

Die Anpassung von Mikroorganismen im Zusammenhang mit dem Auftreten von Sauerstoff auf der Erde

Fallstudie „Diversität der Mikroorganismen“, Bio-126, 2006

Verfasserin: Franziska Babst, Universität Zürich

Betreuer: Dr. Kurt Hanselmann

1. Zusammenfassung

In dieser Fallstudie wird die Fragestellung bearbeitet: „Mit welchen Problemen waren Mikroorganismen konfrontiert, als sich die Atmosphäre auf der Erde plötzlich von anoxisch zu oxisch wandelte? Und wie haben sie diese Schwierigkeiten bewältigt?“

Die Fragestellung wurde durch vertiefte Recherche verschiedenster mikrobiologischer Literatur beantwortet. Aufgrund des grossen Interesses an diesen Fragen, wurde schliesslich dieses Thema ausgewählt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Organismen einige Enzyme entwickelten wie beispielsweise Superoxiddismutasen, Catalasen und Peroxidasen, die die giftigen Radikale, welche Sauerstoff bilden kann, in mehreren Schritten zu Wasser umbauen.

Zudem gibt es Bakterien, welche durch verstärkte Zellwände oder Kapseln eine Diffusionsbarriere für Sauerstoff bilden.

2. Einleitung

Bei der Entstehung der Erde vor 4.6 Milliarden Jahren war das Klima anders als heute. Die Erdoberfläche war extrem heiss. Erst vor 4 Milliarden Jahren unterschritt die Temperatur die 100°C -Grenze.

Da es keinen Sauerstoff gab, dominierten andere Gase wie Methan, Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und Ammoniak die Atmosphäre und beeinflussten das Klima. Aufgrund der heissen Atmosphäre konnte zu dieser Zeit kein flüssiges Wasser existieren. Ausserdem machten ständige Meteoriteneinschläge das Leben auf der Erde praktisch unmöglich.

Man nimmt an, dass die ersten selbstreplizierenden Organismen auftraten, als die Erde noch ziemlich heiss war, jedoch schon um einiges kühler als am Anfang. Die ersten Mikroorganismen mussten aufgrund des fehlenden Sauerstoffes strikt anaerob sein.

Ein grosser Meilenstein in der Erdgeschichte war die Evolution der oxigenen Photosynthese von Cyanobakterien oder deren Vorfahren. Bei der Photosynthese tritt Sauerstoff als Nebenprodukt auf. Die Cyanobakterien tauchten erstmals vor 2.8 Milliarden Jahren auf. Anfänglich blieben die Bestände an Sauerstoff in der Atmosphäre jedoch sehr klein, da verschiedene reduzierende Substanzen sofort den

Sauerstoff verbrauchten. Nach einer gewissen Zeit waren grosse Mengen der reduzierenden Substanzen wie Eisen (Fe^{2+}) aufgebraucht und der Sauerstoff konnte sich in der Atmosphäre anreichern.

Die oxigene Photosynthese hatte einen enormen Einfluss auf das Klima, da die Umgebung von anoxisch zu oxisch wechselte. Nun war Sauerstoff in molekularer Form (O_2) als Elektronenakzeptor vorhanden und aerobe Organismen konnten sich entwickeln.

Durch die UV-Bestrahlung des Sauerstoffs bildete sich Ozon (O_3). Dieses wurde in der oberen Schicht der Atmosphäre angereichert und bildete einen wirksamen Ozonschild gegen die UV-Strahlung. Ohne den Ozonschild wären viele der heutigen Lebensformen auf dem Land kaum möglich, da UV-Strahlung in hohen Dosen zu Veränderungen in der DNA führen.

Die anaeroben Organismen hatten beim Übergang zu aeroben Organismen einige Probleme zu bewältigen, da einige Sauerstoffderivate für die Bakterien toxisch sind. Sie konnten diese Schwierigkeiten mit wichtigen Anpassungen und Entwicklungen meistern.

