

Leuchtbakterien

Von Univ.-Prof. Dr. Elsa K u s e l, Wien

Vortrag, gehalten am 30. Jänner 1974

Leuchterscheinungen an gewissen Pflanzen und Tieren wurden sicher schon im Altertum beobachtet und gaben Veranlassung zu Sage und Aberglaube. Leuchtkäfer und Glühwürmchen kennt heute jeder Schüler und viele haben bei ihrem Mittelmeerurlaub in einer mondlosen Nacht das geheimnisvolle „Meeresleuchten“ gesehen.

Vom Leuchten des Fleisches toter Tiere und von leuchtendem Holz berichtet schon Aristoteles und Plinius kannte einen leuchtenden Pilz, der auf alten Olivenbäumen wächst (vermutlich *Pleurotus olearius*).

Nicht alle Leuchterscheinungen sind aber echte Aussendung von Licht, manche beruhen auf einer Reflexion des einfallenden Lichtstrahles an einem geeigneten Reflektor, der sich dann wie eine Lichtquelle von der dunklen Umgebung abhebt: die „glühenden“ Augen der Katzen und vieler Wildtiere funktionieren nicht anders als die „Katzen-

augen“ an den Begrenzungspfählen einer Straße. Als zwei botanische Beispiele kann man das Leuchtmoss *Schistostega osmundacea* und die Goldalge *Chromophyton (Chromulina) rosanoffii* nennen.

Wir wollen aber nun in einer systematischen Übersicht nur Organismen betrachten, die in völliger Dunkelheit selbst Licht aussenden, also die Fähigkeit zur „Biolumineszenz“ besitzen.

An erster Stelle seien die Bakterien genannt, die für das Leuchten von Fleisch, toten Fischen, aber auch von vielen lebenden Tieren verantwortlich sind. Seit HELLER 1853/54 (cit. nach MOLISCH 1912) erstmals eine *Sarcina noctiluca* beschrieben hat, wurden eine Reihe von Arten aufgestellt, aber in der letzten Auflage (1974) von BERGEY'S Manual of Determinative Bacteriology sind nur vier Arten in drei Gattungen als gesichert angeführt:

Photobacterium phosphoreum (Cohn) Ford 1927 (= *Bacterium phosphoreum* bei MOLISCH 1912)

Photobacterium mandapamensis Hendrie, Hodgkiss and Shewan 1970

Lucibacterium harveyi (Johnson and Shunk) Hendrie, Hodgkiss and Shewan 1970

Vibrio fischeri (Beijerinck) Lehmann and Neumann 1896.

Die meisten Leuchtbakterien leben saprophytisch, einige symbiontisch in eigenen Leuchtorganen von Fischen und Tintenfischen.

Unter den Pilzen ist das Leuchten bei 17 höheren Pilzarten, vor allem aus den Tropen, aber auch aus Japan, Neuseeland, Australien und Amerika nachgewiesen. In Mitteleuropa altbekannt ist der Hallimasch (*Armillariella mellea*), dessen Hyphenstränge, die „*Rhizomorpha*“ genannt werden, faulendes Holz und feuchte Bergwerkspöhlungen mit einem leuchtenden Gespinnst überziehen. Auch altes, moderndes Laub, wie es in vielen Wäldern (mit Buchen, Eichen, Hainbuchen, Eschen, Tannen und Föhren) in dicken Schichten lagert, leuchtet in mattgrünem Licht (z. B. im Wienerwald am Schöpfel, Anninger, im Prießnitztal usw.). Elf Arten der Gattung *Mycena* sind für dieses Leuchten verantwortlich. MOLISCH (1912) konnte das Mycel solcher Arten jahrelang leuchtend in Reinkultur auf Agar halten.

Unter den Protozoen leuchten nur marine Radiolarien und unter den Algen mehrere marine Dinoflagellaten: Ceratien, Peridiniien, Gymnodinien, aber besonders *Noctiluca miliaris*, die für das Meeresleuchten im Atlantik, Mittelmeer, Roten Meer, Indischen Ozean und Pazifik hauptverantwortlich ist. Ein anderer Dinoflagellat der Gattung *Gonyaulax* bildet bei Massenvorkommen eine giftige „Wasserblüte“, die „rote Tide“ oder „Red Sea“, die 1950 im Golf von Mexiko das Wasser rot färbte und zu Fischsterben führte, nachts Meeresleuchten verursachte.

