

# Nährstoffarm oder nährstoffreich – nur Ansichtssache?

Ein Vortrag von Jörg Kokott zum 3. Aqua-Terra Symposium, Sindelfingen 2003

## Vorwort

Der freundlichen Einladung von Herrn Claude Schuhmacher, im Rahmen der 3. Messe Fisch & Reptil 2003 in Sindelfingen einen Vortrag zu halten, bin ich sehr gerne gefolgt. In Zusammenarbeit mit [www.korallenriff.de](http://www.korallenriff.de) werden nun die Inhalte dieses Vortrags in Form eines Fachartikels dem interessierten Riffaquarianer im Internet zur Verfügung gestellt.

Dem Artikel liegt die Gliederung des Vortrags (siehe unten) zu Grunde, die um die Rezepturen der im Vortrag behandelten Nährlösungen erweitert ist. Manuela Kruppas und Robert Baur-Kruppas von [www.korallenriff.de](http://www.korallenriff.de) danke ich für die Bereitstellung ihrer Internetseite zur Veröffentlichung dieses Artikels.

Der Artikel gliedert sich wie folgt:

- Einleitung
  - Was sind Nährstoffe
  - Nährstoffkonzentrationen im Riff und im Aquarium
- Stabilität und Umsatz von Nährstoffen
  - Stickstoffverbindungen und Stickstoffkreislauf
  - Phosphorverbindungen und Phosphorkreislauf
  - Verteilung von Stickstoff und Phosphor im Aquarium
- Nährstoffarm versus nährstoffreich
  - Heterotrophe Ernährung von Korallen
  - Koralle – Zooxanthellen Symbiosekonzept
  - Nährstoffeffekte auf Wachstum, Zooxanthellendichte und Farbigkeit
- Gefahren
  - Nährstofflimitierungen
  - Akute Veränderungen im Nährstoffgehalt
- ...und was es zu beachten gilt
  - Symptomatik einer Nährstofflimitierung
  - Behebung einer Nährstofflimitierung
- Nährstoffarm oder nährstoffreich? Die Antwort
- Zusammenfassung
- Rezepte für Nährlösungen
  - Ammoniumchlorid-Stammlösung
  - Calciumnitrat-Stammlösung

# Einleitung

In den vergangenen zwei Jahren wurde vermehrt die Frage gestellt, ob es nicht sinnvoll sei, Riffaquarien bezüglich der Nährstoffgehalte im Meerwasser naturähnlich zu betreiben. Schliesslich sind wir stets darum bemüht, den natürlichen Lebensraum im tropischen Korallenriff so perfekt wie möglich in den eigenen vier Wänden nachzuempfinden, damit wir die Basis für eine artgerechte Haltung von Pflanzen und Tieren schaffen können.

Dieser Vortrag versucht eine Antwort auf die oben angesprochene Fragestellung zu finden. Dazu müssen wir uns zunächst mit grundlegenden Dingen rund um das Thema Nährstoffe und ihrer Verteilung im Aquarium befassen. Darauf aufbauend wird ansatzweise erklärt, wie Korallen und Algen funktionieren, d.h. wie sie Nährstoffe aufnehmen und wie sie auf verschiedene Nährstoffgehalte reagieren. Wichtig für uns Aquarianer ist dann die Frage nach den Gefahren, denen Korallen und Algen bei unterschiedlichen Nährstoffgehalten ausgesetzt sein können. Dass es solche Gefahren gibt zeigt sich in der Tatsache, dass sowohl nährstoffreiche als auch nährstoffarme Riffaquarien nicht immer so funktionieren, wie es der Pfleger gerne hätte. Das Spektrum reicht von einem schlechtem Polypenbild bei Korallen über nicht optimale Farben oder nur langsames Wachstum bis hin zu rasant absterbenden Korallenkolonien. Wie diese Gefahren vermindert und Probleme mit den Nährstoffgehalten gelöst werden können, wird abschliessend diskutiert.

## Die Geschichte der Riffaquaristik – ein Rückblick

Ich halte einen Rückblick in die Geschichte der deutschen Riffaquaristik für einen geeigneten Einstieg in das Thema, denn in den letzten vierzig Jahren hat sich die Nährstoffsituation in den Aquarien tendenziell und grundlegend verändert.

Fangen wir bei den reinen Fischaquarien der 1960er und 70er Jahre an. Hier waren die stickstoffhaltigen Nährstoffe Ammonium/Ammoniak ( $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ ) und Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) gefürchtete Fischtoxine, vor denen wir heute i.d.R. nur noch in der Einfahrphase Angst haben müssen. Diese giftigen Verbindungen werden teilweise selbst von den Aquarientieren produziert. Dem überschüssigen Stickstoff entledigt sich z.B. ein Fisch in Form von Ammonium über die Kiemen. Der Fisch ist damit einer der Initiatoren des Stickstoffproblems im Meerwasseraquarium, wie wir später bei den Um- und Abbauprozessen von Stickstoff im Aquarium sehen werden.

Charakteristischerweise reicherten sich in den frühen Pionieraquarien Ammonium und Nitrit sehr stark im Wasser an. Um Abhilfe zu schaffen wurde der Rieselfilter in die Aquaristik eingeführt - ein säulenartiger biologischer Filter der mit sog. Biobällen (Rieselkörpern) befüllt ist. Das Aquarienwasser wird über den Überlauf in den Rieselfilter geleitet und überströmt hier die Biobälle, auf deren Oberfläche Bakterien siedeln, die mit Hilfe von Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) Ammonium zu Nitrit und letzteres weiter zu Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) oxidieren. Damit war eine Möglichkeit gefunden, die Fischtoxine Ammonium/Ammoniak und Nitrit in das weitaus ungiftigere Nitrat umzuwandeln. Rieselfilter sind Nitratproduzenten und bieten selbst nicht die Möglichkeit, dass entstandene Nitrat weiter zu gasförmigen Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) umzuwandeln.

Folglich waren die damaligen Aquarien stark mit Nitrat belastet und von Faden- und Cyanobakterienplagen heimgesucht.

