

Klaus-Dieter Sedlacek
Norbert Wrobel

Die Lebenskraft

Wie Enzyme, Bewusstsein und
quantenbiologische Effekte das Leben
regulieren



Der Naturwissenschaftler Dipl.-Math. Klaus-Dieter Sedlacek, Jahrgang 1948, lebt seit seiner Kindheit in Süddeutschland. Er studierte neben Mathematik und Informatik auch Physik. Nach dem Studienabschluss 1975 und einigen Jahren Berufspraxis gründete er eine eigene Firma, die sich mit der Entwicklung von Anwendungssoftware beschäftigte. Diese führte er mehr als fünfundzwanzig Jahre lang. In seiner zweiten Lebenshälfte widmet er sich nun seinem privaten Forschungsvorhaben. Er hat sich die Aufgabe gestellt, die Physik von Information, Bedeutung und Bewusstsein näher zu erforschen und einem breiteren Publikum zugänglich zu machen. Im Jahr 2008 veröffentlichte er ein aufsehenerregendes und allgemein verständliches Sachbuch mit dem Titel „Unsterbliches Bewusstsein – Raumzeit-Phänomene, Beweise und Visionen“. Er ist der Herausgeber der Reihen „Wissenschaftliche Bibliothek“ und „Wissenschaft gemeinverständlich“.

Norbert Wrobel, in Berlin lebend, studierte Medizin und approbierte sich 1984 als Arzt. In einer breit angelegten universitären Grundausbildung an der FU Berlin spezialisierte er sich nachfolgend in den Bereichen Innere Medizin und Intensiv- und Notfallmedizin, später noch in der Altersmedizin, und ist seitdem in der stationären Krankenversorgung aktiv. Wegen des gesellschaftlichen Wandels, der immer mehr ältere Menschen hervorbringt, werden Mediziner konsekutiv mit neuen, unbekannteren und komplexen Problemkonstellationen konfrontiert. Diese unterliegen allerdings bis heute einer veralteten mechanistisch-physikalischen Denkweise, die sich vor mehr als hundert Jahren entwickelt hat. Norbert Wrobel hat sich deshalb vorgenommen, sich von dieser Denkweise zu lösen,

um zu erforschen, was tatsächlich "die Welt in ihrem Innersten zusammenhält".

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung in die Triebkräfte des Lebendigen

2. Die Basis des Lebens

2.1 Die Biochemie und die Entdeckung der Enzyme

2.2 Lebewesen

2.3 Elementare Prozesse lebender Systeme

2.3.1 Die Informationsverarbeitung von Reizen

2.3.2 Regulations- und
Regenerationsphänomene

2.4 Das Bewusstseinsproblem

2.5 Der Nachweis von Bewusstseinsprozessen

2.6 Der Blick in die biologische Zelle

2.7 Die Quantenmechanik des Mikrogesehens

2.8 Diverse Interpretationen der Quantenmechanik

2.9 Interpretation der Quantenmechanik nach Klaus-Dieter Sedlacek

2.10 Photosynthese - Motor biogeochemischer
Kreisläufe

3. Motoren des Lebendigen

3.1 Hämoglobin und die biochemische Funktion des
Blutes

3.1.1 Das Blut

3.1.2 Hämoglobin und Chlorophyll

3.1.3 Oxidationen im Blut

3.1.4 Wie Hämoglobin das Überleben von Grünalgen sichert

3.2 Die Allgegenwart der Enzyme

3.3 Tunneleffekt bei Enzymen

3.4 Aminosäuren – Bausteine des Lebens

3.4.1 Die Bedeutung der Aminosäuren

3.4.2 Segensreiche Wirkungen am Beispiel der L-Arginin - Aminosäure

3.5 Aspekte des Energiestoffwechsels

3.5.1 Atmungskette: Energieversorgung in Zellen

3.5.2 Glykolyse – ein weiterer Energieerzeugungsmechanismus

3.5.3 Citratzyklus

3.6 Molekulare Maschinen und bewusste Prozesse

3.6.1 Proteine

3.6.2 Steuern bewusste Prozesse die Proteinqualitätskontrolle?

3.6.3 RuBisCO – das häufigste Protein der Erde

4. Die neue Realität der Lebenskraft

4.1 Vibrationen und Quanteneffekte, die Lichtenergie transferieren

4.2 Quantenkohärenz und Elektronentransport bei der Fotosynthese

4.3 Enzyme – eine fantastische Antwort auf die Frage nach der Natur des Lebens von Norbert Wrobel

4.4 Regulation und Bewusstsein

4.5 Der springende Punkt

5. **Literaturverzeichnis**
6. **Stichwortverzeichnis**
7. **Textquellen und Autoren**

1. Einführung in die Triebkräfte des Lebendigen

Einem griechischen Schöpfungsmythos zufolge ist erstes Leben aus der Verbindung von Dunkelheit und Chaos entsprungen, wobei Prometheus bekanntlich dazu verhalf, den Menschen aus Ton zu formen und dem irdischen Leben hinzuzufügen. Dass Leben stets etwas Zusammengesetztes sei, dessen Elemente und Verbindungen man nur genügend erforschen müsse, um es womöglich selbstständig herzustellen, gehört zu den häufig geträumten Träumen der Künste wie auch der wissenschaftlichen Laboratorien dieser Welt. Die in diesen Laboren waltende Spannung zwischen technischer Herstellbarkeit und wundersamer Uneinholbarkeit des Lebens spiegelt auch die Mehrdeutigkeit des Lebendigen.¹

Im 17. Jahrhundert begann eine Kontroverse zwischen den Vitalisten und den Mechanisten. Als »Vitalismus« bezeichnet man solche biologisch-philosophischen Positionen, die davon ausgehen, dass dem Leben eine eigene treibende Lebenskraft zugrunde liege. Im Gegensatz zu den »Mechanisten« glauben Vitalisten nicht daran, dass Leben allein mit den Mitteln und Methoden der positiven Naturwissenschaften erklärend zu beschreiben, geschweige denn zu produzieren sei. Der chemische Fortschritt bedeutete im 20. Jahrhundert jedoch einen vermeintlichen Sieg des Mechanismus über den Vitalismus. 1953 konnten durch das Miller-Urey-Experiment erstmals Aminosäuren hergestellt werden. Damit lieferten die Chemiker den

Beweis, dass biologische Lebensbausteine aus abiotischen Bedingungen erzeugt werden können. Daraus leiteten sie ab, dass es keiner eigenständigen Lebenskraft bedarf, um Leben hervorzubringen und zu erklären.

Dennoch haben sich vitalistische Vorstellungen und Praktiken wie Schicksalsgläubigkeit, Aberglaube und Wunderglaube erhalten und sind zum Teil alltagsprägend.

