

Engelbert Broda

NEUE ERKENNTNISSE ÜBER DIE ENERGETIK DER LEBENDEN ZELLE

13. 1. 1964

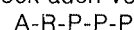
Schon vor langer Zeit ist der Mensch (und überhaupt das Lebewesen) mit einer Maschine (La Mettrie) und speziell mit einer Wärmekraftmaschine verglichen worden (DuBois-Reymond, Helmholtz). In der Tat leisten Menschen und Tiere ständig Arbeit, und die notwendige Energie wird durch Oxydation von Brennstoffen (Nährstoffen) zu Kohlendioxyd und Wasser durch den Luftsauerstoff geliefert. Insofern die Nährstoffe als Brennstoffe wirken, ist ihr Wert in Kalorien auszudrücken: Ein Kilogramm Kohlehydrat (Stärke) liefert 4100, Fett 9300, Eiweiß 4100 kg-Kalorien (kcal). Zum Vergleich: Steinkohle etwa 7000 kcal. Für tatsächlich verwendete Lebensmittel lauten die Zahlen: Butter 8000, Weizen 3300, Gurken 120 kcal.

Freilich ist der lebende Organismus auch weiterer Leistungen als der Leistung äußerer Arbeit fähig: Er paßt sich an, er erneuert sich, er repariert sich selbst, er pflanzt sich fort. Energetisch betrachtet, sind auch für diese Aktivitäten, die nicht als mechanische Arbeit in Erscheinung treten, Arbeitsleistungen erforderlich („Innere Arbeit“). Wegen der Notwendigkeit der ständigen Erneuerung, die zum Begriff des „dynamischen Zustands“ der Lebewesen führt (Schoenheimer, Hevesy), ist ständige Arbeitsleistung sogar im Zustand äußerer Ruhe erforderlich („Grundumsatz“).

Im Gegensatz zu Wärmekraftmaschinen erfolgt die Arbeitsleistung nicht auf dem Weg über die Ausnützung einer Temperaturdifferenz, sondern die Lebewesen arbeiten annähernd isotherm als („chemodynamische“) Maschinen. Das wird unter Verwendung der aus dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik abgeleiteten Formel für die reversible (optimale) Arbeit von Wärmekraftmaschinen $A/Q = (T_1 - T_2)/T_1$ klar. Man setzt für T_2 die Körpertemperatur (310 Grad Kelvin = 37 Grad Celsius) und für A/Q den tatsächlich unter günstigen Bedingungen bei mechanischer Arbeitsleistung durch den Menschen beobachteten Wirkungsgrad von 25 Prozent (bezogen auf den kalorischen Wert der Brennstoffe) ein. Dann ergibt sich mindestens (optimal) für $T_1 = 415 \text{ Grad K} = 142 \text{ Grad Celsius}$, also eine im Körper auch nicht annähernd vorkommende Temperatur. NB: Eiweiß (= Protein) beginnt sich bei Temperaturen wenig oberhalb der Körpertemperatur zu zersetzen.

Man nimmt vielmehr an, daß der Energiegehalt der Nährstoffe, der bei ihrem stufenweisen chemischen Abbau durch Enzyme (= Fermente) frei wird, zunächst als chemische Energie eines universellen biologischen Energie-Akkumulators (ATP) gespeichert wird. Die Energie kann sodann in dieser Form direkt – ohne den Umweg über Wärme – zur Arbeitsleistung herangezogen werden. Das ATP (Adenosintriphosphat), gewissermaßen das Lebenselixier, ist eine weiße, kristallisierte Substanz, die um 80 Schilling/Gramm im Handel zu haben ist. Ihr Molekulargewicht ist 507 und ihre

chemische Formel $C_{10}H_{16}O_{13}N_5P_3$. Die Formel des ATP kann für unseren Zweck auch vereinfacht



geschrieben werden, wobei A die „heterozyklische Base“ Adenin, R den Zucker Ribose und P-P-P drei aneinander geknüpfte Moleküle Phosphorsäure (Triphosphorsäure) darstellen. Die Gruppierung A-R heißt Adenosin.

Bei der Abtrennung des letzten Moleküls Phosphorsäure vom Rest des Moleküls unter Anlagerung der Atome des Wassers („Hydrolyse“ oder „Spaltung“ von ATP) unter Bildung von A-R-P-P (auch als Adenosindiphosphat, ADP, bezeichnet) und P (Phosphorsäure) wird die verhältnismäßig große Energie (genauer: freie Energie) von etwa 12 kcal je Gramm-Molekül (= Mol) frei; dies entspricht etwa 24 kcal/kg ATP. Deshalb wird das ATP nach Lipmann als energiereiche Verbindung bezeichnet. Die Moleküle ATP stellen also gewissermaßen Energiepakete dieser Standardgröße, auf deren Nutzbarmachung der Organismus eingerichtet ist, zur Verfügung.