In den 1970er Jahren haben robuste Weichkorallen und Anemonen Einzug in die Riffaquarien erhalten. Ausserdem war bis dahin schnell erkannt worden, dass die ebenfalls importierten höheren Makroalgen aus der Gattung *Caulerpa* durch ihr rasches Wachstum gut geeignet sind, um unschöne Fadenalgen zurückzudrängen. Die dekorativen *Caulerpa* Arten schmückten zusammen mit den Weichkorallen und Anemonen die damals populären „Holland-Aquarien“, in denen bereits Korallenwachstum erzielt werden konnte. Aber nicht

nur gegenüber Fadenalgen konnte sich die *Caulerpa* behaupten – auch das Korallenwachstum wurde von den üppig wachsenden Grünalgen gehemmt. Die Nährstoffgehalte waren aber durch die zahlreichen Verbraucher im Aquarium gegenüber den reinen Fischaquarien deutlich gesunken.

Der Beginn der heutigen „Modernen Riffaquaristik“ lässt sich etwa auf die Mitte der 1980er Jahre datieren. Dass neben Weichkorallen nun auch kleinpolypige Steinkorallen erfolgreich gehalten und zum Wachsen gebracht werden konnten, ist auf die bis dahin deutlich verbesserte Filter- und Abschäumtechnik sowie auf die Optimierung von Strömung und Beleuchtung zurückzuführen. Das Meerwasser war nur noch nährstoffangereichert, aber nicht mehr übermäßig belastet – ein Zustand, der beinahe allen zooxanthellaten (symbiontischen) Korallen zusagte, so dass deren Einzug in die Riffaquarien nichts mehr im Wege stand.

Heute sind wir vielfach dazu in der Lage, Nährstoffgehalte unter die Nachweisgrenze aquaristischer Tests zu bringen. Wachstumsraten, Wuchsformen, Koloniegröße und Farbigkeit - insbesondere der kleinpolypigen Steinkorallen - sind so weit optimiert, dass die aquariengewachsenen Korallen gegenüber den Kolonien im natürlichen Lebensraum kaum mehr in etwas nachstehen.

Wir befinden uns in der „Ära der privaten Korallenzüchter“. Moderne Plagegeister wie Krusten- und Scheibenanemonen oder Xenien machen uns das Leben schwer, und nicht selten sind die Nährstoffgehalte so deutlich abgesenkt, dass wir diesbezüglich an die unterste Grenze, an der Korallenwachstum noch möglich ist stoßen.

Mit der Zucht von Phyto- und Zooplankton können die bislang wenigen Pioniere auf diesem Gebiet heute einige ausgewählte azooxanthellate Korallen und andere filtrierende Invertebraten zum Wachsen bringen – eine aquaristische Disziplin, deren Durchbruch sich am Horizont abzuzeichnen scheint.

In diesem Rückblick in die Geschichte sind zumindest die Namen der wichtigsten Stickstoffverbindungen gefallen. Nun soll eine Definition für den Nährstoffbegriff gefunden werden, um etwas tiefer und theoretischer in das Thema einsteigen zu können.

## Was sind Nährstoffe?

Nährstoffe sind chemische Verbindungen, die von Organismen aus der Umgebung aufgenommen werden und die zum individuellen Überleben wichtigen Nährelemente enthalten.

Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass jeder Organismus – ob Land- oder Wasserbewohner – zu jeder Zeit Substanzen aus seiner Umgebung aufnimmt, es sich dabei aber nicht immer und grundsätzlich um Nährelemente handelt. Vielfach werden neben den zum Überleben wichtigen (essentiellen) Nährelementen auch Moleküle oder Elemente aufgenommen und teilweise gespeichert, die nicht essentiell sind. Beispielsweise reichern Braunalgen (z.B. Tange) im Meer viele verschiedene Schwermetalle (darunter auch Gold) in ihren Gewebe an. Warum die Pflanzen dies tun ist nicht bekannt, und es scheint für ihr Überleben und ihre Fortpflanzung nicht unbedingt notwendig zu sein.

Jeder Organismus hat seinen eigenen Bedarf an Nährelementen abzudecken. Nicht jedes Nährelement ist für einen anderen Organismus gleich viel bedeutend. Als Beispiel sind uns allen die als Kieselalgen bezeichneten Bacillariophyceen (veraltet auch Diatomeen genannt) bekannt. Die einzelligen Algen bauen sich aus Kieselsäure (Silikat, eine Silicium-haltige Substanz) eine äussere Hülle auf, ohne die sie nicht leben können. Ihr Bedarf an Silikat ist dadurch etwa fünf Mal höher als bei anderen Algen. Während das Nährelement Silicium für die Kieselalgen absolut lebenswichtig ist, und sie bei einer Eliminierung von Silikat im Meerwasser durch eine vorhergehende Wasseraufbereitung mit Umkehrosioseanlage und nachgeschaltetem Reinstwasserfilter absterben, kommen die übrigen Algen im Aquarium mit dieser Absenkung von Silikat prima zurecht. Sie benötigen es nur in äußerst geringen

Mengen. Aus diesem Grund ist in der oben angeführten Definition für den Nährstoffbegriff das Wort „individuell“ unterstrichen.

Grundsätzlich teilt man Nährstoffe nach ihrem Gehalt im Organismus in Makro- und Mikronährstoffe ein. Letztere werden auch Spurenelemente genannt. Ist der Gehalt eines Nährelements im getrockneten Organismus (Trockenmasse, TM) größer als 1 mg/g TM, gehört es zur Gruppe der Makroelemente. Umgekehrt fallen alle Nährelemente, deren Gehalt kleiner ist als 1 mg/g TM in die Kategorie der Mikro- oder Spurenelemente.