In diesem Werk loten wir naturwissenschaftliche Denkwege aus und versuchen die traditionellen Gegensätze von Mechanismus und Vitalismus, von Belebtem und Unbelebtem, von Lebewesen und Dingen, von Geist und Materie aufzulösen. Dabei sind unsere wichtigsten Werkzeuge Biochemie, Quantenbiologie und eine neue Definition vom Bewusstsein.

Die Biochemie ist die Lehre von den chemischen Vorgängen, die sich in den pflanzlichen und tierischen Körpern abspielen. Um für diese Vorgänge das richtige Verständnis zu gewinnen, ist es nötig, das allgemeinste Naturgesetz, das Gesetz von der Erhaltung und Umwandlung der Energie in seiner Bedeutung für die Biochemie etwas näher zu betrachten. Unter Energie verstehen wir die Quelle aller Arbeitsleistungen; ihr Maß ist der Betrag der Arbeit selbst. Wir unterscheiden in der Natur bestimmte Energie- oder Arbeitsformen, so eine Lichtenergie, welche die durch die Strahlen bewirkten Veränderungen oder Arbeiten besorgt, wie z. B. die chemische Arbeit der Schwärzung einer fotografischen Platte. Wir kennen eine mechanische Energieform, auf deren Betätigung wir alle Bewegung erzeugenden Arbeiten zurückführen, ferner eine thermische, elektrische und eine chemische Energieform. Die chemische Arbeit, die bei irgendeiner Reaktion geleistet werden kann, oder die bei einer chemischen Reaktion verbraucht wird, äußert sich in

den mit der chemischen Reaktion verknüpften Wärmevorgängen. Spielt sich die Reaktion unter Wärmeentwicklung ab, sodass durch die Wärmeabgabe die Temperatur der Umgebung erhöht wird, so können wir mit dieser Wärme Arbeit leisten, etwa ein Gas ausdehnen, und die Ausdehnung benutzen, um im Zylinder einen Stempel zu bewegen, d. h., wir können die Wärme in mechanische Arbeit umsetzen. Da wir mittels eines mechanischen Apparates, der durch die Wärme betrieben wird, Elektromotoren, Dynamomaschinen und ähnliche Einrichtungen in Tätigkeit setzen können, so gelingt auch die Umsetzung der gewinnbaren Wärme in andere Energieformen, in Elektrizität, aus dieser in Licht, in die fortschreitende Bewegung usw. Man bezeichnet die mit Wärmeentwicklung verbundenen Reaktionen als exotherme. Jeder chemische Vorgang also, der Arbeit leisten soll, muss die Vorbedingung erfüllen, unter den Verhältnissen, bei denen sich die Reaktion abspielt, exotherm zu verlaufen. Andere Reaktionen bedürfen zu ihrem Ablauf einer Zufuhr von Wärme oder, allgemeiner gesprochen, einer Zufuhr von Energie-. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass eine Energiequelle, wie Elektrizität oder Licht oder Wärme einen Arbeitsbetrag zur Verfügung stellen muss, um die Reaktion zu ermöglichen, oder, dass aus der Umgebung Wärme aufgenommen wird, d. h. die Umgebung sich abkühlt. Solche Reaktionen nennt man endotherme; sie sind nicht imstande, Arbeit zu leisten, sondern im Gegenteil, sie verbrauchen zu ihrem Zustandekommen Arbeit.

Es ist klar, dass nur exotherme Reaktionen befähigt sind, als Energiequelle zu wirken. Verbindungen, die aus bestimmten Stoffen unter Wärmeaufnahme entstanden sind, können sich in diese Stoffe wieder zersetzen unter der Abgabe derselben Wärme, die bei ihrer Entstehung verbraucht wurde. Ebenso ist es einleuchtend, dass exotherm entstandene Substanzen, die sich unter Abgabe

von Wärme aus bestimmten Anfangsstoffen gebildet haben, in diese Anfangsstoffe nur unter Zufuhr der bei der Umwandlung abgegebenen Wärme zurückverwandelt werden können. Die endotherm entstandenen Verbindungen stellen demnach eine Art Energiereservoir, oder, wie man auch sagt, einen chemischen Spannungszustand dar. Sie sind vergleichbar einer unter Arbeitsleistung gespannten Uhrfeder, die bei der Entspannung die aufgewandte Arbeit wieder abgibt und diese in andere Arbeitsformen, wie Bewegung des Räderwerkes und der Zeiger einer Uhr umsetzt.

Die Energieformen sind ineinander umwandelbar, d. h., aus Wärme kann Bewegung, aus Bewegung Elektrizität, aus dieser Licht usw. werden. Diese Umwandlungsfähigkeit der Energieformen ist für den Haushalt der Natur von der größten Bedeutung. Sie gestattet den lebenden Wesen, die Arbeitsvorräte, die sie für alle Lebensvorgänge gebrauchen, in der Form der bequemsten und konzentriertesten Energie aufzunehmen, d. h. der chemischen. Wenn bei dem Ablauf einer Reaktion, welche Arbeit, speziell Wärme liefert, die Letztere auch als Maß für den Arbeitswert der Reaktion betrachtet werden darf, so kann doch bei der Umwandlungsfähigkeit der Energieformen, unter Zuhilfenahme geeigneter Apparate, wie sie der lebende Organismus zur Verfügung stellt, auch jede andere Energieform aus der chemischen Spannkraft erzeugt werden. Die Verhältnisse liegen ähnlich wie bei einer Dampfmaschine, welche ihre gesamte Triebkraft in Form der Wärme liefernden chemischen Reaktion, der Kohlensäurebildung aus Kohle und Sauerstoff, aufnimmt. Zunächst wird nur Wärme gebildet; die Wärme wird in den Druck des gespannten Wasserdampfes verwandelt, mit dessen Hilfe Lokomotiven, elektrische Apparate, Motoren aller Art betrieben werden können, sodass jede beliebige Energieform aus der chemischen Betriebskraft der Reaktion

gewonnen werden kann. Ebenso finden wir in dem lebenden Organismus die Fähigkeit, geeignete Reaktionen in der Weise zu leiten, dass die dabei frei werdende Energie in derjenigen Form ausgenutzt wird, wie sie der Organismus zu seiner Lebenserhaltung oder zur Betätigung seines Willens bedarf. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie sagt nun aus, dass diese Umwandlungen ohne Verlust vor sich gehen, d. h., dass bei diesen Umwandlungen eine Abnahme der Energie nicht eintritt, sondern die gesamte der Umwandlung unterworfenen Energieform, in andern Formen, aber mit gleichem Arbeitswert erscheint.

Wenden wir diese Überlegung auf eine chemische Reaktion zwischen zwei Stoffen $A + B$ an, so können wir schreiben: $A+B=AB$.