Sonderbarerweise ist kein sicher verbürgter Fall bekannt, daß auch im Süßwasser solche Leuchtphänomene auftreten. Unter den Tieren sind es neben den Landformen ebenfalls nur marine Organismen, denen diese Fähigkeit zukommt.

Unter den H o h l t i e r e n leuchten viele Quallen (*Scyphozoa*), z. B. *Pelagia*, *Aequora*. Bei Siphonophoren leuchten Polypen und Medusen, bei den Anthozoen viele Leder- und Hornkorallen, aber keine Seeanemonen. Die Rippenquallen (*Ctenophora*) leuchten möglicherweise alle.

Leuchtende W ü r m e r finden sich unter den marinen Polychaeten und einigen terrestrischen Oligochaeten.

Unter den Mollusken sind leuchtende Schnecken, Muscheln und Tintenfische bekannt. Die Bohrmuschel *Pholas* war es, an der Raphael DUBOIS 1888 zuerst die Stoffe isoliert hat, die das Leuchten verursachen und die er „Luciferin“ und „Luciferase“ genannt hat. Bei Reizung stößt die Muschel aus dem Siphon eine Flüssigkeit aus, die eine Zeitlang als leuchtende Wolke sichtbar ist.

Die Tintenfische als höchstentwickelte Weichtiere besitzen kompliziert gebaute Leuchtorgane mit Linsen, Reflektorschichten und lidähnlichen Hautfalten, die das kontinuierlich strahlende Licht willkürlich „abschalten“ können. Besonders Tiefseeformen besitzen viele Leuchtorgane, ja manche sto-

ßen an Stelle der schwarzen Tinte eine Leucht-
wolke aus, um unter deren Blendwirkung einem
Feind entfliehen zu können. Aus den Leuchtorga-
nen einiger Arten ist es gelungen, Leuchtbakte-
rien rein zu kultivieren; vermutlich besitzen alle
Tintenfische solche Symbionten.

Unter den Krebstieren (*C r u s t a c e a*) leuchten
viele marine Copepoden, Ostracoden, *Mysidae*, *Eu-
phausidae* und *Decapoda* durch eigenes Licht, wäh-
rend Amphipoden und Isopoden manchmal durch
parasitische Leuchtbakterien für einige Tage von
einer „Leuchtseuche“ befallen werden können und
dann sterben. Der leuchtende Muschelkrebs *Cypridina
hilgendorffii* aus japanischen Küstengewässern
gibt selbst im toten, getrockneten Zustand bei Wie-
derbefeuchtung ein intensives Licht, so daß diese
Tiere im zweiten Weltkrieg von japanischen Solda-
ten an der Front nachts beim Lesen der Karten be-
nützt wurden. Die nächtlicherweise aktiven Tiere
wurden in Massen in Fallen in 3—10 m Tiefe mit-
tels Fischfleisch als Köder gefangen: Oft ein Liter
Tiere pro Stunde pro Topf! Aus *Cypridina* hat unter
anderen auch der amerikanische Forscher Newton
HARVEY (1916, 1919) Luciferin und Luciferase ge-
wonnen.

Auch bei den Tausendfüßern, Scolo-
pendern, Spinnen und Insekten gibt es
selbstleuchtende Arten und solche, die durch Bak-
terien an der Leuchtseuche erkranken können.

Unter den Leuchtkäfern sind bei uns zwei Arten heimisch: *Phausis splendidula* und *Lampyris noctiluca*. Die Weibchen kriechen flügellos im Gras und werden „Glühwürmchen“ genannt, während die Männchen fliegen können und (nur bei *Lampyris*) leuchten: Leuchtkäfer, Johanniskäfer. Der nordamerikanische Leuchtkäfer *Photinus pyralis* wurde von Mc ELROY und Mitarbeitern biochemisch genau untersucht.