Makronährelemente		Mikronährelemente	
Kohlenstoff	C	Eisen	Fe
Sauerstoff	O	Kupfer	Cu
Wasserstoff	H	Zink	Zn
Phosphor	P	Mangan	Mn
Stickstoff	N	Silicium	Si
Kalium	K	Cobalt	Co
Schwefel	S	Molybdän	Mo
Calcium	Ca	Vanadium	V
Magnesium	Mg	Bor	B
Silicium (Diatomeen)	Si	Chlor	Cl
		Natrium	Na
		Iod	I
		Brom	Br

Abbildung 1: Makro- und Mikronährelemente

Eine für uns äußerst wichtige Unterscheidung betrifft das Lösungsverhalten von Nährstoffen in Wasser. Gelöste Nährstoffe sind im Meerwasser enthalten, wir können sie aber nicht sehen (teilweise aber mit Tests detektieren und messen). Neben den gelösten Nährstoffen gibt es noch solche, die in partikulärer Form im Aquarium vorhanden sind und die wir sehen können, vorausgesetzt sie sind groß genug. Diese zweite Gruppe der partikulären Nährstoffe umfasst suspendierte Nährstoffe (Schwebstoffe oder Schleimsekrete) und gebundene Nährstoffe (z.B. Calciumphosphate im Bodengrund).

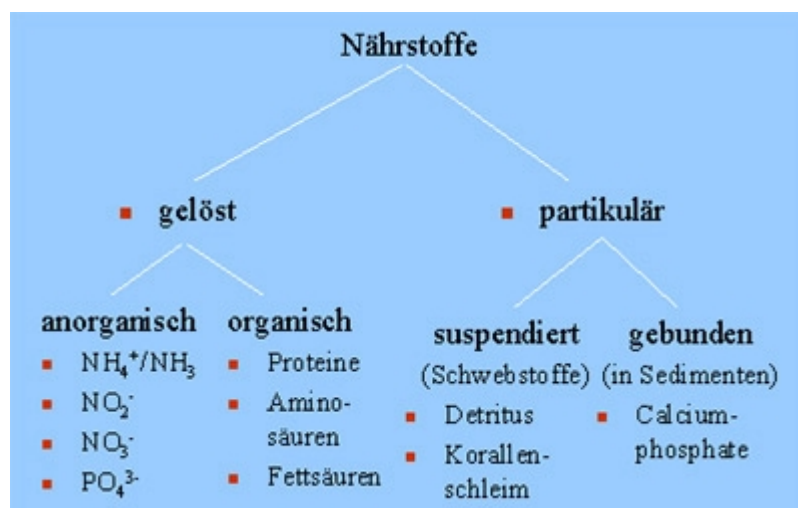


Abbildung 2: Die vier Nährstoffgruppen

Die Gruppe der gelösten anorganischen Nährstoffe können wir mit aquaristischen Tests messen. Vorenthalten bleibt uns dagegen der Nachweis von gelösten organischen Nährstoffen sowie der gesamten Gruppe der partikulären Nährstoffe. Nur ein entsprechendes Labor kann auch diese Nährstoffe nachweisen und quantifizieren.

Offensichtlich messen und diskutieren wir nur eine einzige von insgesamt vier Nährstoffgruppen im Aquarium. Selbst wenn wir weder Ammonium, Nitrat noch Phosphat im Wasser nachweisen und dabei Messfehler ausschliessen können, ist es durchaus möglich, dass Fadenalgen die gesamte Dekoration im Aquarium regelrecht überwuchern. Die Erklärung ist das Vorhandensein von Calciumphosphatdepots in den Steinen. Wir können diese weder sehen, noch messen. Aber die Fadenalgen können sie nutzen. Wenn wir also nicht alle vier genannten Nährstoffgruppen berücksichtigen, sind wir nicht dazu in der Lage, unser Aquariensystem richtig zu verstehen. Es dauert oft Wochen und Monate bis man dahinter kommt, dass die Calciumphosphate in der Dekoration für die Algenplage verantwortlich sind.

Das Beispiel der Fadenalgenplage und den Phosphatdepots in den Lebenden Steinen rechtfertigt die Frage, welche Nährstoffquellen für die verschiedenen Organismengruppen – Algen, Korallen und Bakterien – überhaupt nutzbar sind.

Bakterien siedeln in sogenannten Biofilmen (umgangssprachlich „Bakterienrasen“ genannt). Bakterien überwachsen alle Flächen im Aquarium, einschliesslich der Scheiben und Rohrwänden und können alle genannten Nährstoffquellen nutzen, dadurch, dass sie auf partikulären Nährstoffen einfach „draufsitzen“.

Algen, Korallen und Bakterien entnehmen dem Meerwasser die darin gelösten anorganischen und organischen Nährstoffe. Diese Nährstoffgruppe bildet die Schnittmenge aus allen drei Organismengruppen (Abb. 3 rot).

Algen und Bakterien können darüber hinaus die gebundenen Nährstoffe – z.B. ausgefällte Calciumphosphate – aufschliessen und in ihre Biomasse einbauen. Korallen können dies nicht, und entsprechend bildet die Gruppe der gebundenen Nährstoffe die Schnittmenge aus Algen und Bakterien (Abb. 3 hellgrün).

Korallenpolypen fangen mit ihren Tentakeln suspendierte Nährstoffe, beispielsweise aufgewühlten Detritus oder Plankton. Algen sind wiederum nicht fähig, diese Nährstoffquelle zu erschliessen, so dass Korallen und Bakterien hier eine eigene Schnittmenge bilden (Abb. 3 hellblau).



Abbildung 3: Nutzbarkeit von Nährstoffquellen

Wie bereits gesagt können wir einige der gelösten anorganischen Nährstoffe mit handelsüblichen Tests messen. Dabei kommt es nicht selten vor, dass man nach einer ganzen Weile mal wieder den Nitratgehalt misst, und schon nach dem Anmischen aller Pülverchen und Tröpfchen an der rasanten roten Farbentwicklung erahnt, welcher unerfreulicher Wert dabei herauskommen wird. Je höher der Wert, desto ungestümer fragt man sich, wo das ganze Nitrat überhaupt her kommt.

Am einfachsten lässt sich diese Frage mit einem Rechenbeispiel beantworten. Gegeben sei ein Nitratgehalt von 40 mg/L in einem 500 L Riffaquarium, in das wöchentlich 100 g getrocknete Nori-Algen (*Porphyra*) als Futter für zwei Doktorfische gegeben wird.

