

Johannes Haas SJ

Künstliches Leben?

Um die Weihnachtszeit vorigen Jahres ging durch die Presse der ganzen Welt die Nachricht, daß es einer Gruppe von Wissenschaftlern in den Vereinigten Staaten von Amerika gelungen sei, biologisch aktive DNS synthetisch im Reagenzglas herzustellen. Diese Mitteilung wurde als so bedeutsam angesehen, daß sie sogar von Präsident Johnson in eine seiner Reden aufgenommen wurde. Von vielen Kommentatoren wurde die Leistung der amerikanischen Forscher als Produktion lebender Substanz und künstliche Erzeugung von Lebewesen gewertet. Worum handelte es sich dabei eigentlich? Unter der Leitung des Nobelpreisträgers Arthur Kornberg hatte ein Forscherteam die in dem Bakteriophagen ΦX 174 enthaltene DNS in einem zellfreien System synthetisiert und darüber hinaus gezeigt, daß die so entstandene DNS biologisch aktiv war, das heißt sich in allen Stücken so verhielt wie die DNS infektiöser Phagenteilchen. So schnell man diese Mitteilung niederschreiben und lesen kann, so schwierig ist es, Inhalt und Tragweite einem der modernen Molekularbiologie ferner stehenden Leser nahezubringen.

Die Proteine und ihre Primärstruktur

Beginnen wir mit den drei Buchstaben DNS. Sie stehen als Abkürzung für Desoxyribonukleinsäure, die gewissermaßen den Mittelpunkt der Molekularbiologie bildet. DNS ist die chemische Trägerin der in allen genetischen Systemen gespeicherten erblichen Informationen, man nennt sie deshalb kurz auch die Erbsubstanz. Genetische Systeme sind die aus dem Biologieunterricht bekannten, in allen Zellkernen vorkommenden Chromosomen, ferner die in Bakterien und sonstigen niederen Lebewesen enthaltenen chromosomenartigen Gebilde, sowie die DNS von Viren und Bakteriophagen. Viren sind den meisten bekannt als Erreger gefährlicher Krankheiten, wie Virusgrippe, Poliomyelitis, Tabakmosaikkrankheit und andere. Bakteriophagen können als virusartige Gebilde gekennzeichnet werden, die bestimmte Bakterien infizieren und sie zur Auflösung bringen können (von *phagein* = aufzehren, fressen). Allen genetischen Systemen gemeinsam ist, daß sie DNS als Trägerin von Erbinformationen enthalten, und daß sie diese DNS zusammen mit der in ihr enthaltenen Information verdoppeln und an Nachkommen weitergeben können.

Die Erbinformationen beziehen sich auf den exakten chemischen Bau – man sagt die Primärstruktur – von Proteinen oder Eiweißkörpern. Proteine spielen eine Schlüsselrolle bei allen Lebenstätigkeiten der Zellen. Diese bestehen im Grunde aus einer Viel-

zahl biochemischer Reaktionen an organischen Verbindungen. Biochemische Reaktionen können bei dem in der Zelle herrschenden Säuregrad – dem sogenannten pH- und Temperaturbereich nur mit unendlich kleiner Geschwindigkeit ablaufen; sie können aber ganz erheblich beschleunigt werden durch die Mitwirkung bestimmter Stoffe, die man Katalysatoren nennt. Ein Katalysator wirkt ähnlich wie ein Schlüssel. Man kann eine Tür unter Aufwand großer Kraft öffnen – oder vielleicht auch nicht; besitzt man aber den passenden Schlüssel, so geht das Öffnen schnell und leicht vor sich. Die in der lebenden Zelle enthaltenen Katalysatoren sind samt und sonders Proteine, man nennt sie Enzyme oder Fermente. Wie zu jeder Tür ein anderer Schlüssel paßt, so gehört zu jedem biochemischen Reaktionstyp ein anderes Enzym, und weil das elementare Lebensgeschehen in der Zelle sich aus sehr vielen Reaktionstypen aufbaut, so braucht jede Zelle zahlreiche Proteinsorten. Eine so einfache Zelle wie das nur einige tausendstel Millimeter messende Bakterium *Escherichia coli* (*E. coli*) braucht mehrere tausend von ihnen, für die Zellen des Menschen schätzt man die Anzahl der in ihnen enthaltenen Enzymtypen auf etwa 10 000.