3. Vorgehen

Die gestellte Aufgabe wurde durch Literaturrecherche verschiedener mikrobiologischer Bücher, sowie einiger wissenschaftlich veröffentlichten Papers gelöst. Zudem wurde das Internet für die Materialsuche herbeigezogen. Alle Materialien konnten in der Studienbibliothek Irchel gefunden werden, welche die Lizenzen für wissenschaftliche Papers im Bereich Biologie hat. Nach einer groben Zusammenstellung der Ergebnisse und Erkenntnisse aus einer Fülle von Informationen wurden die wichtigsten Fakten herausgefiltert und in der Arbeit verwertet.

4. Ergebnisse

4.1 Sauerstoffklassen bei Mikroorganismen

Es gibt verschiedene Arten, wie Mikroorganismen mit Sauerstoff in Beziehung stehen. Sie werden aufgrund der Varianz im Gebrauch und der Toleranz von Sauerstoff eingeteilt.

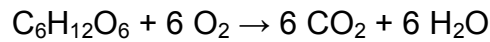
Bei den anaeroben Organismen gibt es zwei Unterarten, die aerotoleranten und die strikt oder obligat anaeroben.

Die aerotoleranten Arten können in einer Sauerstoffumgebung wachsen, obwohl sie Sauerstoff nicht umsetzen können.

Obligat anaerobe Organismen müssen vollkommen sauerstofffrei leben. Sie besiedeln beispielsweise Schlamm, Sumpf, Verdauungstrakte von Tieren und den tiefen Untergrund der Erde.

Diese Arten werden von Sauerstoff geschädigt oder gar abgetötet. Obligate Anaerobie gibt es nur in drei Gruppen von Mikroorganismen. Bei vielen Prokaryoten und bei einigen Pilzen und Protozoen kommt er vor.

Obligat aerobe Organismen wachsen bei voller Sauerstoffkonzentration in der Luft (21%) oder sogar noch ohne Probleme bei erhöhter Sauerstoffkonzentration. In Dissimilationsreaktionen verbrauchen sie Sauerstoff in ihrem Metabolismus, bei der Zellatmung gemäss dieser Reaktionsgleichung:



Bei den Aerobiern gibt es zwei spezielle Arten, die mikroaerophilen Organismen und die fakultativ aeroben Organismen.

Die mikroaerophilen können nur bei vermindertem Sauerstoffgehalt leben, weil sie eingeschränkte Atemkapazität haben oder sauerstoffempfindliche Moleküle besitzen, wie zum Beispiel sauerstoffempfindliche Enzyme.

Viele der aeroben Organismen sind fakultativ aerob, das heisst, sie können unter oxidischen oder anoxischen Bedingungen wachsen.

Da die aeroben Bakterien dringend Sauerstoff benötigen, dieser aber auch toxisch wirken kann, führt dies zu den unterschiedlichen Beziehungen der Organismen zu Sauerstoff, wie die untenstehende Tabelle 4.1 aufzeigt.

Gruppe	Beziehung zu O ₂	Metabolismustyp
Aerobe		
obligat/strikt	erforderlich	aerobe Atmung
fakultativ	nicht erforderlich, Wachstum jedoch besser mit O ₂	aerobe Atmung, anaerobe Atmung, Fermentation
mikroaerophil	erforderlich, aber in tieferen Konzentrationen als sie in der Atmosphäre vorherrschen	aerobe Atmung
Anaerobe		
aerotolerant	nicht erforderlich und Wachstum schlechter wenn O ₂ vorhanden	Fermentation und anaerobe Atmung
obligat/strikt	schädlich oder letal	Fermentation und anaerobe Atmung

Tabelle 4.1: Beziehungen der Mikroorganismen zu Sauerstoff [1]

Neben dem Gebrauch von Sauerstoff als Oxidationsmittel in aeroben Atmungsprozessen, ist Sauerstoff ein Reaktand in Prozessen, die durch Monooxygenasen und Dioxygenasen katalysiert werden.