Dabei ist es realistisch anzunehmen, dass diese 100 g Nori-Algen einen Stickstoffgehalt von 5 g besitzen. Bei der Fütterung wird dieser Stickstoff zunächst von den Fischen umgesetzt, aber schließlich geben letztere den Stickstoff wieder in Form von Ammonium über die Kiemen ans Wasser ab. Ammonium wird dann von Bakterien zu Nitrat umgesetzt. 5 g Stickstoff entsprechen 6,4 g Ammonium und 22,1 g Nitrat, bezogen auf 500 L Aquarienvolumen macht das einen Nitratgehalt von 44 mg/L.

Es geht also recht schnell, dass man 44 mg/L Nitrat im Wasser misst. Dieses Beispiel veranschaulicht, wie gut unsere Aquarien eigentlich Stickstoff umsetzen und abbauen können, selbst die sog. Problemaquarien. Würden diese 44 mg/L Nitrat nicht zu einem großen Teil sofort umgebaut werden, könnten wir nach einigen Wochen Fischfütterung unsere Aquarien wieder abbauen, weil letztlich auch Nitrat in hohen Konzentrationen für Fische und andere Tiere giftig ist.

## Nährstoffkonzentrationen im Riff und im Aquarium

Die Grundlage für die Diskussion über Nährstoffgehalte im Aquarium liefern die zahlreich publizierten wissenschaftlichen Untersuchungen an natürlichen Korallenriffen, die uns die Diskrepanz zwischen natürlichen Nährstoffgehalten und denen im Aquarium vor Augen halten.

Das kürzlich erschienene Buch „Catchments and Corals“ von Miles Furnas bietet eine Übersicht über die Nährstoffgehalte im australischen Great Barrier Reef (GBR). Das größte zusammenhängende Riff auf diesem Planet liegt an der ostaustralischen Küste und wird in drei große Regionen aufgeteilt: die nördliche Region von Cape York bis Cape Flattery, die zentrale Region von Cape Tribulation bis zu den Whitsunday Islands und die südliche Region von Mackay bis Gladstone. In allen Regionen wurden Wasseranalysen in verschiedene Riffen durchgeführt. Folgende Parameter wurden unter anderem gemessen:

Ammonium -Stickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )  
Nitrit + Nitrat ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )  
Gelöster organischer Stickstoff (DON)  
Partikulärer Stickstoff (PN)  
Anorganisches Phosphat ( $\text{PO}_4\text{-N}$ )  
gelöster organischer Phosphor (DOP)  
Partikulärer Phosphor (PP)

Aus diesen Stickstoff- und Phosphorparametern lässt sich der Gesamtstickstoff- und Gesamtphosphorgehalt einfach berechnen. Zur Vereinfachung habe ich für diesen Vortrag den Gesamtstickstoffgehalt in Nitrat und den Gesamtphosphorgehalt in Phosphat umgerechnet, weil wir uns darunter mehr vorstellen können. Tabelle 1 zeigt im Überblick die Nährstoffgehalte in den drei Regionen des GBR. Darüber hinaus habe ich für ein fiktives Riffaquarium die in Tabelle 1 gezeigten Werte angenommen und den gemessenen Nährstoffgehalten im GBR gegenübergestellt.

Tabelle 1 zeigt, dass die Nährstoffgehalte im GBR von Norden nach Süden zunehmen. Vergleichen wir den Gesamtstickstoff- und den Gesamtphosphorgehalt in der nährstoffreichsten (südlichen) Region mit den angenommenen Aquariumwerten, dann entspricht dies einer Nährstoffanreicherung im Aquarium um fast den Faktor 20 für Stickstoff und den Faktor 2,5 für Phosphor.

Tabelle 1: Nährstoffgehalte im Riff und im Aquarium

Parameter	Nördliches GBR(*)	Zentrales GBR (*)	Südliches GBR (*)	Aquarium (**)	Aquarium/ Südl. GBR
N <sub>tot</sub> (als NO <sub>3</sub> )	87,4 µg/L (0,387 mg/L)	96,7 µg/L (0,428 mg/L)	121,6 µg/L (0,539 mg/L)	2,26 mg/L (10 mg/L)	18.5
P <sub>tot</sub> (als PO <sub>4</sub> )	6,2 µg/L (0,019 mg/L)	9,0 µg/L (0,028 mg/L)	12 µg/L (0,037 mg/L)	0,033 mg/L (0,1 mg/L)	2.5

(\*) aus: Furnas, M. (2003). Catchments and Corals. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australien.

(\*\*) fiktives Aquarium mit typischem Nährstoffgehalt

Aber nicht nur der Unterschied in den Totalkonzentrationen ist relevant. Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Verteilung der verschiedenen gelösten und partikulären Stickstoff- und Phosphorverbindungen im natürlichen Lebensraum. Da wir aufgrund unserer eingeschränkten Messmöglichkeiten stets nur auf Nitrat und Phosphat fokussieren, und dabei die gelösten organischen und partikulären Nährstoffe vernachlässigen, schauen wir auch automatisch nur auf den Nitrat- und Phosphatgehalt in den Korallenriffen. Wie Tabelle 2 zeigt kann dies ein gravierender Fehler sein. Denn der Anteil von Nitrat und Phosphat am Gesamtstickstoffgehalt kann durchaus verschwindend gering sein.

Tabelle 2: Verteilung der Nährstoffparameter im Gesamtnährelementgehalt

Parameter (*)	Nährstoffgehalt [µg/L] (*)	Anteil [%]
NH <sub>4</sub> -N	0,4	0,4
NO <sub>3</sub> -N	0,3	0,3
DON	76	78,6
PN	20	20,7
N <sub>tot</sub>	96	100
PO <sub>4</sub> -P	3	33,3
DOP	3	33,3
PP	3	33,3
P <sub>tot</sub>	9	100

(\*) aus: Miles, F. (2003). Catchments and Corals. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia.