In den Tropen leuchten noch viele Arten unter den Käfern und Zikaden. Eine Mücke (*Arachnocampa luminosa: Mycetophilidae*) ist in Neuseeland berühmt: ihre leuchtenden Larven hängen in wasserdurchflossenen Höhlen an klebrigen Spinnfäden von der Decke und fressen die durch das Licht angelockten und an den Fäden gefangenen kleinen Insekten.

Unter den Wirbeltieren gibt es nur leuchtende Fische und diese haben alle symbiotische Leuchtbakterien in eigenen drüsigen Organen. Unter den Tiefseefischen sind die bizaren Anglerfische bemerkenswert, von denen einige an Körperanhängigen Leuchtorgane als „Leuchtköder“ tragen.

Andere Wirbeltiere leuchten im Leben nicht. Ein künstlich unter der Rückenhaut mit Leuchtbakterien infizierter Frosch leuchtete wohl drei bis vier Tage lang, besonders an der Zungenspitze, dann erlosch aber das Licht, ohne den Frosch geschädigt

zu haben. In Warmblütlern könnten die Leucht-bakterien wegen ihres niederen Temperaturoptimums (meist unterhalb 20°C) nicht leben.

Fragt man nach dem Sinn und Nutzen des erzeugten Lichtes, so liegt der bei Tieren sicher im Dienst der Fortpflanzung (z. B. bei Leuchtkäfern), der Feindabwehr (Leuchtwolke der Tintenfische und Muscheln) oder der Nahrungssuche (Leuchtköder der Anglerfische, leuchtende Mückenlarve (vgl. auch SCHALLER 1963). In vielen Fällen läßt sich aber kein Vorteil erkennen, besonders für die Bakterien, Pilze und Flagellaten.

Damit sei diese Übersicht (die zum größten Teil dem Buch „Bioluminescence“ von N. HARVEY 1952 entnommen ist) abgeschlossen und die Frage nach dem Wesen des Leuchtvorganges gestellt. Das Auffallendste ist wohl, daß das Licht ohne gleichzeitige Wärmeabstrahlung entsteht! Die Biolumineszenz stellt einen Sonderfall der Chemolumineszenz, der Abstrahlung „kalten Lichts“ bei chemischen Reaktionen dar. Die bei gewissen chemischen Reaktionen frei werdende Energie geht nicht größtenteils in Wärme über, sondern dient als elektronische Anregungsenergie dazu, Valenzelektronen in einen angeregten Zustand überzuführen. Bei der Rückkehr dieser Valenzelektronen in den Grundzustand kann diese Anregungsenergie in Form von Licht ausgestrahlt werden. Die Aufklärung von Chemolumineszenz-Reaktionsmechanismen ist oft sehr

schwierig und in vielen Fällen noch nicht geglückt, da das angeregte Reaktionsprodukt seine Anregungsenergie auch auf ein Zwischen-, Neben- oder Ausgangsprodukt oder auf eine zufällig anwesende Verunreinigung übertragen kann und diese Substanz dann das Licht abstrahlt.

Daß Chemolumineszenz im sichtbaren Bereich auftreten kann, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein (vgl. den zusammenfassenden Artikel von GUNDERMANN 1972):

1. Bei der Reaktion muß eine Energie von 40—70 kcal pro Formelumsatz freigesetzt werden, die nach der Formel $E = hv$ der Anregungsenergie für sichtbares Licht entspricht. Dabei müssen diese 40—70 kcal in einem, möglichst raschen Reaktionsschritt abgegeben werden. Würde diese Energie in mehreren Teilschritten frei, ginge sie lichtlos als Wärme verloren, da die Teilbeträge sich nicht speichern und addieren lassen.

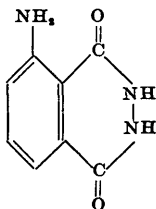
2. müssen die betreffenden Moleküle fluoreszenz- oder phosphoreszenzfähig sein, d. h. Valenzelektronen besitzen, die anregungsfähig sind.

3. muß das Reaktionsmilieu so beschaffen sein, daß die energiereichen Reaktionen glatt ablaufen können, d. h., daß die Reaktionspartner nicht durch andere Nebenreaktionen verschwinden können.

Man sieht, daß die Chemolumineszenz ein so komplexes Phänomen ist, daß kaum zu erwarten

ist, sie recht häufig zu finden. Andererseits zeigen die heute benützten hochempfindlichen Photomultiplier und Mikrospektralphotometer, daß ganz schwache Chemolumineszenz doch sehr weit verbreitet ist.