Ist eine solche Reaktion mit einem bestimmten Energieverbrauch, etwa mit Ausnahme von Wärme, verbunden, so muss dieselbe Wärme wieder gewonnen werden können, wenn der Vorgang $AB=A+B$ eintritt, d. h., wenn die Reaktion rückgängig gemacht wird. Wird bei dieser Umkehrung des Prozesses die zuerst aufgenommene Wärme nicht als Wärme, sondern als irgendeine andere Energieform oder als mehrere andere Energieformen abgegeben, so ist deren Arbeitswert ebenso groß wie der der ursprünglich aufgenommenen Wärme.

Diese Betrachtungen sind notwendig, um das Gemeinsame und Unterscheidende der chemischen Reaktionen im pflanzlichen und im tierischen Organismus einzusehen. Pflanzen und Tiere sind Lebewesen und haben als gemeinsames Kennzeichen die Fähigkeit des Wachstums und der mit dem Wachstum verbundenen Beweglichkeit. Sie unterscheiden sich aber, wenn man die Übergangsformen zwischen Pflanzen und Tieren unberücksichtigt lässt, in einem wichtigen Punkt, der die biologische Stellung der

beiden Lebensformen klarlegt. Die Pflanzen sind abgesehen von ihrem Wachstum ruhende Gebilde und an den Ort, an dem sie wurzeln, gebunden. Sie besitzen nicht die Fähigkeit der willkürlichen Ortsveränderung. Die Tiere hingegen sind bewegliche Gebilde. Sie können willkürlich den Ort wechseln und besitzen einen Organismus, welcher der Möglichkeit der stetigen Ortsveränderung angepasst ist. Daraus geht hervor, dass die Tiere für ihr Leben einer weit größeren Arbeitsleistung bedürfen als die Pflanzen. Wenn auch die Pflanzen atmen, wenn auch eine Flüssigkeitsströmung durch den pflanzlichen Organismus hindurch stattfindet, Tätigkeiten, die natürlich Arbeit erfordern, so sind deren Beträge doch sehr viel kleiner als die entsprechenden Beträge bei den Tieren, die, zumal die höher entwickelten, einen regen Blutkreislauf besitzen und die Arbeit des Herzens, der Pulse, Lungen usw. leisten müssen. Die Tiere bedürfen deshalb zu ihrer Lebenserhaltung weit größerer Energiezufuhr als die Pflanzen. Sie gebrauchen, da diese Energiezufuhr wesentlich in Form der chemischen Spannkraft aufgenommen und aufgespeichert wird, exotherme Reaktionen, die unter Wärme- und Energieabgabe verlaufen. Die Pflanzen hingegen können sich mit einem weit geringeren Arbeitskapital begnügen. Der Betrag exothermer Reaktionen darf für ihre Lebenserhaltung weit kleiner sein, sodass, vorausgesetzt, dass dem pflanzlichen Organismus eine geeignete Energiequelle zur Verfügung steht und sich endotherme Reaktionen abspielen, die durch Letztere geschaffenen Substanzen zum größten Teil reserviert werden können.

In der Tat vermag die Pflanze unter dem Einfluss der Lichtenergie viele endotherme Stoffe zu schaffen, die daher geeignet sind, bei ihrer Zerlegung im tierischen Organismus die Energie wieder abzugeben, die ihre Bildung erfordert hat. In dieser Beziehung stehen daher Pflanzen und Tiere in einem gegensätzlichen biologischen Verhältnis. Die Pflanze

schafft die Verbindungen, die das Tier für sein Leben verwerten kann.

Das Gemeinsame der beiden Lebensformen besteht darin, dass das Tier wie die Pflanze zur Schaffung und Erhaltung des materiellen Organismus bestimmter chemischer Bausteine bedarf, die entweder unverändert oder stets in ähnlicher Art erneuert erst den Apparat bilden, in dem sich die Lebensreaktionen abspielen. Während aber die Pflanze auch diese Stoffe aus den einfachen Bestandteilen, welche die Atmosphäre und der Erdboden zur Verfügung stellt, auszubauen vermag, ist der tierische Organismus darauf angewiesen, sie in fertiger oder vorbereiteter Form der Pflanze zu entnehmen. Auch in dieser Beziehung erscheint das pflanzliche Leben als die Bedingung des tierischen Lebens; und wenn es auch Tiere gibt, die lediglich von dem Fleisch anderer Tiere leben, so haben doch diese sich von Pflanzen ernährt, ihr Material erst aus pflanzlichen Stoffen aufgebaut.

Da die Pflanzen den Ausbau der Substanzen ihres Organismus nur unter Zuhilfenahme von Energie, und zwar der Sonnenenergie, zu bewerkstelligen vermögen, so scheint alles Leben durch durch Licht geschaffen worden zu sein.

In diesem Sinne ist alles, was lebt, auch ein Kind des Lichtes. Bei der Betrachtung der biochemischen Reaktionen ergibt es sich daher von selbst, dass wir zuerst die Vorgänge im pflanzlichen Organismus und dann die im tierischen Organismus beschreiben.

Da, wie erwähnt, auch die Pflanzen eine bestimmte Arbeit erfordernde Atmung, ein Wachstum, das gleichfalls eine Arbeitsleistung darstellt, besitzen, so haben wir diese Tätigkeit, soweit sie sich in chemischen Reaktionen abspielt,

zu unterscheiden von denjenigen Vorgängen, die nur der Bildung endothermer Verbindungen, der Erzeugung des Pflanzenleibes unter dem Einfluss der Sonne, dienen. Man bezeichnet die der Energieerzeugung dienenden Reaktionen als Abbaureaktionen oder Dissimilationsvorgänge, die Letzteren als Aufbaureaktionen oder Assimilationsvorgänge.

Die Assimilationsvorgänge müssen zeitlich den andern vorausgehen, da sie das Pflanzenmaterial erst schaffen. Bezüglich der chemischen Substanzen, die wir im pflanzlichen Organismus finden, beziehen sich die Assimilationsvorgänge auf die stickstofffreien und stickstoffhaltigen organischen Substanzen sowie auf die Aufnahme von Salzen. Da alle organischen Substanzen der Pflanze in letzter Linie von der Kohlensäure stammen, so bezeichnet man die Entstehung der kohlenstoffhaltigen, stickstofffreien Verbindungen als die Assimilation der Kohlensäure. Hinzu tritt als zweite Reaktionsform im Aufbau des pflanzlichen Organismus die Assimilation des Stickstoffs, der auch zeitlich der Assimilation der Kohlensäure folgt. Der Eingriff des Stickstoffs im Ausbau der Lebenssubstanzen beginnt erst, nachdem aus der Kohlensäure organische Verbindungen entstanden sind.