4.2 Toxische Formen von Sauerstoff

Das Problem mit dem Sauerstoff ist, dass er toxische Formen annehmen kann. Nicht der elementare Sauerstoff ist das Gift für die Organismen, sondern bestimmte Sauerstoffderivate. Sauerstoff ist ein sehr starkes Oxidationsmittel. Man sagt, in dieser Situation, die Organismen sind oxidativem Stress ausgesetzt.

Der Grundzustand von Sauerstoff ist Triplet-Sauerstoff (³O₂), es existieren jedoch auch anderen Elektronenkonfigurationen. Eine der bedeutendsten toxischen Formen von Sauerstoff ist Singlet-Sauerstoff (¹O₂). Er ist eine höhere Energieform von Sau-

erstoff, wobei die Elektronen in der Valenzschale hochreaktiv werden und das Molekül unerwünschte spontane Oxidationen durchführen kann. Dieser Singlet-Sauerstoff kann photochemisch oder biochemisch entstehen.

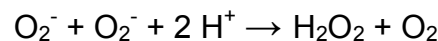
Organismen, die oft mit Singlet-Sauerstoff zusammentreffen, haben meist Carotinoide. Diese Pigmente können den Singlet-Sauerstoff zu nichttoxischen Formen umbauen.

Nebst dem Singlet-Sauerstoff gibt es andere hochtoxische Formen von Sauerstoff: das Superoxidanion (O_2^-), das Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und das Hydroxylradikal (OH^\cdot). Alle diese Formen werden bei der Reduktion von Sauerstoff zu Wasser, während der Atmung, als Nebenprodukt produziert.

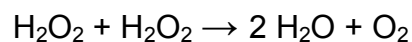
4.3 Enzyme, welche toxischen Sauerstoff zerstören

Die aeroben Organismen haben Enzyme evoluiert, die den toxischen Sauerstoff zerstören und den Organismus schützen.

Das Superoxidanion wird durch das Superoxiddismutase-Enzym zerstört. Es produziert Wasserstoffperoxid als Endprodukt, welches dann von anderen Enzymen weiter umgesetzt werden muss, da es auch toxisch ist. Die Superoxiddismutase arbeitet also im Tandem mit der Catalase und der Peroxidase. Der Umsatz geschieht nach folgender Reaktionsgleichung:

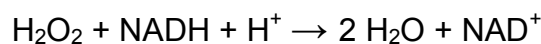


Die Catalase ist das am häufigsten vorkommende Enzym bei der Zerstörung von toxischem Sauerstoff. Dieses Enzym setzt Wasserstoffperoxid zu Wasser und elementarem Sauerstoff um nach nachstehender Reaktionsgleichung:

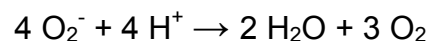


Das Enzym Peroxidase ist ebenfalls für das Zerlegen von Wasserstoffperoxid zuständig. Der Unterschied zur Catalase besteht darin, dass die Peroxidase ein Reduktionsmittel verwendet, meist NADH.

Die Reaktion verläuft nach folgendem Muster:



Die gekoppelte Reaktion von Superoxiddismutase und Catalase sieht so aus:



Die Enzyme wirken in einer Kettenreaktion. So werden durch Ein-Elektronen-Reduktionsschritte alle toxischen Formen von Sauerstoff zerstört. Die untenstehende Aufstellung Abb. 4.1 zeigt die Schritte der Kettenreaktion auf.

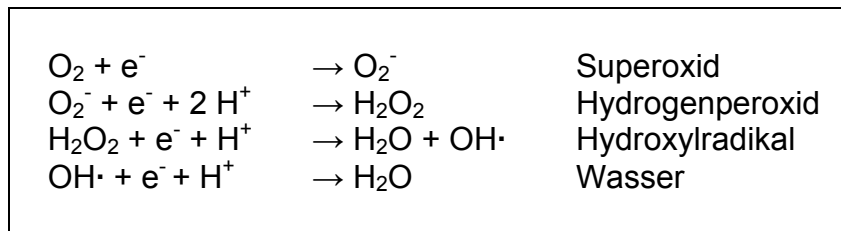


Abb. 4.1: Reduktive Kettenreaktion bei der Zerstörung von toxischem Sauerstoff [1]

4.4 Welches Enzym kommt in welchen Organismen vor?

Aerobe und fakultativ aerobe Organismen haben meistens beide Enzyme für Wasserstoffperoxidzerstörung, die Superoxiddismutase und die Catalase. Es gibt jedoch einige strikt aerobe, bei denen die Catalase fehlt. Das Enzym Superoxiddismutase ist aber unerlässlich für aerobe Zellen.