Eine recht brillante Chemolumineszenzerscheinung ist die seit ca 40 Jahren bekannte L u m i n o l r e a k t i o n. Luminol (3-Aminophthalhydrazid) strahlt bei der Oxidation in alkalischer Lösung ein hellviolette Licht ab *).



Strukturformel des Luminol

Das Bakterien- und Pilzlicht ist dagegen gelbgrün bis blaugrün, wie auch das Licht der meisten übrigen Leuchtorganismen. Das Spektrum ist kontinuierlich, das Maximum liegt bei 470—490 nm, reicht bis ca 690 nm. Das Pilzlicht des Hallimasch

*) Versuchsausführung: 1. 1 mg Luminol in 0,1 ml 5% NaOH lösen, mit Wasser auf 10 ml auffüllen.
2. Lösung: 2 mg $K_3Fe(CN)_6$ und 0,1 ml H_2O_2 (3%) auf 10 ml auffüllen.

Beim Mischen der beiden Lösungen zeigt sich eine hellviolette Chemolumineszenz.

hat sein Maximum etwas oberhalb 520 nm. Das Maximum des amerikanischen Leuchtkäfers *Photinus pyralis* liegt bei 562 nm, säuert man die Lösung

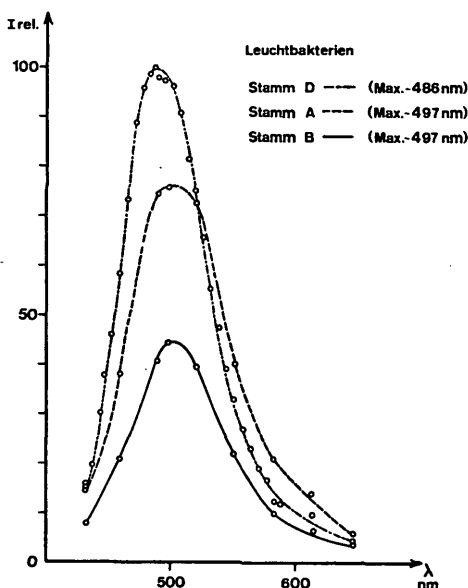


Abb. 1: Die spektrale Verteilung des von drei verschiedenen Leuchtbakterienstämmen emmittierten Lichtes. Freundlicherweise von Dr. H. Bolhár-Nordenkampf am Mikrospektralphotometer *) im Pflanzenphysiologischen Institut aufgenommen.

*) MPV I der Firma Leitz, vom Fond zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

an, verschiebt es sich mehr ins Rötliche auf 614 nm. Vielleicht beruht das verschiedenfarbige Licht mancher Insekten auf solchen Vorgängen.

Trotz der für das Auge so eindrucksvollen Brillanz der Luminolreaktion beträgt die Quantenausbeute nur 1—2%, d. h. nur ein bis zwei von 100 Luminolmolekülen liefern bei der Oxidation ein Lichtquant. Die Biolumineszenzreaktionen, die unter enzymatischer Katalyse ablaufen, erbringen viel höhere Quantenausbeuten: SELIGER und Mc ELROY (1959) fanden bei *Photinus pyralis* 100% Quantenausbeute (= 1 Einstein/Mol). Bei Leucht-bakterien liegen die Ausbeuten niedriger, etwa bei 30%.

Vergleichen wir den Wirkungsgrad einer herkömmlichen elektrischen Glühbirne mit dem Bakterienlicht! In einem kalorischen Kraftwerk werden 33% der Energie der verbrannten Kohle in elektrische Energie verwandelt. Der elektrische Strom erzeugt in der Glühbirne mit 90% Ausbeute Strahlung im gesamten Spektrum, aber nur 3,6% davon sind sichtbares Licht! Daher ist der Gesamtwirkungsgrad Kohle: Licht ca 1%. Für die Leucht-bakterien kann man den Kalorienwert des Nährsubstrates, bezogen auf eine bestimmte Bakterienmasse, mit der Lichtenergie vergleichen. Die Futterverwertung wird am Sauerstoffverbrauch gemessen, für Atmung und Wachstum korrigiert. Es er-

gibt sich schließlich auch für das Bakterienlicht eine Totalausbeute von ungefähr 1% (HARVEY 1925)!

