sie für sich allein nicht.

Nun kann man einwenden, daß die moderne Informatik, die Forschung über künstliche Intelligenz, zu Computern mit immer weitergehenden Fähigkeiten führt. Warum sollen diese nicht — in der Analyse der denkbaren Konsequenzen der Grundgesetze der Physik — schließlich Begriffe bilden, und warum sollen darunter nicht auch Begriffe wie „Leben“ und „Gen“ sein, warum sollen sie nicht unter den Möglichkeiten physikalischer Erscheinungen Voraussetzungen des Lebens entdecken, zum Beispiel kopierfähige Moleküle nach Art der DNS — auch ohne zuvor eine „Anschauung“ vom wirklich existierenden Leben zu haben? Warum schließlich sollten sie nicht Pflanzen und Tiere in ihren Grundmerkmalen, vielleicht sogar in ihren wesentlichen Erscheinungsformen, ermitteln? Wenn aber ein Supercomputer der Zukunft so etwas im Prinzip könnte — wenn er allein aus den Gesetzen der Physik in mathema-

tisch-logischen Operationen das „Prinzip Leben“ und seine Erscheinungsformen ermitteln könnte, ohne zuvor etwas von „Leben“ zu wissen —, wäre dann nicht „Leben“ doch auf Physik reduziert?

Ich meine, daß dieses Argument an der finitistischen Erkenntnistheorie scheitert. Ein Computer mit unbegrenztem Gedächtnis und unbegrenzter Rechenzeit mag dahin gelangen — jedenfalls läßt sich das logisch nicht ausschließen —, aber innerweltlich, finitistisch, so ist zu vermuten, ist dies nicht möglich; dafür gilt weiterhin: Anschauung, Erfahrung und begriffliche Erfassung von „Leben“ sind primäre Voraussetzungen für das Verständnis von Leben. Die physikalische Erklärung der Erscheinungen im Bereich des Lebendigen ist kein Argument für Reduktionismus mit Vollständigkeitsanspruch: Es wäre falsch zu behaupten, Biologie sei „nichts als“ Physik.