Um die Grundzüge der biochemischen Wissenschaft kennenzulernen, ist es deshalb erforderlich, die Assimilations- und Dissimilationserscheinungen, die in dem lebenden Organismus zum Ablauf kommen, etwas genauer zu betrachten. Diese Reaktionen spielen sich im Pflanzen- und Tierreich in dem Element des Lebens, der Zelle, ab. Sie ist das Laboratorium, das die Natur mit den empfindlichsten und kompliziertesten Hilfsmitteln für den Ablauf der Lebensreaktionen eingerichtet hat. In ihren Funktionen äußerst verschieden sind die Zellen in der prinzipiellen Anordnung übereinstimmend, sodass die allgemeine Schilderung der in der Zelle verteilten physikalischen und

chemischen Einrichtungen über ihre wesentlichen Eigenschaften genügenden Aufschluss gibt. Die Kenntnis dieser Einrichtungen ist zum Verständnis der Assimilations- und Dissimilationsvorgänge notwendig. Zuvor aber wollen wir in großen Zügen die chemische Natur der an biochemischen Reaktionen beteiligten Stoffe betrachten.

Die Biochemie des lebenden Organismus

Da die lebenden Organismen, sowohl pflanzlicher wie tierischer Natur, aus Zellen bestehen, so ist die Chemie der Zelle auch die Grundlage für die Chemie des gesamten lebenden Organismus. Die Stoffe, die in der lebenden Zelle vorkommen, sind teils solche, die als Baumaterial der Leibessubstanz einen dauernden Bestandteil des Zellorganismus bilden, teils solche, die als Nahrung oder als Energielieferanten von der Zelle aufgenommen und in veränderter Form wieder abgeschieden werden. Daneben sind noch diejenigen chemischen Reaktionen zu berücksichtigen, welche den Wachstumsvorgängen dienen, also einer Neubildung von Zellsubstanz entsprechen für die Zeit, in welcher die Zellsubstanz eine Vermehrung erfährt. Zu den Stoffen, die man als das Baumaterial der Zelle ansprechen kann, gehören zunächst die Eiweißstoffe, welche einen großen Teil der festen Zellsubstanz ausmachen. Oft enthält die Zelle auch Stoffe holzartiger Natur, Zellulosestoffe und als nie fehlenden Bestandteil das Wasser, in dem anorganische und organische Stoffe gelöst sind. Je nach der Gattung, zu der die Zellen als selbstständiger Organismus zusammengetreten sind, ist der chemische Aufbau von diesem Grundschema abweichend. So enthalten viele Pflanzen Zellen, die ungemein stärkehaltig sind, und solche, die den grünen Blattfarbstoff, das Chlorophyll zu bilden vermögen. In den Tierarten weichen die Zellarten der einzelnen Organe erheblich

voneinander ab. Die Zellen des Blutes, die roten Blutkörperchen, enthalten den Blutfarbstoff. Das Hämoglobin, der für die Tiere eine ebenso bedeutsame Funktion besitzt, wie sie das Chlorophyll für die Pflanzen ausübt. Wie der dauernde Bestand der Zelle mit der Natur des Organismus wechselt, so schwankt auch der vorübergehende durch den Stoffwechsel bedingte Bestand an Stoffen von Art zu Art, sodass es unmöglich ist, sämtliche Substanzen, die dauernd oder vorübergehend einer Zelle angehören, chemisch zu betrachten. Nur die Wichtigsten sollen kurz besprochen werden.

Außer dem Wasser, das den Hauptbestandteil der anorganischen Verbindungen des lebenden Organismus ausmacht, kommen noch zahlreiche Mineralstoffe dauernd in ihm vor, die zum Teil das Material des Organismus mitbilden zum Teil als Produkte des Stoffwechsels ununterbrochen in ihm vorhanden sind. Die wasserärmsten Organe des lebenden Organismus sind der Zahnschmelz, das Fettgewebe und die Knochen. Von freien Säuren kommen nur die im Magen vorhandene Salzsäure und die in der Expirationsluft enthaltene Kohlensäure in Betracht. Freie Basen findet man im Organismus nicht. Den wesentlichsten Bestandteil der weiteren Mineralstoffe bilden die Salze. Das wichtigste, in allen Körperflüssigkeiten vorkommende Salz ist das Chlornatrium oder Kochsalz. Ein erwachsener Mensch nimmt täglich etwa 15—17 g Kochsalz ein und scheidet eine gleiche Menge wieder aus. Trotzdem ist das Kochsalz für die Lebensprozesse unumgänglich notwendig, wahrscheinlich, weil es durch die Regulierung des osmotischen Druckes den Flüssigkeitstransport durch die Zellmembran und Gewebsmembran reguliert und sich an der Salzsäurebildung im Magensaft beteiligt. Chlorkalium findet sich in allen Zellen und in den roten Blutkörperchen, während im Blutserum und in der Lymphe Soda, im Pankreassaft, Galle und Blut doppeltkohlensaures Natrium

vorhanden ist. Etwa 10% der anorganischen Bestandteile des Knochens besteht aus Kalziumkarbonat, das auch in den Zähnen und als saures kohlensaures Kalzium in Blut und Lymphe enthalten ist« Den Hauptbestandteil der Knochenasche bildet das Kalziumphosphat mit etwa 85%, Magnesiumphosphat ist in geringerer Menge in ihr enthalten. In den Muskeln ist das vorwiegende Salz das sekundäre Kaliumphosphat. Außerdem finden sich in Knochen und Zähnen noch geringe Mengen Fluorkalzium. Ferner enthält der tierische Organismus Spuren von Jod und Arsen. Andere anorganische Substanzen, wie Eisen, Schwefel und Phosphor, befinden sich innerhalb des Organismus in Verbindung mit organischer Substanz oder als Bestandteile organischer Substanz; sie gehören deshalb zu den organischen Verbindungen des Organismus.

Bei der Untersuchung der Pflanzenasche ergibt sich, dass außer Schwefel und Phosphor, — Elementen, die aus den organischen Stoffen der Pflanzenzelle stammen — noch die Metalle Kalium, Magnesium und Eisen und meist auch Kalzium für die Entwicklung der Pflanzen notwendig sind. Die Metalle sind teils als Salze, teils in organischer Bindung in den lebenden pflanzen vorhanden. Häufig findet man auch in der Asche andere Stoffe, Natrium, Kieselsäure und Chlor. Die quantitative Verteilung der Stoffe ist in den verschiedenen Pflanzen eine ungemein wechselnde.

Die für den lebenden Organismus wichtigsten organischen Substanzen sind für Pflanzen und Tiere die gleichen, und zwar die Kohlenhydrate, die Fette und die Eiweißkörper. Da dieselben auf ihrem Wege durch den Organismus die mannigfachsten Veränderungen erleiden, so sind auch die durch die Zersetzung, den Abbau und erneuten Aufbau entstehenden Verbindungen von wesentlichem Interesse.

