

# Mikrobielle Energetik, eine Einführung

VON REINHARD BACHOFEN

Das Thema der Arbeitstagung «Energetik von Mikroorganismen» dürfte sowohl für die Biochemiker wie für die Mikrobiologen, die hier zusammengelassen sind, von gleichem Interesse sein. Wenn man die Literatur der bioenergetischen Forschung durchblättert, fällt auf, dass die Quellen des verwendeten biologischen Materials in den meisten Fällen die höheren Organismen sind: tierische Gewebe für die Präparation von Mitochondrien oder Blätter für die Isolierung von Chloroplasten. Die vielen Experimente, in denen mit diesen Organellen gearbeitet wurde, führten zur Entdeckung mannigfaltiger biochemischer Prozesse und energetisch wichtiger Komponenten und Strukturen und schliesslich zur Formulierung eines in vielen Punkten übereinstimmenden Konzeptes der Energieumsetzung in biologischen Membranen [1]. Abb. 1 zeigt Teile des Sauerstoff-, Kohlenstoff- und Wasserstoffzyklus in der Natur auf der Ebene der biochemischen Reaktionen in den energieumsetzenden Organellen höherer Organismen. Über diese skizzierten Elektronenfluss-Systeme findet in überwiegendem Masse die Umwandlung von Lichtenergie der Sonne in chemische Energie statt [2], wie auch die wesentlichen Energieumsetzungsvorgänge in Mensch und Tier.

Wird der Energiestoffwechsel der Mikroorganismen mit in diese Betrachtung einbezogen, so scheint das skizzierte grundlegende Konzept weitgehend verloren zu sein. Einige Beispiele:

- Bei der Photosynthese treten verschiedenste Elektronendonatoren anstelle von Wasser auf (Beispiel Rhodospirillaceae, Tab. 1 und Abb. 1. [3]) und NAD (P) wird vermutlich nicht in einer direkten Lichtreaktion reduziert [4].
- Als Elektronenakzeptor der Atmungskette kann Sauerstoff ersetzt werden u. a. durch Nitrat, Sulfat oder  $\text{CO}_2$  [5].
- Organische oder anorganische Elektronendonatoren mit einem Redoxpotential, das weit positiver ist als dasjenige von NAD, werden über ähnliche Elektronentransportketten oxidiert.
- Reduzierte Elektronenüberträger mit negativerem Potential als NAD führen in Kombination mit Hydrogenase zur Freisetzung von molekularem Wasserstoff; dieser kann über gleiche Systeme als Reduktionsmittel wieder in den Stoffwechsel eingebracht werden.

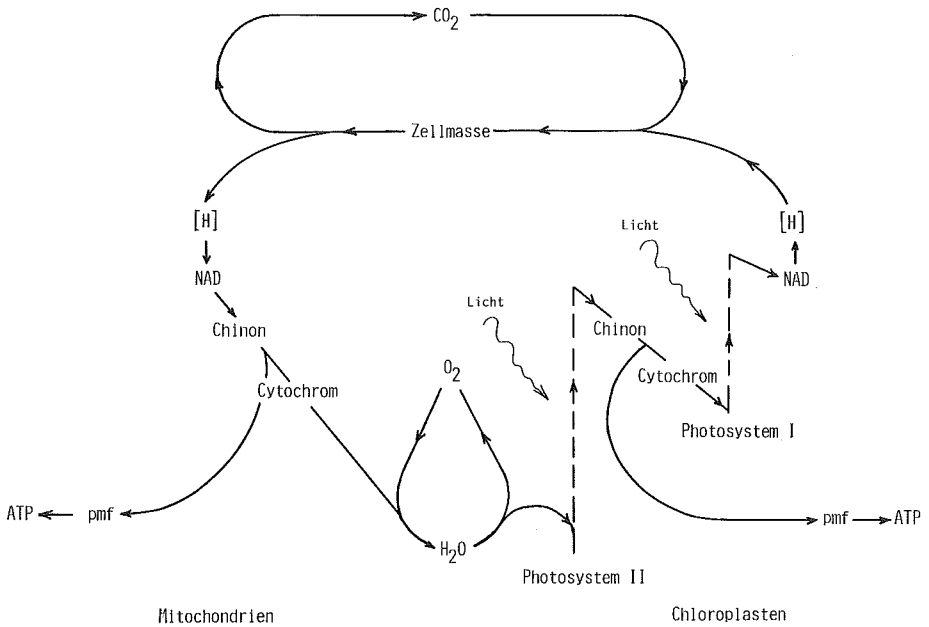


Abb. 1 Elektronenfluss in Auf- und Abbaureaktionen höherer Organismen.