Das ATP wird aus seinen Bestandteilen A-R-P-P und P innerhalb der Zellen aufgebaut und auch dort verwertet. Für die höheren Tiere existieren zwei Bildungsmöglichkeiten von ATP-Gärung und Atmung. Der Einfachheit halber beschränken wir uns hier auf den Fall der Kohlehydrate, und zwar speziell des biologischen Standard-Zuckers Glukose (Traubenzucker). Bei seiner Vergärung (Embsen, Meyerhof, Parnas) läuft eine durch 11 spezifische Enzyme katalysierte Reihe von 11 Reaktionen ab. Das Endprodukt ist die Milchsäure (2 Moleküle je Molekül Glukose). Sauerstoff wird bei dieser Reaktionsfolge nicht verbraucht, sondern die Atome der Glukose werden zur Milchsäure umgruppiert. Im Verlauf dieser Reaktionsfolge entstehen 2 Moleküle ATP für jedes Molekül Glukose.

Diese ohne Verwendung von Sauerstoff verlaufende (anaerobe, also nichtoxydative) Vergärung der Glukose ist unter physiologischen Bedingungen der Sauerstoffknappheit (z. B. bei momentanen großen Anstrengungen, wo der Sauerstoffzufluß dem Bedarf nicht nachkommt) auch für Tier und Mensch eine Notwendigkeit.

Jedoch liefert die vollständige oxydative (aerobe) Verwertung der Glukose bis zum Kohlendioxyd und zum Wasser, die der Gegenstand der Atmung ist, natürlich viel mehr Energie – nämlich 38 Moleküle ATP je Molekül Glukose. Auch die gegebenenfalls zunächst durch Gärung entstandene Milchsäure muß letzten Endes durch Veratmung weggeschafft werden. Die Atmung, deren Mechanismus vor allem durch Szent-György und Hans Krebs aufgeklärt wurde, ist im Vergleich zur Gärung ein viel wirkungsvollerer, aber auch viel komplizierterer und empfindlicherer Prozeß.

Die Enzyme der Gärung kommen im Zellsaft gelöst vor. Dagegen werden die entscheidenden Schritte der Atmung durch Enzyme katalysiert, die in der Wand der sogenannten Mitochondrien in räumlich definierten Positionen sitzen, so daß die zu verarbeitenden Moleküle („Substrate der Enzyme“) wie am Fließband von einem Ort zum nächsten Ort weitergereicht werden können. Die Natur betreibt hier gewissermaßen angewandte Festkörperphysik. In typischen Zellen höherer

Organismen kommen je mehrere tausend Mitochondrien vor, ovale Körperchen, die unter dem Lichtmikroskop gerade erkennbar sind, deren Einzelheiten aber unter dem Elektronenmikroskop studiert werden müssen. Sie sind mit nicht durchlaufenden Querwänden versehen, um mehr Enzym aufnehmen zu können. Die Mitochondrien sind die Kraftwerke der Zellen.

Gärung und Atmung finden in dieser (oder sehr ähnlicher) Weise in den Zellen der höheren Tiere und auch der Pflanzen statt. Durch die Arbeiten von Arnon hat man vor einigen Jahren erkannt, daß die grünen Pflanzen noch eine weitere Möglichkeit zum Aufbau von ATP besitzen. Sie können nämlich in ihren Chloroplasten, also den Zellbestandteilen, welche Chlorophyll enthalten, unter Verwendung von Lichtenergie ATP direkt durch „Photophosphorylierung“ aus ADP und P aufbauen. Sie müssen also nicht den Umweg über den Aufbau von Zuckern und deren oxydative Verwertung in Mitochondrien gehen.

Sämtliche heute noch existierende Lebewesen verwenden das Elixier ATP. Das ATP wird für Arbeit aller Art verwendet, und die weitere Forschung bestätigt dies in bezug auf immer neue Formen biologischer Arbeitsleistung.

1. Chemische Arbeit. Viele lebensnotwendige synthetische Leistungen der Zelle sind „endergonisch“, d. h. sie erfordern Zufuhr freier Energie. Dazu gehört die Verknüpfung von Aminosäuren (Eiweiß-Bausteinen) zu Eiweißmolekülen. Jede solche Verknüpfung (Bindung zweier Moleküle Aminosäure aneinander) ist nun mit der Hydrolyse eines Moleküls ATP gekoppelt, d. h. die freie Energie wird durch diese Hydrolyse geliefert. In diesem Fall erfolgt die Hydrolyse ausnahmsweise gemäß $A-R-P-P = A-R-P + P$ („Pyrophosphat-Spaltung“).