Die Reaktionen, die sich im lebenden Organismus abspielen, unterscheiden sich ihrer Art nach wesentlich von den künstlich ausführbaren. Sie sind einerseits meist viel komplizierter, andererseits spielen sie sich bei verhältnismäßig niedriger Temperatur, nämlich der des lebenden Organismus, mit einer Geschwindigkeit und in einer Weise ab, die wir, wenn überhaupt, meist nur durch äußerst heftige chemische Einflüsse herbeiführen können. Ferner aber unterliegen sie einer regulierenden Kraft, die in dem lebenden Organismus selbst ihren Sitz hat und normalerweise die Reaktion so lenkt und leitet, dass der höchsten Aufgabe des lebenden Organismus, seiner Lebenserhaltung, durch sie gedient ist. Sie unterliegen also scheinbar einem zweckmäßigen Willen. Diese Erscheinung gab zuerst die Veranlassung, alle in einem lebenden Organismus sich abspielenden Reaktionen abseits der gewöhnlichen physikalischen und chemischen Vorgänge zu stellen, ihre Abhängigkeit von den physikalischen Gesetzen zu bestreiten und eine in dem Organismus sitzende Lebenskraft für seine Reaktionen verantwortlich zu machen.

Eine solche Auffassung würde eine naturwissenschaftliche Erkenntnis aller dieser Vorgänge unmöglich machen; denn indem sie außerhalb der chemischen Gesetze gestellt werden, erkennt man an, dass die naturwissenschaftliche Betrachtung eben nicht imstande ist, die erforderliche Aufklärung zu geben. Obgleich wir noch weit von der Letzteren entfernt sind, so zeigt doch eine geeignete Problemstellung, dass man nach und nach die Prozesse des lebenden Organismus unter die naturwissenschaftlichen Gesetze bringen kann.

Diese Problemstellung lautet folgendermaßen:

Welche Hilfsmittel besitzt der Organismus, um Reaktionen zum Ablauf zu bringen und ihren Ablauf zu regulieren? *Von*

welchen physikalischen und chemischen Faktoren ist die Tätigkeit dieser Hilfsmittel abhängig?

Erst wenn diese Frage gelöst ist, kann jene weitere Fragestellung in Angriff genommen werden, auf welchem Wege diese Hilfsmittel im Organismus entstanden sind und entstehen.

Um den angeregten Fragen näherzukommen, wollen wir einige in dem lebenden Organismus sich abspielende Vorgänge etwas genauer betrachten, und zwar zunächst den Vorgang der Verdauung im Magen. Die Fähigkeit der Selbstregulierung eines lebenden Organismus zeigt sich darin, dass die chemischen Prozesse, die sich in ihm abspielen, sich in der Geschwindigkeit ihres Ablaufs und in ihrem Umfang den Lebensbedingungen des Organismus gerade anpassen. Wir wissen, dass ein Teil der Kohlenhydrate zur Erhaltung der Körpertemperatur, zur Ausführung der willkürlichen und unwillkürlichen Bewegung im Organismus verbrannt wird. Wir sehen, dass ein anderer Teil der Kohlenhydrate trotz der Gegenwart der gleichen Oxidationsmittel nicht verbrannt, sondern aufgespeichert und nur als Reservematerial abgelagert wird. Eiweißstoffe werden im Magen und im Darm verdaut und resorbiert. Gleichzeitig aber bleibt das Eiweiß der lebenden Zelle selbst gegen die verdauenden und oxidierenden Einflüsse geschützt.

Der Sauerstoff zirkuliert im Blut, begabt mit starken Oxidationseigenschaften. Und doch finden wir die leicht oxidablen Gewebe, die vom sauerstoffhaltigen Blute umspült werden unempfindlich gegen diesen Sauerstoff. Um in diese verwickelten Verhältnisse einen Einblick zu gewinnen, gibt es nur den wissenschaftlichen Weg, zunächst nach einfacheren Fällen zu suchen, welche die gleiche Eigenschaft der Regulierung chemischer Prozesse bieten.

Wir können die Frage, die uns hier beschäftigt, dahin präzisieren, dass die Geschwindigkeit, mit der eine Reaktion abläuft, innerhalb weiter Grenzen regulierbar ist. Eine unendlich kleine Reaktionsgeschwindigkeit ist praktisch gleichbedeutend mit einem Stillstand des chemischen Geschehens. Von diesem Nullpunkt aus sind alle Abstufungen in der Geschwindigkeit bis zum explosionsartigen Verlauf denkbar. Können wir bei einfachen Reaktionen diese Reaktionsgeschwindigkeit beeinflussen, und wenn ja, mit welchen Mitteln geschieht es?

Man weiß schon lange, dass bestimmte Reaktionen nur in Gegenwart eines sich anscheinend an der Reaktion nicht beteiligenden Stoffes eintreten; und zwar genügt merkwürdigerweise oft eine Spur dieses die Reaktion bedingenden Stoffes, um große Umsetzungen bei den reagierenden Bestandteilen zu erzielen. So bleibt das metallische Eisen an vollkommen trockener Luft trotz der Gegenwart des Sauerstoffs unoxidiert, solange man es auch dem Einfluss des Sauerstoffs aussetzen mag. Die geringste Spur Wasser aber genügt, um das Rosten des Eisens herbeizuführen, und zwar hält dieser Oxidationsprozess so lange an, als Eisen und Sauerstoff vorhanden sind, während die geringe Spur Wasser, die erst die Reaktion ermöglicht, der Menge und Zusammensetzung nach unverändert bleibt und sich anscheinend an der Reaktion überhaupt nicht beteiligt. Ein anderes Beispiel ist das folgende: Wenn Schwefel an der Luft verbrennt, so bildet sich die schweflige Säure SO_2 , die niedrigste Oxidationsstufe des Schwefels. Durch weiteren Sauerstoff gelangt man zu der Verbindung SO_3 , die mit Wasser die Schwefelsäure liefert und deshalb als Schwefelsäureanhydrid bezeichnet wird. Es gelingt nun nicht, dieses Schwefelsäureanhydrid aus der schwefligen Säure und Sauerstoff zu erzeugen, selbst wenn man die

beiden Gase — SO_2 ist gleichfalls ein Gas — bei höherer Temperatur lange Zeit zusammenhält.

Setzt man aber dem Gasgemisch eine Spur metallischen Platins zu, so vollzieht sich die Umsetzung zu Schwefelsäureanhydrid bei $300\text{--}400^\circ$ mit großer Geschwindigkeit, sodass auf diese Tatsache eine ganze Industrie der Schwefelsäurefabrikation aufgebaut werden konnte.