Jede Zelle ist fähig, ihre Enzymproteine selbst zu synthetisieren. Wie „weiß“ aber eine Zelle, in welcher Weise die einzelnen Proteinsorten hergestellt werden sollen? Dieses „Wissen“ ist als Erbinformation in der DNS ihres genetischen Systems gespeichert, ähnlich wie eine gute Hausfrau die Rezepte für Tausende von Gerichten in ihren Kochbüchern besitzt. Über dieses Enthaltensein der genetischen Informationen in der Erbsubstanz hat die Molekularbiologie erst in den letzten Jahrzehnten folgende Einzelheiten in Erfahrung gebracht:

Die Proteine sind hochmolekulare Stoffe mit einem Molgewicht, das nicht selten in der Größenordnung von Hunderttausend liegt. Sie bestehen aber aus kleinmolekularen Bestandteilen, den Aminosäuren, von denen zwanzig verschiedene Sorten zum Bau von Proteinen herangezogen werden. Die meisten Proteine bestehen aus 100–300 Aminosäuren, sie werden chemisch zu langen fadenartigen Molekülketten, den sogenannten Polypeptidfäden zusammengefügt. Dabei kommt es darauf an, welche Aminosäuresorten zum Bau einer bestimmten Proteinsorte herangezogen und in welcher Reihenfolge sie im Polypeptidfaden angeordnet werden. Diese beiden Momente zusammen machen die Primärstruktur einer Proteinsorte aus. Die meisten Proteine befinden sich in der Zelle nicht in gestrecktem fadenförmigen Zustand, sondern in Gestalt eines kompakten, mehr oder weniger rundlichen oder globulären Gebildes. Bekanntlich kann man jeden Faden durch Falten oder Aufwickeln in ein solches Gebilde, einen „Knäuel“ verwandeln. Die Zusammenfaltung des Peptidfadens zur globulären Proteinkette geschieht nicht zufallsmäßig, sondern nach einem in ihrer Primärstruktur enthaltenen Plan. Ihre Bausteine, die Aminosäuren, enthalten nämlich positiv und negativ geladene Gruppen, die durch Anziehung und Abstoßung dafür sorgen, daß sich stets eine bestimmte Faltung, man sagt ihre Tertiärstruktur, ausbildet. Durch die Tertiärstruktur wird auch erreicht, daß bestimmte positive und/oder negative Gruppen an der Oberfläche der Molekkel in einem bestimmten Muster angeordnet zu liegen kom-

men, die die sogenannten aktiven Stellen der Enzymmoleköl bilden. Durch sie wird sichergestellt, daß sich nur ganz bestimmte Substanzen – die Substrate – an die Enzymmoleköl anlagern können, und daß die Substrate in einer solchen Weise modifiziert werden, daß an ihnen eine gewünschte Reaktion ablaufen kann, ähnlich wie durch die eigentümliche Gestaltgebung von Schlüssel und Schloß erreicht wird, daß sich nur eine bestimmte Tür öffnen läßt.

Wie man leicht erkennt, ist das entscheidende Moment an einer Proteinsorte die Primärstruktur ihrer Moleköl. Durch sie erhalten die Moleköl eine so beschaffene Gestaltung, daß sie fähig werden, als Enzyme zu fungieren, das heißt bestimmte chemische Reaktionen zu katalysieren, die in ihrer Gesamtheit das Lebensgeschehen einer Zelle und letztlich die Funktionen des ganzen Organismus ausmachen. Für die Synthese der Proteine, zu der ja jede Zelle imstande ist, gehört also in erster Linie das „Wissen“ um deren Primärstruktur. Es wurde schon erwähnt, daß es als genetische Information in ihrer Erbsubstanz, in der DNS ihrer Chromosomen enthalten ist.

Der genetische Code und die Replikation der DNS

Die DNS ist nach einem ähnlichen Prinzip gebaut wie die Proteine. Ihre langkettenigen Moleköl haben Molgewichte bis zu einigen Millionen. Auch sie bestehen aus kleinmolekularen Bauteilen, den Nukleotiden, die ihrerseits aus einer organischen Base, dem Fünfzucker Desoxyribose und einer Gruppe Phosphorsäure zusammengebaut sind. Von den organischen Basen gibt es vier, nämlich Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin; und dem entsprechend gibt es auch vier Sorten von Nukleotiden. Mit ihrer Unterschiedlichkeit ist die Möglichkeit einer mannigfachen Anordnung der Nukleotide in der Nukleotidkette der DNS gegeben, und damit auch die Möglichkeit, Informationen auszudrücken und zu speichern. Von dieser Möglichkeit macht das Leben auch Gebrauch. Die früher schon erwähnte genetische Information über die Primärstruktur der Proteine ist gespeichert in der Reihenfolge der Nukleotide der DNS-Kette. Diese Reihenfolge nennt man, in Anlehnung an den bei den Proteinen befolgten Sprachgebrauch, die Primärstruktur der DNS.