Einige aerotolerante Anaerobier besitzen keine Superoxiddismutase. Sie benutzen als Ersatz einen Mangankomplex, welcher die Umwandlung von Superoxidanionen zu Wasserstoffperoxid und molekularem Sauerstoff durchführen kann.

Diese Reaktion könnte eine primitive Form der Superoxiddismutase darstellen. In frühen Organismen wurde die Zerstörung von Superoxidanionen wahrscheinlich so durchgeführt. Es gibt bei den Superoxiddismutasen metallische Cofaktoren, die an der aktiven Seite des Enzyms wirken. Diese bestehen aus Mangan, Eisen, Kupfer oder Zink. Diese Tatsache unterstützt die These, dass die Reaktion mit Komplexen der Vorgänger der Superoxiddismutase-Reaktion ist.

In manchen obligat anaeroben Organismen fehlt die Superoxiddismutase ebenfalls. Aber auch hier gibt es einen Ersatz, das Enzym Superoxidreduktase.

Die Superoxidreduktase reduziert O_2^- ohne Sauerstoffproduktion. Die Reaktion lautet:



4.5 Andere Anpassungen an die oxische Umgebung

Viele Bakterien schützen sich vor eintretendem Sauerstoff durch verbesserte Zellwände und Kapseln, welche eine Diffusionsbarriere darstellen.

5. Diskussion

Die Arbeit macht klar ersichtlich, dass die Mikroorganismen komplizierte Systeme entwickelt haben, um mit dem neu auftretenden Sauerstoff auszukommen. Nebst den wichtigsten evolutiven Neuerungen, den Enzymen, gibt es noch andere Mechanismen, die den Organismen helfen, zu überleben.

Bei der Erstellung der Arbeit sind wenige Probleme aufgetaucht. Vor allem die Fülle der Informationen war schwierig zu bewältigen. Auch war es nicht immer einfach die englischen Papers zu lesen, da sie doch sehr kompliziert verfasst sind und der Wissenstand im Studium noch nicht auf gleichem Stand ist. Alles in allem ist die Bearbeitung des Themas aber gut verlaufen.

6. Quellen

- [1] M.T. Madigan, J.M. Martinko; **“Brock Biology of the Mikroorganisms”**; eleventh edition, Pearson Prentice Hall New Jersey (2006)
- [2] J.W. Lengeler, G. Drews, H.G. Schlegel; **“Biology of the Prokaryotes”**; Thieme New York (1999)
- [3] A. Perelman, A. Uzan, D. Hacoen, R. Schwarz; **“Oxidative Stress in Synechococcus sp. Strain PCC 7942: Various Mechanisms for H₂O₂ Detoxification with Different Physiological Roles”**; Journal of Bacteriology; Vol.185 Nr. 12; p 3654 - 3660; American Society for Microbiology (2003)
- [4] J. Wuerges, J. Lee, Y. Yim, H. Yim, S. Kang, K.D. Carugo; **“Crystal structure of nickel-containing superoxid dismutase reveals another type of active site”**; PNAS; Vol.101 Nr.23; p 8569 - 8574 (2004)
- [5] G.W. Thorpe, C.S. Fong, N. Alic, V.J. Higgins, I.W. Dawes; **“Cells have distinct mechanisms to maintain protection against different reactive oxygen species: Oxidative-stress-response genes”**; PNAS, Vol. 101 Nr.17; p 6564 - 6569 (2004)
- [6] <http://www.wikipedia.org>