Tabelle 2 zeigt die Verteilung der Nährstoffparameter im Gesamtstickstoff- und Gesamtphosphorgehalt am Beispiel der zentralen GBR-Region. In dem ich den prozentualen Anteil der jeweiligen Einzelparameter am Gesamtnährstoffgehalt berechne, wird eindrucksvoll sichtbar, welche untergeordnete Rolle der Nitratgehalt zu spielen scheint. Der Anteil an Nitrat ist mit gerade mal 0,7% am Gesamtstickstoffgehalt gegenüber 78,6% gelöstem organischen Stickstoff (DON) und 20,7% partikulären Stickstoff (PN) beinahe schon vernachlässigbar. Im Gegensatz zum Stickstoff ist Phosphor sehr gleichmäßig verteilt. Aber wenngleich auch nicht so eindrucksvoll, spielen hier die gelösten organischen Phosphorverbindungen (DOP) und der partikuläre Phosphor (PP) sicherlich eine wichtige Rolle bei der Ernährung von Bakterien, Algen und Korallen.

Korallenriffe sind also nicht so nährstoffarm, wie wir Aquarianer immer annehmen. Natürlich minimieren wir mit bestimmten Filtertechniken und Filtermedien auch den Gehalt gelöster

organischer und partikulärer Nährstoffe, so dass diesen im Aquarium womöglich nicht die gleiche Bedeutung zukommt als es in der Natur der Fall ist.

Die Frage, in wie fern eine solche Minimierung von organischen und partikulären Nährstoffen für unsere Aquarien sinnvoll ist, wird schon seit langem in der Diskussion über die Vor- und Nachteile der Abschäumung gestellt. Die Entfernung von vielen „guten“ Dingen ist unbestritten ein wesentlicher Nachteil dieser weit verbreiteten Filtertechnik.

Es ist sinnvoll, dass wir unsere Perspektive dahingehend ändern, als dass wir durchaus das Potential von gelösten organischen und partikulären Nährstoffen als geeignete Nährstoffquellen in unseren Aquarien in Betracht ziehen sollten.

## Stabilität und Umsatz von Nährstoffen

Nachdem nun bereits einleitend über die vielen verschiedenen Nährstoffgruppen und Nährstoffquellen diskutiert wurde, sollten wir uns auch damit beschäftigen, wie sich diese Nährstoffe im Aquarium verteilen.

Für jedes beliebige Nährelement kann man einen eigenen Kreislauf darstellen. Das liegt daran, daß Organismen ihre Nährelemente nicht nur aufnehmen, sondern auch wieder an ihre Umgebung abgeben. Dabei ist es wesentlich, dass die Nährelemente Bestandteil verschiedener Nährstoffe sind (z.B. Stickstoff als Nitrat, Ammonium oder als Aminosäure). Verschiedene Nährstoffe haben verschiedene physikalisch-chemische Eigenschaften und werden verschieden gut von Organismen aufgenommen und verwertet.

Die wichtigsten Nährstoffkreisläufe umfassen die Nährelemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Phosphor (P) und Schwefel (S). In diesem Vortrag werden lediglich der Stickstoff- und der Phosphorkreislauf behandelt, und zwar so, wie sie sich im Aquarium darstellen.

## Stickstoffverbindungen und Stickstoffkreislauf

Als anorganische Stickstoffverbindungen sind uns der elementare Stickstoff ( $N_2$ , Luftstickstoff), Ammonium/Ammoniak, Nitrit und Nitrat bekannt. Ausgenommen den elementaren Stickstoff können wir alle diese anorganischen Formen messen. Nicht messbar sind dagegen die organischen Stickstoffverbindungen, darunter Aminosäuren, Amino Zucker und viele andere organische Moleküle wie zum Beispiel der Träger des Erbguts, DNA. Die Lebensdauer von organischen Stickstoffverbindungen in Meerwasser beträgt mehrere Stunden bis zu einigen Tagen. Allerdings können zum Beispiel Proteine (und damit deren Grundbausteine Aminosäuren) abgeschäumt oder aber auch durch eine Ozondosierung zerstört werden, so daß organische Nährstoffe im Aquarium unter Umständen sehr instabil sind.

Es ist nicht ohne Grund, warum wir im Aquarium nur Nitrat messen können, denn alle genannten Stickstoffverbindungen sind in (Meer)Wasser unterschiedlich lange stabil. Nitrat und der Luftstickstoff sind die stabilsten Formen, wohingegen Ammonium/Ammoniak und Nitrit instabil sind. In Gegenwart von Sauerstoff werden Ammonium/Ammoniak und Nitrit schnell in Nitrat überführt (oxidiert), ein chemischer Vorgang, der ganz von alleine im Wasser stattfindet. Zudem sind Bakterien dazu in der Lage, Ammonium in Nitrit und Nitrit weiter in Nitrat zu verwandeln, was man als **Nitrifikation** bezeichnet.

Nitrat als Endprodukt der Nitrifikation kann nicht weiter mit Sauerstoff reagieren, er ist vollständig oxidiert und somit stabil. Nitrat kann nur in einer sauerstofffreien (anoxischen) Umgebung umgebaut werden. Bakterien können in einem anoxischen Milieu Nitrat in elementaren Stickstoff ( $N_2$ ) verwandeln, ein Stoffwechselweg, den man **Denitrifikation** nennt.

Der Luftstickstoff ( $N_2$ ) wird in der Aquaristik oft vernachlässigt, was zwei Gründe hat. Zum einen ist Luftstickstoff für fast alle Organismen auf der Erde nicht nutzbar, weil er chemisch äußerst unreaktiv ist. Eine Ausnahme bilden hier einige wenige spezialisierte Bakterien, und



zwar Cyanobakterien, die nur unter hohem Energieaufwand  $N_2$  in Ammonium verwandeln und nutzen können. Der zweite Grund ist, dass durch die bewegte Wasseroberfläche und weitaus extremer durch die Abschäumung Luftstickstoff ständig ins Wasser eingeführt wird. Zu 78% bildet Luftstickstoff den Hauptanteil der Luft (Luft ist ein Gasgemisch aus Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und einigen Edelgasen), und entsprechend sollte unser Aquarienwasser mit  $N_2$  stark angereichert wenn nicht sogar gesättigt sein.