Zwei Faktoren scheinen mir bestimmend zu sein für diese Vielfalt:

- die Evolution einerseits der aeroben Organismen im räumlich grössten Teil der Biosphäre, verglichen mit den mikrobiellen Spezialisten in besonderen ökologischen Nischen;
- der Druck der Umweltbedingungen, der sich auf Mikroorganismen mit ihrer grösseren Kontaktfläche zur Umwelt weit mehr auswirken kann als auf Zellen in Geweben höherer Organismen und welcher schliesslich auch zu Anpassungen an Bedingungen extremer Standorte, etwa in bezug auf pH, Temperatur oder Salzgehalt, geführt hat.

Abweichungen im Energiestoffwechsel können oft im gleichen Biotop räumlich oder zeitlich sehr nahe beieinander beobachtet werden. Nehmen wir als Beispiel das Ökosystem Teich/See mit der Aufteilung in eine mehr fluktuierende Phase des Wasserraumes und der stabileren Zone der Sedimente, den Lebensraum im übrigen, in welchem ich vor 20 Jahren die ersten wissenschaftlichen Schritte tat [6].

In vielen unserer meist mehr oder weniger eutrophen Seen des Mittelandes ist im Sommer das Hypolimnion oft bis auf wenige Meter unter der Oberfläche sauerstofffrei. Das Epilimnion, die Produktionszone, enthält die autotrophen Produzenten, welche Sauerstoff freisetzen und  $\text{CO}_2$  in Biomasse umwandeln. Letztere sedimentiert schliesslich und wird während des Absinkens

Tabelle 1: Mögliche Elektronendonatoren und Kohlenstoffquellen für drei biochemisch häufig untersuchte photosynthetische Bakterien aus der Familie der Rhodospirillaceae [3].

Substrat	<i>Rhodospirillum rubrum</i>	<i>Rhodopseudomonas spheroides</i>	<i>Rhodopseudomonas palustris</i>
Aethanol	+	+	+
Azetat	+	+	+
Arginin	+	?	-
Aspartat	+	?	-
Benzoat	-	-	+
Butyrat	+	+/-	+
Capronat	+	+/-	+
Caprylat	?	+/-	+
Citrat	-	+	-
Formiat	-	?	+
Fruktose	+/-	+	-
Fumarat	+	+	+
Glukonat	-	+	?
Glukose	-	+	-
Glutamat	+	?	+
Glycerin	-	+	+
Laktat	+	+	+
Malat	+	+	+
Mannit	-	+	-
Methanol	+/-	?	-
Propionat	+	+/-	+
Pyruvat	+	+	+
Succinat	+	+	+
Tartrat	-	+	-
Valeriat	-	+/-	+
Wasserstoff	+	+	+
Sulfid	(+)	?	(+)
Thiosulfat	-	-	+

+ = wird gebraucht, +/- = wird von einzelnen Stämmen gebraucht, (+) = in geringen Konzentrationen gebraucht, - = nicht gebraucht, ? = nicht untersucht.

Tabelle 2: Veränderung des Nitratgehaltes in den verschiedenen Wasserschichten als t (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) über zwei Jahre (1958/59) im Baldeggersee [6].

Schicht	März	Juni	Oktober	Januar	Juni	November
0- 5 m	43 $\xrightarrow{A}$	5 $\xrightarrow{A}$	0 $\xrightarrow{Z}$	64 $\xrightarrow{A}$	3 $\xrightarrow{Z}$	8
5-20 m	102 $\xrightarrow{N}$	186 $\xrightarrow{D}$	118 $\xrightarrow{ZN}$	162 $\xrightarrow{D}$	138 $\xrightarrow{D}$	36
20-65 m	180 $\xrightarrow{N}$	298 $\xrightarrow{D}$	201 $\rightarrow$	197 $\xrightarrow{N}$	239 $\xrightarrow{D}$	58

Veränderungen: Verminderung durch Assimilation (A) und Denitrifikation (D)  
 Vermehrung durch Nitrifikation (N) und Zirkulation (Z)

teilweise abgebaut. Die tieferen Zonen, besonders die Bodenzone, wo dieses Material sich anhäuft, verarmt schon im Frühsommer rasch an Sauerstoff und wird anaerob. Chemotrophe Organismen zeigen daher im Tiefenprofil eines stehenden Gewässers häufig drei Maxima in der Populationsdichte (Abb. 2): in der aeroben Schicht des Epilimnions parallel zu den Produzenten (mit normalem, aerobem Stoffwechsel), an der Sauerstoffgrenzschicht, wo das Milieu zur Anaerobie wechselt (Zone der Nitrat- und Sulfat-Atmer), und in der anaeroben Bodenzone (reine Anaerobier) [6–9].