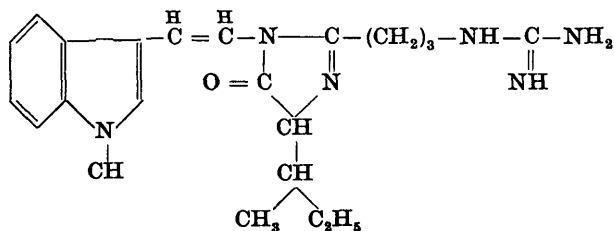
Die lichterzeugenden chemischen Reaktionen sind bei den meisten Organismen an einen bestimmten mindesten Feuchtigkeitsgrad und Sauerstoffgehalt gebunden. Bei völligem Sauerstoffmangel hört das Leuchten auf, aber schon ein Teil Sauerstoff in 3,7 Milliarden Teilen Meerwasser ermöglicht ein gerade noch sichtbares Leuchten. Daraus läßt sich schließen, daß das Leuchten auf einen Oxidationsprozeß zurückzuführen ist. Die vorerst theoretische Annahme, daß eine Verbindung „Luciferin“ bei der durch das Enzym „Luciferase“ katalysierten Oxidation Licht abstrahlt, konnte an verschiedenen Organismen tatsächlich bestätigt werden. Es zeigte sich aber, daß es eine ganze Reihe artspezifischer Luciferine und Luciferasen gibt, die sich meist gegenseitig nicht vertreten lassen, auch sind manchmal weitere Co-Faktoren nötig. Das Luciferin von *Photinus pyralis* (von WHITE, Mc CAPRA, FIELD and Mc ELROY 1961 rein kristallisiert hergestellt) ist ein Benzothiazolderivat mit dem Molekulargewicht 308. Das Enzym Luciferase ist ein aus ca 1000 Aminosäuren aufgebautes Eiweiß (Euglobulin) mit einem Molekulargewicht um 100 000 (GREEN and Mc ELROY 1956). Zur Reaktion müssen noch Ca-Jonen und ATP (Adenosintriphosphat) vorhanden sein. Die Luciferase (E) katalysiert eine Reaktion zwischen hydriertem Luciferin (LH₂) und

ATP, wobei ein Komplex E-LH₂-AMP und Pyrophosphat entstehen. Der Komplex wird mit einem O₂ oxidiert, das entstehende Oxyluciferin emittiert das Licht. Im Dunkeln geht das Oxyluciferin wieder in Luciferin über, so daß es mehrmals ausgenützt werden kann.

Zur Erzeugung eines Lichtquants ist ein ATP nötig: daher kann die Menge von ATP in einer Probe bestimmt werden. Da alle Organismen ATP enthalten, könnte man sogar mit einer „Luciferin-Raumsonde“ Spuren des Lebens im All feststellen: Beim Zusammentreffen mit ATP produziert das Luciferin Licht, das mit empfindlichen Geräten gemessen und zur Erde gefunkt werden könnte (weitere Beispiele bei ADAM, 1973).

Da jeweils pro Molekül Sauerstoff ein Molekül Luciferin oxidiert wird, können mit dieser Methode auch kleinste Mengen Sauerstoff nachgewiesen werden.

Das Luciferin des Muschelkrebses *Cypridina* ist anders geartet; HIRATA (1959) hat die Strukturformel aufgestellt:



Ein Heißwasserauszug aus diesen Tieren ergibt das dialysierbare Luciferin, ein Kaltwasserauszug die bei 60°C zerfallende Luciferase. Mischt man die beiden für sich dunklen Lösungen, so leuchtet es auf. Vom Tier werden die beiden Komponenten von Drüsen getrennt als Granula ins Wasser abgeschieden, lösen sich auf und reagieren unter Lichtabstrahlung miteinander.

Ein Lumineszenzsystem, das auch ohne Sauerstoff aufleuchtet, bildet das Leuchtprotein „Aequorin“ (Mol. Gew. 35 000) aus der Hydromeduse *Aequora*. Ca-Jonen müssen dabei vorhanden sein.