Die genetische Information ist in der Primärstruktur der Proteine „geschrieben“ in einem aus zwanzig „Buchstaben“, den Aminosäuren, bestehenden „Alphabet“, während dieselbe Information in der DNS in einem aus vier „Buchstaben“, den Nukleotiden, bestehenden „Alphabet“ enthalten ist. Wenn die in der DNS gespeicherte Information in der Primärstruktur der Proteine ausgedrückt werden soll, so muß die eine Schrift in die andere „übersetzt“ werden. Wir kennen einen ähnlichen Vorgang beim Telegraphieren. Unsere Nachricht, die wir am Postschalter aufgeben, ist geschrieben in der 26 Buchstaben umfassenden gewöhnlichen Schrift. Beim Telegraphieren wird sie in die drei Zeichen – Punkt, Strich, Zwischenraum – enthaltende Moreschchrift übertragen. Das geschieht in der Weise, daß jeweils mehrere Zeichen der Moreschrift einen einzelnen Buchstaben der gewöhnlichen Schrift bedeuten. Die Vorschrift, nach der die Über-

tragung vor sich geht, heißt der Code. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der genetischen Information. Nach dem sogenannten genetischen Code, dessen Entzifferung erst vor wenigen Jahren gelungen ist, „codieren“ immer drei Nukleotide für je eine Aminosäure.

Die Erbsubstanz einer Zelle wird vor der Zellteilung verdoppelt oder repliziert, und zwar so, daß die in der DNS der Mutterzelle enthaltene genetische Information unverändert in die DNS der Tochterzellen übergeht. Diese „identische Replikation“ wird ermöglicht durch den Umstand, daß in der Regel eine DNS-Moleköl nicht aus einer, sondern aus zwei Nukleotidketten besteht, die miteinander gepaart und, ähnlich wie die Stränge eines Seils, spiraling umeinander geschlungen sind. Man spricht deshalb von der DNS-Doppelspirale. Die Paarung der Nukleotidketten wird bewirkt durch die Paarung der einzelnen Nukleotide, und zwar ist es so, daß jeweils Adenin und Thymin Paare bilden, die zwischen sich Wasserstoffbrücken entstehen lassen und so mit schwachen chemischen Kräften zusammenhalten. Ebenso verhält es sich mit Guanin und Cytosin. Man sagt, die beiden Nukleotide eines Paares verhalten sich komplementär zueinander. Damit ist die genetische Information nicht nur in dem einem DNS-Strang enthalten, sondern komplementär auch in dem anderen.

Der molekulare Bau der DNS bildet die Grundlage ihrer identischen Replikation. Sie geht in der Weise vor sich, daß sich die beiden DNS-Stränge voneinander trennen, und daß jeder Strang einen komplementären aufbaut, indem jedes Nukleotid seinen komplementären Partner anlagert, worauf die einzelnen Nukleotide durch ein bestimmtes Enzym, die DNS-Polymerase, chemisch zusammengeschlossen werden. Man sagt, der eine Strang diene bei der Replikation als Matrize für die Biosynthese seines komplementären Partners. Durch diesen Mechanismus entstehen zwei DNS-Doppelspiralen, die die gleiche genetische Information enthalten wie die ursprüngliche DNS und bei der Zellteilung auf zwei Tochterzellen verteilt werden können.

Grundsätzlich ist jede Zelle imstande, die identische Replikation ihrer DNS durchzuführen. Wie alle Lebenstätigkeiten geht auch sie unter der Mitwirkung bestimmter Enzyme vor sich. Jede Zelle besitzt deshalb die für die Biosynthese ihrer DNS erforderliche Enzymausstattung. Schon vor etwa 10 Jahren haben sich Kornberg und seine Mitarbeiter gefragt, ob es nicht möglich sein sollte, das zur DNS-Biosynthese erforderliche Enzymsystem aus lebenden Zellen zu isolieren und die DNS-Synthese im Reagenzglas – *in vitro* – ablaufen zu lassen. Als Versuchsobjekt wählten sie das oben schon erwähnte Bakterium *E. coli*, das in geeigneten Flüssigkeitskulturen sich alle 20 min verdoppelt und leicht in großen Mengen gezüchtet werden kann. Aus einer solchen Kultur werden die Zellen durch Zentrifugierung gewonnen und durch Ultraschall aufgebrochen. Dann ergießt sich der Zellinhalt in das umgebende Medium, und man hat einen Zellextrakt gewonnen. Er ist in der Tat fähig, DNS zu synthetisieren, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Vor allem müssen alle vier Nukleotidsorten in Form ihrer Triphosphate und eine hochmolekulare DNS im Zellextrakt vorhanden sein. Mit Hilfe der aus Protein- und Enzymchemie bekannten Methoden kann