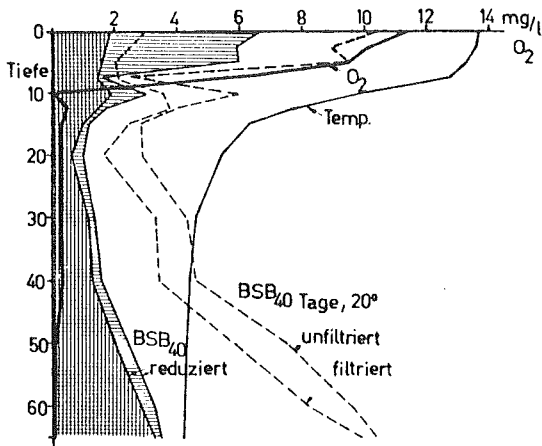


Abb. 2 Tiefenprofil von Sauerstoff, Temperatur und oxidierbarem Material (total oxidierbares Material = unfiltriert, lösliches oxidierbares Material und Bakterienbiomasse = filtriert) als biochemischen Sauerstoffbedarf BSB (40 Tage) ausgedrückt und angegeben für 20° C und für die in der entsprechenden Tiefe herrschende Temperatur. Baldeggersee, 17. Oktober 1957 [6].

Stoffumsetzungen im Zusammenhang mit der Energetik der Mikroorganismen in den hier skizzierten Lebensräumen sind am Beispiel des Stickstoffkreislaufes in Abb. 3 und Tab. 2 skizziert. Organismen, typisch für diese Bio-

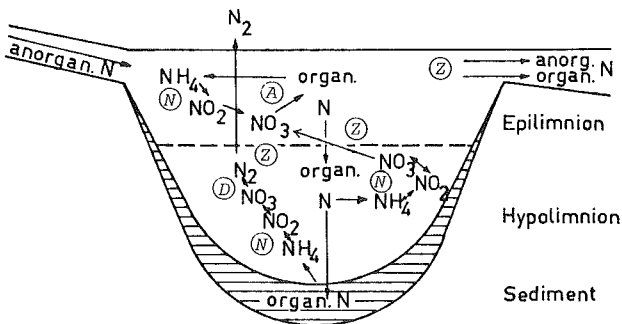


Abb. 3 Stickstoffkreislauf im See.

tope und Ökosysteme, werden in den folgenden Ausführungen vorgestellt und die Bedingungen, unter welchen diese die für ihre Aktivitäten notwendige Energie bereitstellen, beschrieben und charakterisiert. Wenn an dieser Arbeitstagung auch nur wenige Beispiele ausführlich geschildert werden, so dürfte doch jedem Zuhörer die Vielfalt auf der einen Seite, die Einheitlichkeit des bioenergetischen Konzeptes auf der andern Seite klarwerden [10].

Dank: Ich danke allen, die in irgendeiner Art zum Zustandekommen dieser Arbeitstagung beigetragen haben, besonders aber dem Organisationsteam, Dr. K. HANSELMANN, FrI. H. MÜLLER und DR. M. KÜENZI, der Universität und den verschiedenen Firmen, die es uns ermöglicht haben, die Referenten einzuladen, wie auch der Redaktion der Zürcher Naturforschenden Gesellschaft, dank welcher das vorliegende thematisch geschlossene Heft erscheinen konnte.

### Literatur:

- [1] P. MITCHELL: Compartmentation and Communication in living systems. Ligand conduction: a general catalytic principle in chemical, osmotic and chemiosmotic reaction systems. Eur. J. Biochem. 95, 120, 1979.
- [2] N. K. BOARDMAN: The energy budget in solar energy conversion in ecological and agricultural systems. In Living Systems as Energy Converters (R. Buvet et al., eds.), Amsterdam 1977, p. 307–318.
- [3] G. H. TRÜPER und N. PFENNIG: Taxonomy of the Rhodospirillales. In The Photosynthetic Bacteria (R. K. Clayton und W. R. Sistrom, eds.). New York 1978, p. 19–27.
- [4] R. BACHOFEN und M. SNOZZI: General description of representative photosynthetic organisms. 1. Photosynthetic bacteria: *Rhodospirillum rubrum*. In Handbook of Biosolar Research, CRC Press, im Druck.
- [5] W. P. HEMPFLING (ed.), Microbial Respiration, Stroudsburg, Penn. 1979.
- [6] R. BACHOFEN: Stoffhaushalt und Sedimentation im Baldegger- und Hallwilersee. Dissertation Universität Zürich 1960.
- [7] J. OVERBECK: Prinzipielles zum Vorkommen der Bakterien im See. Mitt. Internat. Verein. Limnol. 14, 134–144, 1968.
- [8] J. OVERBECK: Bakterien im Gewässer – ein Beispiel für die gegenwärtige Entwicklung in der Limnologie. Mitt. Max Planck Gesellsch. 3, 165–182, 1968.
- [9] G. RHEINHEIMER: Mikrobiologie der Gewässer. Jena 1971.
- [10] P. B. GARLAND: Energy transduction and transmission in microbial systems. In Microbial Energetics (B. A. Haddock und W. A. Hamilton, eds.). Cambridge 1977, p. 1–21.

#### Adresse des Autors:

Prof. Dr. REINHARD BACHOFEN, Institut für Pflanzenbiologie, Mikrobiologie, Zollikerstrasse 107, 8008 Zürich