Auch von Leuchtbakterien wurden Extrakte der an der Lichtemission beteiligten Substanzen untersucht (Mc ELROY u. Mitarb. 1953, Mc ELROY u. STREHLER 1954, TERPSTRA 1960, STREHLER und CORMIER 1953). Die Natur des lichtemittierenden Moleküls ist bis jetzt noch nicht aufgeklärt. Als primärer begrenzender Faktor erwies sich NAD (Nikotinamid-Adenin-Dinucleotid) und die reduzierte Form NADH₂, für dessen Wirkung FMN (Flavinmononucleotid) nötig ist. Die Wirkung schon geringer Sauerstoffmengen bewies BEIJERINCK (1902) mit einem Büschel Algen in einer Leuchtbakteriensuspension, indem er nach völligem Erlöschen ein Streichholz entzündete und dieser kurze Lichtblitz bewirkte in den grünen Algen die Entwicklung von Sauerstoff: sofort leuchteten die Bakterien in der Umgebung der Algen auf.

Die Diskussion, ob die Lumineszenz eine Begleiterscheinung der Zellrespiration sei, ist alt. Verwendet man den Begriff Respiration für alle chemischen Vorgänge in der Zelle, die eine Sauerstoffaufnahme verlangen und verwendet als Maß für die Zellatmung die aufgenommene Sauerstoffmenge, so kann man sagen, daß die Lumineszenz der Bakterien von der Zellrespiration abhängig ist. Es zeigen sich aber große Unterschiede: Hohe Temperaturen und niedrige NaCl-Gehalte verringern oder verhindern das Leuchten, die Atmung und das Wachstum gehen weiter oder werden sogar erhöht.

Bei erniedrigtem O_2 -Gehalt kann die Atmung schon um 50% gesenkt sein, ehe das Leuchten beeinflusst wird.

Harnstoff löscht die Lumineszenz, steigert aber die O_2 -Aufnahme.

Kaliumcyanid senkt die O_2 -Aufnahme ohne vorerst das Leuchten zu beeinflussen. HARVEY (1952) schließt, daß der Leuchtprozeß von der Atmung unabhängig ist, daß aber die Bildung des Luciferins letzten Endes ja doch von Atmungsprozessen in der Zelle abhängig ist. Es zeigte sich, daß rund 20% des aufgenommenen Sauerstoffs für die Lumineszenz verwendet werden, 72—75% für die cyanempfindliche Häminatmung und 5—8% für eine Restatmung, die nicht durch Cyan inhibiert werden kann und die man auf gelbes Atmungsenzym zurückführt (Van SCHOUWENBURG

und EYMERS 1936, weitere Versuche bei RIEDER und BUKATSCH 1957).

Interessant ist die Theorie, nach der das Leuchten eine phylogenetisch-uralte Erscheinung ist: Wenn sich die frühesten Lebensformen anaerob entwickelt haben, muß Sauerstoff für sie Gift gewesen sein. Als sich Sauerstoff allmählich in der Erdatmosphäre anreicherte, mußte er möglichst rasch unschädlich gemacht werden: am einfachsten durch Bildung von Wasser. Dabei wird sehr viel Energie frei, die leicht ausreicht, organische Moleküle zum Leuchten anzuregen (vgl. SCHALLER 1963).

* * *

Die Beschäftigung mit der Physiologie der Leuchtbakterien geht im Pflanzenphysiologischen Institut der Universität Wien auf MOLISCH und seine Schüler (RICHTER, BUKATSCH) zurück. MOLISCH führt in seinem Buch „Leuchtende Pflanzen“ eine Reihe von historisch belegten Fällen aus dem 16. und 17. Jahrhundert an, wo Schaf-, Rind- und Schweinefleisch ein bis zwei Tage nach dem Schlachten grünlichweiß zu Leuchten begannen und erst nach vier bis fünf Tagen, ehe sie in Fäulnis übergingen, erloschen. MOLISCH untersuchte in Prag systematisch die Fleischwaren vieler Händler und stellte fest, daß mehr als die Hälfte der Proben zu Leuchten begannen, legte er sie in

3% NaCl-Lösung, so leuchteten sogar 87%! Am Fischmarkt in Triest sah Molisch schon 24 Stunden nach dem Fang viele Seefische leuchten. Es gelang ihm, Rohkulturen und dann Reinkulturen dieser Bakterien zu gewinnen *).