das für die DNS-Synthese verantwortliche Enzym, die DNS-Polymerase, hochgradig gereinigt, das heißt von anderen Komponenten des Zellsafts abgetrennt und angereichert werden. Ein solches zur DNS-Synthese *in vitro* fähiges, mit allen erforderlichen Substraten ausgestattetes Enzym nennt man ein zellfreies System. Zellfreie Systeme haben in der Molekularbiologie eine beständig wachsende Bedeutung erlangt. Mit ihrer Hilfe gelingt es, die bei einer elementaren Lebensfunktion wirksamen Enzyme aus dem übrigen Zellstoffwechsel herauszulösen, sie im Reagenzglas wieder zusammenzufügen und sie ihre Reaktionen unter meßbar veränderlichen Bedingungen ausführen zu lassen. So ist es Kornberg und seinem Forscherteam schon vor etwa 10 Jahren gelungen, DNS im zellfreien System zu synthetisieren. Kornberg konnte auch nachweisen, daß die synthetisierte DNS in ihren Eigenschaften weitgehend der zugesetzten DNS entspricht. Man hat gute Gründe für die Annahme, daß diese bei der Synthese neuer DNS als „Muster“ wirkt, und daß die Synthese sich in der Form der identischen Replikation vollzieht, genau so oder ähnlich so, wie es in der lebenden Zelle geschieht. Kornberg hat für diese Arbeit damals den Nobelpreis erhalten.

In der Zwischenzeit ist die von ihm ausgearbeitete Methode in vielfacher Hinsicht weiter verbessert und angewendet worden. DNS-Polymerasen sind aus mehreren anderen Mikroorganismen, aber auch aus zahlreichen Zelltypen höherer Organismen, auch von Säugern gewonnen worden. Ein großer Mangel haftete aber dieser Methode an: Die *in vitro* synthetisierte DNS war nicht biologisch aktiv. Wurde beispielsweise als Muster DNS aus Viren benutzt, so war die *in vitro* synthetisierte DNS nicht infektiös. So stellte sich ganz von selbst das Ziel, die *in vitro*-Synthese von biologisch aktiver DNS durchzuführen, das von Kornberg und vielen anderen Forschern angestrebt wurde. Kornberg hat dieses Ziel nun als erster erreicht, und das ist auch der Inhalt der eingangs zitierten Nachricht zur Weihnachtszeit vorigen Jahres.

Die Synthese biologisch aktiver DNS

Ein erster Schritt zur Erreichung dieses Ziels war die Arbeit von Spiegelman und Mitarbeitern. Sie konnten einen kleinen Bakteriophagen replizieren, der aber als genetisches System RNS enthält. RNS ist die Abkürzung für Ribonukleinsäure, die der DNS ähnlich ist. RNS-Viren sind jedoch eine Ausnahme, weil die meisten Viren und andere Organismen ihre genetische Primärinformation in der DNS enthalten. Der nächste Schritt mußte deshalb darin bestehen, einen möglichst einfachen Bakteriophagen mit DNS als Erbsubstanz so *in vitro* zu replizieren, daß das Syntheseprodukt wieder infektiös ist. Für ihre Untersuchungen wählten Kornberg und Mitarbeiter den Phagen ΦX 174. Er besteht, wie auch andere Phagen, aus Hüllprotein und einem „Docht“ aus DNS, die bei ihm ein Molgewicht von „nur“ etwa 2 Millionen besitzt. Außerdem ist die DNS dieses Phagen einsträngig und zu einem geschlossenen Ring zusammengefügt. Als weiterer Schritt zur Erreichung des angestrebten Ziels gelang es um die Mitte des vorigen Jahres, aus *E. coli* eine so hochgradig gereinigte DNS-

Polymerase zu gewinnen, daß sie die erwähnte Phagen-DNS ohne Fehler *in vitro* synthetisieren konnte. Aber auch sie war noch nicht infektiös, das heißt biologisch aktiv. Woran konnte das liegen?