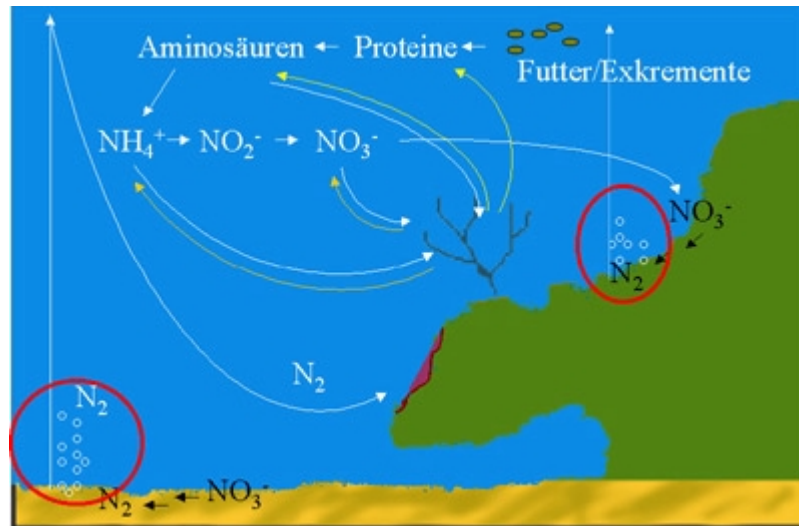


Abbildung 4: Stickstoffkreislauf

Abbildung 4 zeigt schematisch den Stickstoffkreislauf im Aquarium. Abgesehen von dem Luftstickstoff, der sich wie beschrieben von alleine ständig ins Aquarium einbringt, sind die Haupteintragsquellen für Stickstoff die Fütterung unserer Tiere und das Ausscheiden von stickstoffhaltigen Verbindungen durch Tiere und Pflanzen. Wird das Futter von Fischen gefressen, geben sie es einerseits als Ammonium über ihre Kiemen ab, andererseits scheiden sie den Stickstoff in partikulärer Form durch ihren Kot aus. Exkremente und nicht gefressenes Futter wird schnell zu kleineren Bestandteilen abgebaut. Zunächst lösen sich aus dem partikulären Material Proteine heraus. Bereits hier ist der partikuläre Stickstoff in gelösten organischen Stickstoff (Proteine) umgewandelt worden. Aminosäuren sind ebenfalls organische Stickstoffverbindung und resultieren aus dem weiteren Abbau von Proteinen. Letztlich geben die Aminosäuren ihren Stickstoff als Ammonium frei, einer gelösten anorganischen Stickstoffform.

Egal ob Fische Stickstoff direkt als Ammonium über die Kiemen oder als Kot abgeben, oder ob das Futter gar nicht gefressen sondern im Aquarium zersetzt wird, das vorläufige Endprodukt ist stets Ammonium. Bis hierher haben wir kennengelernt, wie partikulärer Stickstoff (Kot, Futter) direkt in anorganischen Stickstoff (Ammonium) (durch die Fische), und wie partikulärer Stickstoff in gelösten organischen Stickstoff (Proteine, Aminosäuren) und weiter zu anorganischen Stickstoff (Ammonium) verwandelt wird.

Nun folgt die Besprechung der weiteren Schritte im Stickstoffkreislauf auf der Ebene der anorganischen Stickstoffverbindungen. Die bereits erläuterte Nitrifikation findet in unseren Aquarien überall dort statt, wo Sauerstoff zugegen ist. Entweder ganz von alleine durch chemische Oxidation, oder mit Hilfe von Bakterien durch biochemische Oxidation (Nitrifikation). Das stabile Endprodukt ist dabei stets Nitrat, und wird dieses nicht verbraucht, dann kann es sich im Wasser anreichern und als Pflanzennährstoff zum Beispiel zu Algenplagen führen.

Der biochemische Abbau von Nitrat zu elementarem Stickstoff (Denitrifikation) ist im Aquarium aber nicht ausgeschlossen. In einem gut geplanten und eingerichteten Aquarium gibt es genügend sauerstofffreie Umgebungen, z.B. in einem ausreichend hohen Bodengrund oder in den feinen Poren der Lebenden Steine. Hier wandeln denitrifizierende Bakterien das Nitrat in elementarem Stickstoff um. Letzterer ist gasförmig, und weil das Wasser bereits mit  $N_2$  gesättigt ist und kein weiterer Stickstoff mehr in Lösung haltbar ist,

treten sichtbar Gasblasen aus den Steinen und dem Bodengrund und entweichen an der Wasseroberfläche in die Atmosphäre (in Abb. 4 mit roten Kreisen markiert). Hierbei geht dem Aquariensystem Stickstoff endgültig verloren, was uns Aquarianer sehr erfreut.

Ein Haken ist aber an der Sache dran, denn wir sprechen von einem Kreislaufsystem. Würde der Luftstickstoff einfach nur in der Atmosphäre verschwinden, wäre der Kreislauf nicht geschlossen. Aber er ist schliessbar, und zwar mit Hilfe stickstofffixierender Cyanobakterien, der kleinen, bereits erwähnten Gruppe von Bakterien die enorm viel Energie dafür aufwenden, Luftstickstoff verwerten zu können. Der Energieaufwand ist so hoch, dass sie gegenüber anderen Algen absolut konkurrenzunfähig sind und i.d.R. sofort verschwinden, wenn die anderen Algen ausreichend Stickstoff in Form von Ammonium oder Nitrat zur Verfügung haben. Solche Cyanobakterien werden in der Aquaristik als Reinwasserformen bezeichnet. Es ist die am einfachsten zu bekämpfende Cyanobakterienplage, weil man meist nur den Abschäumer für einige Tage abschalten muß und damit andere Stickstoffverbindungen wie Proteine im Aquarium beläßt, die wiederum von Algen und Korallen nutzbar sind. Letztere verdrängen dann die Cyanobakterien durch natürliche Konkurrenz.