Mit solchen Reinkulturen führten dann nach MOLISCH besonders RICHTER (1928), MUDRAK (1933), BUKATSCH (1936), KREMMETER und BUKATSCH (1960/62), KRANZ (1970), etc. verschiedene physiologische Experimente durch. Nahm man ursprünglich an, Pepton wäre als Stickstoffquelle unbedingt nötig, so zeigte sich, daß die untersuchten Leuchtbakterien außer verschiedenen Aminosäuren auch Harnstoff oder Ammoniums Salze (Chlorid, Sulfat, Karbonat) verwerten können. NaCl ist für alle Arten nötig, wenn auch das Optimum nicht überall bei 3% liegt. Hohe Konzentrationen schädigen durch ihre osmotische Wirkung. Schwermetallsalze wirken giftig, aber Spuren von

*) Eine einfache Methode, Leuchtbakterien zu erhalten, ist folgende: einen frischen, grünen Hering (oder eine Makrele, ein Stück Kabeljau mit Haut oder dgl.) übergießt man mit 3% NaCl-Lösung und läßt ihn bei 5—8° C (im Kühlschrank) stehen. Schon nach ein bis zwei Tagen leuchten Haut, Augen, Kiemen, mitunter auch die Flüssigkeit. Nun möglichst bald in eine Nährlösung oder auf Agar abimpfen.

Rezept: 1000 ml Wasser, 30 g NaCl, 20 g Zucker, 10 g Pepton, 0,25 g MgSO₄, 0,25 g K₂HPO₄, mit NaOH auf pH 7—7,5 einstellen; für den festen Nährboden 2% Agar zufügen.

Cu und Zn können stimulierend wirken. Als Kohlenstoffquelle kann neben verschiedenen Zuckern auch Glycerin verwendet werden.

KRANZ untersuchte auch die Antibiotikaresistenz und fand, daß *Photobacterium* gegen Penicillin resistent, *Vibrio* dagegen empfindlich ist. Chloramphenicol schädigt alle stark.

Auch zu Permeabilitätsstudien lassen sich Leuchtbakterien verwenden, wie COLLANDER 1956 zeigte. Im Mikroskop sind die Einzelzellen schwer zu beobachten, wenn aber der eindringende Stoff das Leuchtvermögen beeinflusst, so kann man gleichsam statistisch das Verhalten vieler Zellen verfolgen.

Neuerdings will man Leuchtbakterien auch als „Drogenschnüffler“ einsetzen, wie aus einer Meldung in „New Scientist“ (November 1972) hervorgeht: In Gegenwart bestimmter Substanzen leuchten die Bakterien auf, das Licht wird von einer Photozelle registriert. Die gefriergetrockneten Bakterien müssen vor Gebrauch einen Tag lang aktiviert werden und haben dann eine Lebensdauer von acht Stunden. Mit einer Pumpe wird Luft (mittels eines Schlauches aus einem Koffer, einer Tasche etc.) über die Bakterien gesaugt. Es gibt schon Bakterienstämme, die auf verschiedene Sprengstoffe, Luftverunreinigungen, toxische Gase und sogar Heroin reagieren. Die Nachweisempfindlichkeit liegt bei 1 ppm!