2. Chemische Arbeit besonderer Art führt zur Muskelkontraktion (chemomechanische Reaktion). Nach moderner Vorstellung beruht die Kontraktion der Muskelfaser auf dem Ineinanderschieben zweier Bündel von Protein-„Filamenten“ – nämlich eines Aktinfilaments und eines Myosinfilaments (H. E. Huxley, A. F. Huxley). Dabei wird ATP hydrolysiert (Engelhard). Bis zu einem gewissen Grad kann diese Reaktion auch schon an homogenen Lösungen von „Aktomyosin“

beobachtet werden (Szent-György). Man glaubt, daß die Energie des ATP zunächst dazu dient, eine Brückenbindung zwischen gegenüberliegenden Stellen von Aktin und Myosin herzustellen. In einem weiteren Stadium wird diese Bindung in einer „exergonischen“, also spontanen Reaktion durch eine Brückenbindung zu einem benachbarten Ort ersetzt. Aus dieser Verschiebung ergibt sich ein longitudinaler Zug. Diese Reaktionsfolge wird viele Male je Sekunde wiederholt, was zu einer makroskopischen Kontraktion führt.

3. Osmotische Arbeit. Die Lebensvorgänge erfordern die Aufrechterhaltung enormer Konzentrationsdifferenzen bezüglich mancher Stoffe zwischen benachbarten Räumen, obwohl die Membranen, die diese Räume voneinander trennen, für die betreffenden Stoffe durchlässig sind. Z. B. ist die Konzentration der Kalium-Ionen in den meisten Zellen 50mal größer als in der umspülenden extrazellulären Flüssigkeit, obwohl die Zellmembran Kalium-Ionen durchläßt. Diese Konzentrationsdifferenz wird durch eine sogenannte Ionenpumpe aufrechterhalten, die ununterbrochen gegen den Konzentrationsgradienten arbeitet. (Für die 100 Billionen Zellmembranen des Menschen mindestens ebenso viele Pumpen.) Die Arbeitsleistung wird, wie man glaubt, durch die freie Energie des ATP gespeist.

4. Ein Nebenprodukt der osmotischen Arbeit ist die Ausbildung elektrischer Potentiale (oft der Größenordnung 100 Millivolt) an Zellgrenzflächen; sie ergeben sich durch den Transport der elektrischen Ladungen der Ionen. Bei manchen Zellen wurde dann das elektrische Potential entwicklungsgeschichtlich zur Erzeugung schwacher bis sehr starker elektrischer Felder benützt, die als „Radareinrichtung“ dienen, z. B. im elektrischen Organ der elektrischen Fische, die die Zellen in Serie schalten und so Spannungen von 500 Volt erzeugen.

5. In besonderen Fällen, z. B. in Glühwürmchen, wird ATP auch zur Lichterzeugung herangezogen. Auch die Regeneration des Sehpurpurs in der Netzhaut nach seiner Bleichung durch Licht erfolgt zweifellos unter Benützung der Energie des ATP.

Eine direkte Energielieferung an Organismen oder Zellen durch von außen herangebrachtes – etwa synthetisches – ATP kommt leider nicht in Frage, da das ATP die Zellmembran normalerweise nicht durchdringen kann. (Nur durch besondere Maßnahmen ist es Straub gelungen, ATP in vitro in Blutkörperchen einzuführen.) Übrigens ergibt die Rechnung, daß ein menschlicher Organismus im Lauf eines Tages größenordnungsmäßig 100 kg ATP spaltet und wieder aufbaut, um seinen „Verpflichtungen“ nachzukommen, so daß der Preis der nötigen ATP-Menge (selbst mit Mengenrabatt) exorbitant wäre.

Von größtem Interesse sind die entwicklungsgeschichtlichen Aspekte der mit ATP arbeitenden chemodynamischen Maschine, als die wir das moderne Lebewesen betrachten können. Das ATP ist ja ein recht komplizierter Stoff, und so muß man vermuten, daß die Vorstufen der heutigen Lebewesen, die „Eobionten“, im damaligen Ozean (der Ursuppe) sich einfacherer Energieträger bedient haben. Ihre Natur ist aber unbekannt.

Freitag, 10. Jänner, 18.30 Uhr: Direktor Dr. Ernst Nowotny:

Stefan Zweig – Leben und Werk

(Gemeinsame Veranstaltung mit dem Verein „Arbeitermittelschule“)

Montag, 13. Jänner, 18.30 Uhr: Univ.-Prof. Dr. Engelbert Broda:

Neuere Erkenntnisse über die Energetik der Lebewesen

Dienstag, 14. Jänner, 18.30 Uhr: Prof. Alois Jalkotzy:

Die Ursachen des bedrohlichen Anstiegs der Jugendkriminalität und die Möglichkeiten ihrer Bekämpfung
(Siehe auch Diskussion über dieses Thema am 21. Jänner)

Mittwoch, 15. Jänner, 18.30 Uhr: Herbert Eisenreich (Sandl, Oberösterreich):

Das Leben als Freizeit

Donnerstag, 16. Jänner, 18.30 Uhr: Dr. Josef Rauscher:

Hauptprobleme der Morawissenschaft
(In Verbindung mit dem Philosophischen Arbeitskreis)

Freitag, 17. Jänner, 18.30 Uhr: Stadtplaner Dipl.-Arch. Georg Conditt:

Stadtplanung als gesellschaftspolitisches Problem