Bei der Biosynthese infektiöser Phagen-DNS erwies sich neben der DNS-Polymerase noch ein anderes Enzym von Bedeutung, das sogenannte Verbindungsenzym (joining enzyme), das erst in den vorhergehenden Monaten in verschiedenen Instituten gleichzeitig gefunden und beschrieben worden war. Es katalysiert die Verknüpfung des Phosphatrestes der einen Seite einer Polynukleotidkette mit dem OH-Ende der anderen Seite, mit anderen Worten den Ringschluß, so daß eine lineare Polynukleotidkette zum Ring geschlossen wird. Dazu kamen die Ergebnisse der sehr eingehenden Untersuchungen des Mechanismus, durch den sich der Phage *in vivo* – in der lebenden Bakterienzelle – vermehrt. Die infizierende einsträngige DNS von Φ X 174 – man nennt sie den (+)Strang – bildet in der Zelle zunächst einen komplementären, den (–)Strang. Dabei ergibt sich schließlich ein mit seinen Enden chemisch geschlossener Ring, bestehend aus zwei basenpaararten Strängen, die sogenannte Replikative Form (RF). Werden solche RF aus infizierten Zellen isoliert, so können beide Stränge voneinander getrennt werden, da sie ja nur über die relativ schwachen Wasserstoffbrücken miteinander zusammenhängen. Sowohl der Doppel- als auch der (–)Strang ist infektiös.

Wie schon erwähnt, hatten frühere Arbeiten ergeben, daß die einsträngige DNS des Phagen Φ X 174 *in vitro* durch hochgradig gereinigte DNS-Polymerase fehlerfrei repliziert werden kann. In Gegenwart von Verbindungsenzym werden auch kovalente Ringe gebildet. Eine genaue Untersuchung des Syntheseprodukts ergab, daß es sich in keiner Weise von der RF des Phagen unterschied. So unterschied sich der synthetische (–)Strang im Infektionstest nicht von solchen (–)Strängen, die aus natürlich vorkommender RF isoliert worden waren. Und weiterhin ließ sich dieses (–)Strangmaterial als Matrize für eine zweite Syntheserunde benutzen, wobei dieses Mal jedoch synthetische (+)Stränge gebildet wurden. Dabei ergab sich eine vollkommen synthetisch gebildete RF, die wiederum in Einzelstränge zerlegt werden konnte. Die aus ihr gewonnenen (+)Stränge waren im Infektionstest von der normalen Phagen-DNS nicht zu unterscheiden. Sie gingen entsprechende Replikationszyklen ein, veranlaßten die Synthese von normalem Hüllprotein, aus dem der Phage ja auch noch besteht, und von normalen Genen. Man hat also 5 bis 6 Gene der aus dem Phagen Φ X 174 stammenden DNS fehlerfrei *in vitro* synthetisieren können.

Die Bewertung der Ergebnisse Kornbergs

Ohne Zweifel muß man in diesen Erfolgen der Molekulargenetik Ergebnisse von hoher Bedeutung sehen. Kornberg selbst meint, sie könnten einmal in der Weise praktische Anwendung finden, daß man mit künstlich synthetisierter DNS das Erbgut von Organismen – auch des Menschen – wird verändern und fehlerhaftes Erbgut verbes-

sern können. Sehen wir aber einmal von dieser praktischen Anwendung ab, so bleibt immer noch der hohe theoretische Wert. Kornbergs Ergebnis zwingt dazu, unsere Vorstellung von der innersten Natur organischen Lebens neu zu überdenken und eventuell zu korrigieren. In nicht wenigen Kommentaren hat man die Arbeit Kornbergs als Synthese lebender Substanz oder gar als künstliche Produktion lebender Wesen bewertet. Es will uns jedoch scheinen, als gingen diese Wertungen zu weit.