In dem sie den im Wasser gelösten Luftstickstoff fixieren und in Ammonium umwandeln, wird dieser Stickstoff langfristig ins Aquariensystem eingebracht (vorausgesetzt es liegt eine Cyanobakterienplage vor). Hier liegt also eine weitere Quelle für Stickstoff, genau wie die Fischfütterungen. Cyanobakterien bauen dann den ursprünglich fixierten Stickstoff in ihre Biomasse ein (z.B. in Proteine), geben diesen Stickstoff aber letztlich wieder in Form von organischen Stickstoff oder als Ammonium ins Aquariensystem zurück, wodurch der Kreislauf geschlossen wird.

Korallen und Algen können Ammonium, Nitrat und Aminosäuren direkt aus dem Wasser aufnehmen, gleichzeitig diese und weitere Formen aber auch wieder ans Wasser abgeben. Ein bestimmter Anteil an Stickstoff wird immer wieder aufgenommen und erneut freigesetzt, also ein zyklischer Umsatz innerhalb des großen N-Kreislauf.

## Phosphorverbindungen und Phosphorkreislauf

Es gibt drei anorganische Phosphorverbindungen, die sich von der Phosphorsäure ableiten. Phosphorsäure ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) zerfällt in Meerwasser sehr schnell unter Abgabe von Protonen (Wasserstoffkation,  $\text{H}^+$ ) zu Dihydrogenphosphat ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), Hydrogenphosphat ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) und Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Alle drei genannten Verbindungen können wir zwar im Meerwasseraquarium finden und mit dem aquaristisch erhältlichen Phosphattest nachweisen, aber vor allem das Dihydrogenphosphat ist sehr instabil, weil es schnell zu Hydrogenphosphat umgewandelt wird. Letzteres und das Phosphat sind die stabilen Formen.

Es gibt einen wichtigen „funktionellen“ Unterschied zwischen Nitrat und Phosphat: Im Gegensatz zu Nitrat ist Phosphat mit positiv geladenen Metallionen (z.B. Eisen) und Erdalkalimetallionen (z.B. Calcium) ausfällbar. Fällbar heißt, dass zwei Ausgangsstoffe, die beide in Wasser gut löslich sind, miteinander zu einem Produkt reagieren, welches in Wasser nicht so gut löslich ist wie die beiden Ausgangssubstanzen. Die Folge ist ein sichtbarer Übergang von der gelösten in die feste Phase, was man als Fällung bezeichnet. Ausgefälltes Calciumphosphat (z.B.  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) ist als feines, staubartiges „Sediment“ sichtbar, wenn man die Reaktion z.B. in einem kleinen Becherglas stattfinden läßt. Im Aquarium bleiben solche Ausfällungen aber meist unentdeckt. Weil Calciumphosphat nicht gut in Meerwasser löslich ist, wird es ausfallen, absinken und sich auf den Steinen und im Bodengrund sammeln.

Organische Phosphorverbindungen gibt es zahlreich, z.B. als Bestandteil des Trägers der Erbinformation, DNA und verwandten Verbindungen wie Adenosin-triphosphat (ATP). Solche organischen Formen können i.d.R. durch Ozon zerstört, aber schlecht abgeschäumt werden.

Was die Stabilität in Meerwasser betrifft gilt das gleiche wie für die organischen Stickstoffverbindungen.

In Abbildung 5 ist der Phosphorkreislauf im Riffaquarium präsentiert. Auch hier ist das Futter und die Exkremente von Tieren Quellen für Phosphor im Aquarium. Genau wie bei Stickstoff wird der partikuläre Phosphor zunächst in gelösten organischen Phosphor überführt, der dann weiter zu anorganischem Phosphat abgebaut wird. Als stabile Endprodukte reichert sich Hydrogenphosphat und ortho-Phosphat im Wasser an.

Der wesentliche Unterschied ist einerseits die Fällbarkeit von Phosphat mit Calcium oder Eisen, sodaß hier ein chemischer Weg besteht, der gelösten Phosphor wieder in partikulären Phosphor umwandelt. Das geht mit Stickstoff nicht. Andererseits verbleibt im Gegensatz zu Stickstoff alles Phosphor im Aquariensystem, was eingetragen wird, weil Phosphor nicht wie Stickstoff über den biochemischen Weg der Denitrifikation in eine gasförmige Phosphorform verwandelt werden kann. Ganz von alleine wird Phosphor also niemals aus dem Aquarium verschwinden.

Gelöste anorganische und organische Phosphorverbindungen können von Algen und Korallen genutzt werden, und auch hier bildet sich ein kleiner Zyklus innerhalb des großen Kreislaufs aus.