Bereits in der ersten Hälfte des vorletzten Jahrhunderts hat der berühmte schwedische Forscher Berzelius (1749-1848) solche Erscheinungen beobachtet und sie als Kontakt-(Berührungs-)Erscheinungen beschrieben, in der Annahme, dass das Wesentliche für die Auslösung der Reaktion in der Berührung der reagierenden Stoffe mit dem Stoff besteht, welcher an der Reaktion selbst nicht teilnimmt. Ohne auf die Ursache dieser Wirkungen hier einzugehen, kann man allgemein sagen, dass durch das Vorhandensein der Kontakt-Substanzen die Reaktion ausgelöst wird. Und man nennt deshalb diese Substanzen Katalysatoren, d. h. Auslöser. Die Reaktion selbst, die sich unter dem Einfluss der Katalysatoren abspielt, bezeichnet man als katalytische Reaktion. Man kann also das Wesen der Katalysatoren aus den beobachteten Erscheinungen folgenderweise definieren: Katalysatoren sind Stoffe, die, ohne anscheinend an der Reaktion teilzunehmen, die Geschwindigkeit ganz maßgebend beeinflussen.

Im weiteren Verlauf der wissenschaftlichen Untersuchung dieser Fragen lernte man Katalysatoren kennen, welche Reaktionen auch zu hemmen und zu verlangsamen vermögen. Es genügen daher auch die einfachen Hilfsmittel des Laboratoriums, nur im gewissen Sinne Reaktionen zu regulieren. Es ist, um tiefer in das Problem der Katalyse einzudringen, erforderlich, die Gesetze und Möglichkeiten

kennenzulernen, die uns für die Erzielung bestimmter Beschleunigungen oder Hemmungen zugänglich sind, und es ist ersichtlich, dass wir im Besitz solcher Kenntnisse mit der Aussicht auf Erfolg auch das kompliziertere Problem in Angriff nehmen können, das die Reaktionstätigkeit des lebenden Organismus stellt. Wir werden sehen, dass auch er sich des Hilfsmittels der Katalysatoren ausgiebig bedient, um je nach seinen Bedürfnissen Reaktionen zum Ablauf zu bringen ihre Geschwindigkeit zu begrenzen oder scheinbar ganz zu unterdrücken.

Eine der charakteristischen Eigenschaften der Katalysatoren ist ihre Fähigkeit, in äußerst geringer Menge sehr beträchtliche Umsetzungen herbeizuführen, ohne durch die Reaktion verbraucht zu werden. Dieselbe Eigenschaft findet man bei einer großen Anzahl von Stoffen, die entweder selbst lebendig sind oder aus einem lebenden Organismus stammen. Eins der ältesten und bekanntesten Beispiele hierfür bietet die alkoholische Gärung des Zuckers, in welcher durch die Gegenwart einer geringen Menge eines niederen Pilzes, des Hefepilzes, die Zersetzung großer Zuckermengen zu Alkohol und Kohlensäure herbeigeführt wird. Die Hefe bleibt dabei dauernd wirkungsfähig und kann, wenn sie dem allmählich vergiftenden Einfluss des immer reichlicher entstehenden Alkohols entzogen wird, stets neue Mengen Zucker in Gärung versetzen.

Hier finden wir also an einem lebenden Organismus die Eigenschaften wieder, die bei dem Rostprozess des Eisens das Wasser, bei der Entstehung des Schwefelsäureanhydrids das Platin ausüben. Man ist daher, wenigstens formal, berechtigt, die Hefewirkung als eine katalytische anzusprechen.

Im Magensaft findet eine Spaltung der unlöslichen Eiweißstoffe statt, durch welche lösliche Produkte, die von

den Gewebesäften des Organismus aufgenommen werden können, entstehen. Diese Umwandlung tritt aber nur in Gegenwart eines von der Magenschleimhaut erzeugten Stoffes, des Pepsins, auf, das auch außerhalb des Magens die Fähigkeit der Verdauung der Eiweißkörper beibehält. Weil man die Hefe als ein Ferment, d. h. Gärungserreger bezeichnete, so hatte man Substanzen, die wie das Pepsin in gewissem Sinne eine ähnliche Funktion ausüben, gleichfalls Fermente genannt und den Unterschied, dass es sich bei der Hefe um einen lebenden Pilz, bei dem Pepsin um eine leblose Substanz handelt, dadurch hervorgehoben, dass man Ersteres ein geformtes, Letzteres ein ungeformtes Ferment genannt hat.

Heute wissen wir, dass auch in den geformten Fermenten leblose Substanzen, wie das Pepsin, die wirksamen Agenzien sind, und man bezeichnet deshalb alle derartigen Substanzen, auch wenn sie an geformte Fermente gebunden sind und noch nicht von ihnen getrennt werden können, wie es bei manchen Bakterien der Fall ist, als Enzyme, d. h. im lebenden Organismus erzeugte Substanzen.

Außer dem Pepsin im Magensaft sind aus fast allen Organen und Organsäften Enzyme isoliert worden, die ganz bestimmte chemische Reaktionen katalytisch beeinflussen. So befindet sich im Speichel eine Substanz, Diastase, genannt, welche die Verzuckerung der Stärkearten besorgt, im Blut die Hämasase und Oxidase, die beide die Verbrennungsvorgänge im Organismus regulieren, im Darm das Trypsin und Erepsin, das einen Teil der Eiweißverdauung besorgt, in den verschiedensten Organen fettspaltende Enzyme, Lipasen genannt, ferner in Leber, Galle, Pankreas eine große Anzahl dieser wirksamen Enzyme.

Eine Eigenschaft dieser Enzyme muss ganz besonders hervorgehoben werden, um den Reichtum an Mitteln, den die Natur dem Organismus zur Verfügung stellt, zu verstehen. Jedes Enzym ist nur einer ganz bestimmten Reaktion angepasst und ohne Einfluss auf irgendeine andere Reaktion, sodass jeder chemische Vorgang im Organismus einen eigenen Regulator besitzt, der genau auf die zu regulierende Umwandlung abgestimmt erscheint.

Wenn man einen kleinen elektrischen Lichtbogen zwischen zwei Metallspitzen in einer Weise, wie sie bei der Bogenlampe ausgeübt wird, überspringen lässt, so verdampft das Metall bei der hohen Temperatur, die etwa 3000 Grad betragen mag. Man kann diesen Lichtbogen auch in reinem Wasser erzeugen, wenn man die Enden der mit einer starken elektrischen Stromquelle verbundenen Metallstäbe unter Wasser nahezu in Berührung bringt. Dann verdampft das Metall, wie in der Luft, kühlt sich aber sofort in dem umgebenden Wasser wieder ab und bleibt als äußerst fein verteilter Metallnebel im Wasser schwebend.