Unter den durch Kornbergs Arbeit erzeugten „lebenden Wesen“ versteht man zweifellos die ringförmigen DNS-Stränge mit der gleichen biologischen Aktivität, wie sie die infektiöse DNS ausübt. Diese Wertung setzt voraus, daß man den ΦX 174-Phagen als lebendes Wesen ansieht. Nun gilt es aber bekanntlich als sehr umstritten, ob man Bakteriophagen und andere Viren als Lebewesen ansehen soll. Viren und Phagen besitzen keine eigenen Stoffwechselsysteme, keine Enzyme, mit deren Hilfe sie echte Lebenstätigkeiten, wie die Synthese organischer Substanzen, ausüben könnten. Sie besitzen lediglich in ihrer Erbsubstanz – bei einigen in der DNS, bei anderen in der RNS – die Information zur Produktion von Proteinen und neuer DNS, nicht aber die Mittel, diese Informationen zu realisieren. Dazu bedienen sie sich der Zelle, in die sie bei der Infektion eindringen. Man kann also lediglich sagen, daß Viren „Leben“ nur im Verein mit einer lebenden Zelle vollziehen. In dieser Hinsicht verhält sich die in einem Virus enthaltene Erbsubstanz – RNS oder DNS – nicht anders wie Moleküle anderer organischer Substanzen, zum Beispiel die von Vitaminen, Hormonen oder Enzymen. In sich haben diese Stoffe kein Leben; sie können aber eine bestimmte, mit ihrer molekularen Beschaffenheit gegebene Lebenstätigkeit ausüben, wenn sie sich in einem lebenden System befinden oder in ein solches eingebracht werden. Es ist ferner nicht so, wie es die Formulierung „Produktion lebender Substanz“ vermuten läßt, als gäbe es eine bestimmte Konfiguration der Materie, die „Leben“ bedeutet, und als könnte man „Leben“ synthetisieren, wenn man mit chemischen oder enzymologischen Methoden diese Konfiguration herbeiführt. Zwar hat man in früherer Zeit so gedacht. Man hat Proteine, Vitamine, Hormone und Enzyme als „lebende Stoffe“ betrachtet; jetzt sehen manche Leute offenbar die Erbsubstanz DNS als „lebende Substanz“ an, weil sie die Information für alle Lebenstätigkeiten eines Organismus enthält. Aber auch die DNS ist nicht lebendig, ebensowenig wie es Proteine oder Hormone sind; sie ist aber geeignet, in einem lebenden System, zum Beispiel in einer Bakterienzelle, an Lebenstätigkeiten teilzunehmen, besser gesagt, als Instrument der Lebenstätigkeit in diesen Zellen zu dienen. Und sie hat diese Eignung auch dann, wenn sie auf künstlichem Wege – *in vitro* – hergestellt worden ist, ebenso wie künstlich gewonnene Vitamine und Hormone sich in der lebenden Zelle ebenso benehmen, wie die entsprechenden im Organismus selbst entstandenen Verbindungen. Bei Vitaminen und Hormonen haben wir uns an diesen Gedanken schon lange gewöhnt; die Ergebnisse der Arbeiten Kornbergs bringen nichts weiter als eine Bestätigung dieser Auffassung und ihre Ausdehnung auf die DNS, und damit eine weitere Widerlegung der Vorstellung von der „lebenden Substanz“.

Dieser Umstand mag uns als Anlaß dienen, die Vorstellungen der biologischen und biochemischen Wissenschaft vom Verhältnis von Leben und Materie kurz zu umreißen. Das organische Leben vollbringt alle seine Tätigkeiten und Funktionen mit materiellen, meist biochemischen Mitteln. Die vom Lebendigen in Dienst gestellten chemischen und physikalischen Eigenschaften, Kräfte und Gesetze organischer Verbindungen sind dieselben, wie wir sie auch außerhalb lebender Systeme an ihnen finden, und die Physik und Chemie erforschen und beschreiben. Deshalb ist es auch möglich, einzelne Komponenten lebender Zellen zu isolieren und sie im Reagenzglas sich auswirken zu lassen, wie es in den zellfreien Systemen geschieht. Die hier beobachteten Vorgänge sind – oder könnten sein – dieselben, wie sie sich innerhalb der lebenden Zelle abspielen; die Biosynthese so komplizierter Substanzen wie Proteine oder DNS macht hierin keine Ausnahme.

Wenn dem so ist, was ist dann ein „lebendes System“ eigentlich? Ist es „weiter nichts“ als die Summe seiner materiellen Komponenten? Oder ist es „mehr“ als diese? Die befriedigende Antwort auf diese Fragen würde den uns hier gesetzten Rahmen bei weitem sprengen. Wenn man von den Arbeiten Kornbergs hört, fühlt man wohl dunkel, daß sie mit diesen Fragen zusammenhängen, und das macht nicht zuletzt ihre große theoretische Bedeutung aus. Die Antwort ist aber nicht so einfach, daß man sagen könnte, man habe „Leben“ oder „lebende Substanz“ synthetisiert.