Literaturverzeichnis

- ADAM, W., 1973: Biologisches Licht. Chemie in unserer Zeit 7, 182—191.
- BEIJERINCK, M. W., 1902: Photobacteria as a reactive in the investigation of the Chlorophyll-function. Proc. Acad. Sci. Amst. 4, 45—49.
- BERGEY'S Manual of Determinative Bacteriology 8th Edition, 1974.
- BUKATSCH, F., 1936: Über den Einfluß von Salzen auf die Lichtentwicklung von Bakterien. Sitz. Ber. Österr. Akad. Wiss., math.-nat. Kl., Abt. I, 145, 7—10.
- COLLANDER, R., 1956: Permeability Studies on Luminous Bacteria. Protoplasma 46, 123—142.
- DUBOIS, R., 1887/88: Fonction photogénique chez le *Pholas dactylus*. C. R. Acad. Sci. Paris 105, 690—692 und C. R. Soc. Biol. Paris (Ser. 8) 3, 564—565, 5, 451—453.
- GREEN, A. A., and W. D. Mc ELROY, 1956: Crystalline firefly luciferase, Biochim. et Biophys. Acta 20, 170—176.
- GUNDERMANN, K. D., 1972: Chemilumineszenz. Chemie in unserer Zeit, 6, 55—66.
- HARVEY, E. N. 1916: The mechanism of lightproduction in animals. Science 44, 208—209.
- HARVEY, E. N., 1919: Studies on bioluminescence: IX. Chemical nature of Cypridina luciferin and Cypridina luciferase. J. gen. Physiol. 1, 269—293.
- HARVEY, E. N., 1925: The total luminous efficiency of luminous bacteria. J. gen. Physiol. 8, 89—108.
- HARVEY, E. N., 1952: Bioluminescence. Academic Press, New York, 649 p.
- HIRATA, Y., O. SHIMOMURA, and S. EGUCHI, 1959: The structure of Cypridina luciferin. Tetrahedron Letters 5, 4—9.
- KRANZ, R., 1970: Untersuchungen zur physiologischen Charakterisierung der Leuchtbakterienarten *Photobacterium phosphoreum* und *Vibrio luminosus*. Dissertation München, naturw. Fakt. d. Univ.

- KREMMETER, A. F. und F. BUKATSCH, 1960: Physiologische Untersuchungen an *Photobacterium fischeri*. Naturwissenschaften **47**, 500.
- KREMMETER, A. F. und F. BUKATSCH, 1962: Physikalisch-chemische Untersuchungen zum Intermediärstoffwechsel von Leuchtbakterien. Hoppe Seylers Z. f. Phys. Chemie **329**, 130—148.
- Mc ELROY, W. D., and B. L. STREHLER, 1954: Bioluminescence. Bact. Rev. **18**, 177—194.
- Mc ELROY, W. D., J. W. HASTINGS, V. SONNENFELD, J. COULOMBRE, 1953: The requirement of riboflavin phosphate for bacterial luminescence. Science **118**, 385—386.
- MOLISCH, F., 1912: Leuchtende Pflanzen, 2. Aufl. G. Fischer, Jena. 168 p.
- MUDRAK, A., 1933: Beiträge zur Physiologie der Leuchtbakterien. Zentralbl. Bakt. u. Parasitenk., II. Abt **88**, 353—366.
- RICHTER, O., 1928: Natrium, ein notwendiges Nahrungselement für eine mikroärophile Leuchtbakterie. Denkschr. Akad. Wiss. Wien, math.-nat. Kl. **101**, 261—292.
- RIEDER, H. J., und F. BUKATSCH, 1957: Physikalisch-chemische Untersuchungen zum Energie-Haushalt des Bakterienleuchtens. Zentralbl. f. Bakt. u. Parasitenk., II. Abt. **110**, 319—338.
- SCHALLER, F., 1963: Das Licht der Tiere. Umschau 1963, H. 21, 663—665.
- SELIGER, H. H., and W. D. Mc ELROY, 1959: Quantum yield in the Oxidation of firefly luciferin. Biochem. Biophys. Res. Comm. Commun. **1**, 21—24.
- STREHLER, B. L., and M. J. CORMIER, 1953: Factors affecting the luminescence of cell-free extracts of the luminous Bacterium *Achromobacter fischeri*. Arch. Biochem. **47**, 16—33.
- TERPSTRA, W., 1960: On the Role of long-chain aldehyds in the light-reaction in *Photobacterium*

- phosphoreum* enzyme preparations. Biochim. et Biophys. Acta **41**, 55—67.
- Van SCHOUWENBURG, K. L. and J. G. EYMERS, 1936: Quantum Relationship of the Light-emitting Process of Luminous Bacteria. Nature **138**, 245.
- WHITE, E. H., F. Mc CAPRA, G. F. FIELD and W. D. Mc ELROY, 1961: The Structure and Synthesis of firefly luciferin. Journal Amer. chem. Soc. **83**, 2402—2403.