Es entsteht so eine Art Lösung des Metalls in Wasser, die sich aber von einer gewöhnlichen Lösung, wie einer Salz- oder Zuckerlösung, durch viele Eigenschaften scharf unterscheidet. Wenn auch die einzelnen Metallnebelteilchen selbst bei starker Vergrößerung dem Auge unsichtbar bleiben, so muss man doch annehmen, dass es sich um sehr fein verteilte Suspensionen d. h. Schwebungen handelt. Das lässt sich dadurch erweisen, dass solche Metalllösungen nicht durch Pergament hindurchfiltrieren, sondern dass nur das Wasser die Poren des Pergaments durchdringt, das Metall aber zurückgehalten wird, während Salz- und Zuckerlösungen ungehindert durchzutreten vermögen. Man kennt eine große Anzahl von Substanzen, welche, in Wasser gebracht, in diesem Sinne nicht zu den wahren Lösungen gezählt werden können, sondern als ungemein feine

Suspensionen oder Schwebungen betrachtet werden müssen. Alle Eiweißstoffe gehören zu ihnen und alle Enzyme. Man bezeichnet solche Lösungen, denen die Fähigkeit einer Diffusion durch tierische oder pflanzliche Membrane abgeht, als kolloidale Lösungen. Durch das elektrische Verfahren ist man imstande, kolloidale Metalllösungen herzustellen.

Man hat je nach der Wahl der Metallstäbe, zwischen denen der Lichtbogen erzeugt wird, mit Leichtigkeit kolloidale Platin-, Gold-, Silber- usw. Lösungen herstellen können. Zwischen den Enzymlösungen und den kolloidalen Metalllösungen zeigen sich ganz überraschende Übereinstimmungen, die nicht zum wenigsten auf den bei beiden vorhandenen kolloidalen Zustand zurückgeführt werden müssen. Jedenfalls spielt die äußerst feine Verteilung der im Wasser vorhandenen Schwebeteilchen, die eine sehr große Oberfläche der kolloidal gelösten Substanzen schaffen, bei allen diesen Prozessen eine maßgebende Rolle. Den Wert, den die kolloidalen Metalllösungen für die Erkenntnis der Enzymwirkungen besitzen, besteht in der Möglichkeit eines Vergleichs der die beiden Erscheinungskreise beherrschenden Gesetze.

Die meisten Enzyme können eine bestimmte Reaktion katalytisch beeinflussen, und die gleiche Reaktion wird von den kolloidalen Metalllösungen hervorgerufen. Es handelt sich um die Zersetzung des Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff $H_2O_2 = H_2O + O$. Das unter entsprechenden Vorsichtsmaßregeln recht beständige Wasserstoffperoxid wird durch Zusatz einer geringen Menge eines Enzyms oder eines kolloidalen Metalls katalytisch sehr schnell zerfetzt, und für beide Vorgänge bildet die Menge des in bestimmten Zeiten abgespaltenen Sauerstoffs ein Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit, sodass ein unmittelbarer Vergleich der Wirkungen gegeben ist. Dabei zeigt sich, dass

die Enzyme im wesentlichen denselben Gesetzen der Reaktionsgeschwindigkeit unterliegen wie die kolloidalen Metalle, und dass speziell die Art ihrer Einwirkung auf das Wasserstoffperoxid übereinstimmt. Die Ähnlichkeiten sind aber noch weitergehend, was wohl mit der Empfindlichkeit des kolloidalen Zustandes im Allgemeinen zusammenhängt. Enzyme und kolloidale Metalllösungen zeigen Temperaturoptima ihrer Wirkungen. Beide verlieren ihre Wirksamkeit bei Temperaturen, die in der Nähe des Siedepunktes des Wassers liegen, beide können durch dieselben Stoffe vorübergehend betäubt oder ganz vergiftet werden, d. h. ihre Wirksamkeit gegenüber H_2O_2 für einige Zeit oder dauernd verlieren, und zwar sind diese Stoffe die gleichen, die wie Anilin, Blausäure, Sublimat auch als Blutgifte für den lebenden Organismus von Wichtigkeit sind. Die Enzyme sind wahrscheinlich in oder an den Zellen lokalisiert. Über ihre chemische Natur weiß man noch nichts, weil ihre Reindarstellung noch nicht gelungen ist.

Da der lebende Organismus häufig darauf angewiesen ist, einzelne der für seinen Bestand notwendigen Teile gegen chemische Angriffe zu schützen, so besitzt er auch eine große Anzahl hemmender Katalysatoren, der Antienzyme. So wird die Eiweiß enthaltende Wandung des Magens vor der verdauenden Wirkung des Pepsins durch ein Antipepsin bewahrt. Ebenso enthalten die sauerstoffempfindlichen Zellen, die der Oxidation bei der Berührung mit sauerstoffhaltigem Blut entzogen werden müssen, Enzyme mit der Eigenschaft, den Sauerstoff inaktiv, also ohne oxidierende Kraft, abzuspalten.

Nach dieser kurzen Einführung in das Wesen der Enzyme bleibt immer noch die wichtigste Frage offen „*Von welchen physikalischen und chemischen Faktoren ist die Tätigkeit der Enzyme abhängig?*“

Es mag so aussehen, als ob die Beantwortung durch die klassische Biochemie erfolgen kann. Doch dem ist nicht so. Genauso wie sich mit Max Plancks Erkenntnis der Quantelung von Energie vor mehr als 100 Jahren eine physikalische Revolution ihren Weg gebahnt hat, so stehen wir nun am Anfang einer biologischen Revolution, dem allmählichen Einzug der Quantenbiologie in die moderne Naturwissenschaft.

Bevor wir allerdings verstehen können, was auf molekularer Ebene mit den Enzymen in der Biologie passiert, müssen wir zahlreiche Themen wenigstens im Überblick streifen oder teilweise auch genauer betrachten.

Ein Bereich, bei dem quantenbiologische Effekte offener zutage treten, ist das Navigationssystem der Vögel.

Das Rotkehlchen und sein quantenbiologischer Magnetsinn

1965 regte der Ornithologe, Experte für den Vogelzug und damalige Ordinarius für Zoologie der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Friedrich Wilhelm Merkel an, die biologischen Grundlagen des Vogelzugs auch experimentell zu untersuchen. Dieser Anregung folgend, konstruierte Wolfgang Wiltschko für seine Doktorarbeit im Keller des Zoologischen Instituts in Frankfurt am Main einen speziellen Käfig, der einerseits vom Erdmagnetfeld genügend stark abgeschirmt werden konnte, um den herum er aber ein schwaches, statisches Magnetfeld künstlich erzeugen konnte. Bei seinem „Modelltier“ Rotkehlchen gelang ihm als erstem Forscher der experimentelle Nachweis, dass Tiere ein statisches Magnetfeld wahrnehmen und ihr Verhalten in Abhängigkeit von diesem Magnetfeld verändern können; seine Veröffentlichung dieser Befunde markierte den Beginn

eines neuen Forschungszweigs in der Verhaltensökologie. Später sicherte er seine Befunde durch Studien an Dorngrasmücken und Tauben ab.²

Anfangs stießen die Veröffentlichungen der Frankfurter Ornithologen auf große Skepsis bei ihren Fachkollegen, da es mehreren anderen Arbeitsgruppen nicht gelang, Wiltschkos Befunde zu reproduzieren und so zu bestätigen. Haupthindernis für die Wiederholbarkeit andernorts war, wie sich im Rückblick zeigte, dass einerseits das Erdmagnetfeld abgeschirmt, zugleich aber ein künstliches statisches Magnetfeld aufgebaut werden musste und dessen Intensität nicht allzu stark von der des Erdmagnetfelds abweichen durfte. Erst 1972 wurden die Frankfurter Forschungsergebnisse durch ihre Veröffentlichung in der Fachzeitschrift *Science* gleichsam international anerkannt; diese Veröffentlichung gilt heute gewissermaßen als die Erstbeschreibung eines neu entdeckten Sinnesorgans in der Tierwelt.³

Zwei Mal pro Jahr machen sich Millionen von Zugvögeln auf den Weg in wärmere oder kältere Gefilde. Tausende von Kilometern legen sie zurück, und ihr Navigationssystem ist von einer faszinierenden Präzision. In der Dunkelheit weisen ein magnetischer Kompass und der Sternenhimmel den Zugvögeln den rechten Weg. Wie dieser Orientierungssinn im Einzelnen funktioniert, erforscht seit einigen Jahren auch die Gruppe um Dr. Henrik Mouritsen am Institut für Biologie und Umweltwissenschaften der Universität Oldenburg. 2005 konnte das Forscherteam erstmals einen besonderen Gehirnbereich lokalisieren, der für das Nachtsehen bei nächtlich ziehenden Singvögeln zuständig ist. Diese als Cluster N bezeichnete Region wird aktiv, sobald die Vögel auf "Nachtflug" schalten. Bei geschlossenen Augen bleibt das Gehirnareal abgeschaltet.

Erst im Jahr davor hatte das Team von Mouritsen in Zusammenarbeit mit der Oldenburger Neurobiologiegruppe um Prof. Dr. Reto Weiler starke Hinweise darauf gefunden, dass die Zugvögel eine Art Magnetsensor beziehungsweise Kompass im Kopf haben, der in der Netzhaut der Augen lokalisiert ist. Zuvor war es ihnen gelungen, Cryptochrom-Moleküle in der Netzhaut zu identifizieren, die den Vögeln ermöglichen könnten, das Magnetfeld zu "sehen". Ihre Erkenntnisse über die Orientierung im Dunkeln mit Hilfe von Magnetsinn und Sternenhimmel führte sie zu der Hypothese, dass nächtliche Zugvögel ein spezialisiertes Nachtsicht-System besitzen müssen. Um diese Annahme zu prüfen, haben die Wissenschaftler die Genaktivitäten im Gehirn von nachziehenden Singvögeln und nicht wandernden Singvögeln verglichen.

Für die Versuche wählten sie zwei entfernt verwandte Arten Nacht wandernder Zugvögel aus - Rotkehlchen und Gartengrasmücken - und entsprechend zwei Arten von Nicht-Zugvögeln -Zebrafinken und Kanarienvögel. Die Tiere wurden im Zeitraum des normalen Vogelflugs (August bis Oktober und April bis Mai) in durchsichtige Käfige gesetzt, wo die Forscher ihr Verhalten genau beobachten konnten. Die Wissenschaftler simulierten den Tag-Nacht-Zyklus und sorgten dafür, dass die Vögel ansonsten nicht gestört wurden. Zu bestimmten Zeitpunkten am Tag oder in der Nacht wurden dann Genaktivitätsstudien an den Gehirnen der Tiere vorgenommen.

Gemessen wurde die Aktivität von zwei verschiedenen Genen, die angeschaltet werden, sobald Nervenzellen durch Reize stimuliert werden. Die Aktivität dieser Gene - ZENK und cfos - wurde mithilfe der In-situ-Hybridisierung bestimmt. Dabei wird die Boten-RNA nachgewiesen, die auf dem Weg vom Gen zum Protein gebildet wird und somit anzeigt, dass ein Gen angeschaltet ist.

Die Wissenschaftler entdeckten bei den Nacht wandernden Singvögeln ein Gehirnareal, das nur nachts eine hohe Genaktivität aufwies. Dieser als Cluster N (N für Nacht-Aktivierung) bezeichnete Gehirnbereich war hingegen bei jenen Singvögeln, die nachts nicht wandern, nicht zu finden - und bei den Zugvögeln verschwand die Aktivität, wenn man ihnen "Augenklappen" aufsetzte. Diese Ergebnisse bestätigen nach Meinung der Oldenburger Wissenschaftler die Hypothese, dass die Nacht wandernden Zugvögel einen spezifisch an den Nachtflug angepassten Gehirnbereich besitzen, der ihnen besseres Sehen und Navigieren im Dunkeln ermöglicht. ⁴

Der Magnetsinn im Auge funktioniert wahrscheinlich mithilfe der sogenannten Radikal-Paar-Bildung, die bereits 1976 von dem deutschen Biophysiker Klaus Schulten beschrieben wurde. Diesem Modell zufolge besteht der Magnetrezeptor aus einem Molekülpaar, das durch Licht aktiviert werden kann und anschließend, infolge der Übertragung eines Elektrons, ein sehr kurzlebiges, sogenanntes Radikal-Paar bildet. Dieses Paar alterniert ständig zwischen zwei quantenmechanisch möglichen Zuständen. Nach dessen Zerfall können sich Moleküle mit unterschiedlichen Eigenschaften bilden, je nachdem, in welchem Zustand sich dieses Radikal-Paar zuletzt befand. Dieser Endzustand ist dem Modell zufolge aber abhängig von der Inklination: Wenn die Magnetfeldlinien ausgeprägt senkrecht auf das Radikal-Paar treffen, entsteht ein anderes Verhältnis der beiden chemischen Endprodukte zueinander, als wenn die Magnetfeldlinien relativ flach auf das Radikal-Paar treffen. Im Ergebnis wird diesem Modell zufolge eine physikalische Gegebenheit (das örtliche Magnetfeld) in eine chemische Gegebenheit „übersetzt“ und so ein wesentlicher Schritt zur Wahrnehmung mithilfe eines spezialisierten Sinnesorgans zurückgelegt. ⁵