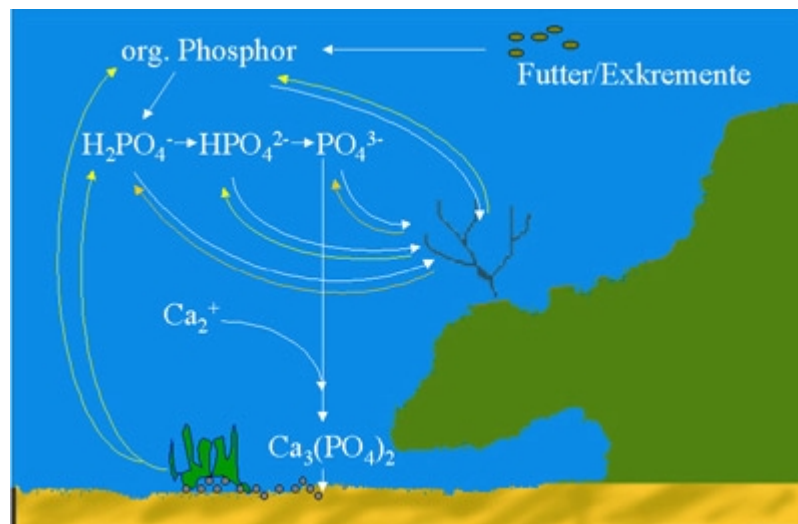


Abbildung 5: Phosphorkreislauf

Aber der ausgefällte, partikuläre Phosphor (z.B. als Calciumphosphat) stellt eine Nährstoffquelle dar, die zwar von Bakterien und Algen, nicht aber von Korallen genutzt werden können. Erinnern wir uns an die drei Schnittmengen, die sich zwischen Bakterien, Algen und Korallen bilden. Genau hier tritt der Fall ein, dass eine Algenplage entstehen kann, ohne dass wir im Wasser zwangsläufig Nitrat und Phosphat messen müssen. Während Korallen nicht gut wachsen, weil sie keine brauchbaren gelösten oder suspendierten Nährstoffe im Wasser vorfinden, können sich die Fadenalgen über die gesamte Dekoration ausbreiten, wenn sie genau dort gebundene Phosphate finden. Dies ist ein Beispiel dafür, dass wir uns keinesfalls mit der Messung von Nitrat und Phosphat im Wasser zufrieden geben können. Wir müssen alle Nährstoffquellen zumindest im Hinterkopf behalten, um auf solche zunächst unerklärlichen Algenplagen eine realistische Antwort finden können.

## Verteilung von Stickstoff und Phosphor im Aquarium

Aufgrund ihrer unterschiedlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften verteilen sich Stickstoff und Phosphor ungleich im Aquarium. Während Stickstoff über die Denitrifikation in ein Gas verwandelt und damit entfernt werden kann, bleibt der ins Aquarium eingetragene

Phosphor im System. Während wir jedoch Phosphat mit Calcium oder Eisen fällen bzw. an entsprechende Oberflächen binden (adsorbieren) können, gelingt dies mit Stickstoff nicht. Folglich gibt es Denitrifikationsfilter und Phosphatadsorber, aber keine (bzw. keine meerwasseraquaristisch brauchbaren) Nitratadsorber und „Dephosphorikationsfilter“.

## Stabilität und Umsatz von Nährstoffen im Aquarium - Zusammenfassung

- Nitrat und Phosphat sind die stabilen Endprodukte des Stickstoff- und Phosphorumsatzes im oxischen Milieu und reichern sich im Wasser an.
- Wir können viele Nährstoffquellen nicht erfassen, geschweige denn zuverlässig messen
- Algen und Korallen nutzen jeweils unterschiedliche Nährstoffquellen
- Die Verteilung der Nährstoffquellen ist dynamisch und in jedem Aquariensystem anders.

## Nährstoffarm versus nährstoffreich

Wir alle wollen schöne Aquarien pflegen, mit möglichst gut wachsenden und farbigen Korallen und gesunden Fischen. Viele Aquarianer geben sich damit zufrieden, dass ihnen Ihr Aquarium persönlich gefällt, ganz egal wie dieses Ziel nun verwirklicht werden konnte. Ein Standpunkt, den ich verstehen kann. Aber meiner Meinung bringt das die Aquaristik tendenziell nicht weiter.

Egal wie man der Sache gegenübersteht, Aquaristik ist nicht unbedingt reine Glücksache. Wir können viel dafür tun, dass unsere Aquarienpflege von Erfolg gekrönt ist. Dabei ist die Diskussion über die Nährstoffgehalte nur einer von mehreren Punkten. So ist z.B. in den vergangenen Jahren viel über verschiedene Beleuchtungssysteme und Leuchtmittel publiziert worden, was sich auch in der Herstellung und dem Vertrieb von riffaquaristisch optimierten Leuchtmitteln niedergeschlagen hat. Auch sind in der Frage um planktonschonende Strömungspumpen praktische Fortschritte gemacht worden.

Über Nährstoffgehalte und ihre Effekte auf Algen und Korallen wurde viel debattiert und geschrieben, aber stets blieb am Ende die Frage im Raum stehen, welche Nährstoffbedingungen den genannten Organismen nun eigentlich wirklich zusagen und welche nicht. Dass natürliche Korallenriffe nährstoffarm sind, ist letztlich eine messbare Beobachtung, aber dies als Antwort auf die Fragestellung „nährstoffarm oder nährstoffreich?“ anzubieten empfinde ich als äusserst unbefriedigend.

Zum einen, weil in diesem Vortrag bereits diskutiert wurde, dass Korallenriffe keineswegs so nährstoffarm sind, wie wir immer gedacht haben. Zum anderen aber auch, weil es unzählige Beispiele dafür gibt, dass sowohl nährstoffreiche als auch nährstoffarme Aquarien sehr erfolgreich und über lange Jahre hinweg gepflegt werden können.

Die Abbildungen 6-9 zeigen zwei völlig verschiedene Aquariensysteme bekannter deutscher Aquarianer, bei denen ich ohne weiteres Vorwissen nicht sagen könnte, welches der beiden Aquarien nun nährstoffreich und welches nährstoffarm betrieben wird.

Bernd Mohr aus Rüsselsheim pflegt seit vielen Jahren sein modifiziertes Berliner System ganz bewußt mit einem Nitratgehalt von 15-20 mg/L und einem Phosphatgehalt von knapp 0,1 mg/L. Demgegenüber betreibt Markus Resch aus Langquaid (Bayern) sein Becken mit einem Ecosystems Schlammfilter und kann weder Nitrat noch Phosphat in seinem Aquarium nachweisen. Die gezeigten Detailaufnahmen könnte man durchaus für Ausschnitte aus ein und demselben Aquarium halten.



Abbildung 6: Gesamtansicht des Aquariums von Bernd Mohr (Foto: B. Mohr)



Abbildung 7: Gesamtansicht des Aquariums von Markus Resch (Foto: M. Resch)

An dieser Stelle sei angemerkt, dass man auch mit einem Berliner System die Nährstoffe unter die Nachweisgrenze bringen kann, genau wie man mit einem Schlammfilteraquarium nicht zwangsläufig niedrige Nährstoffgehalte erzieht. Mit jedem Aquariensystem kann man bei guter Planung und Einrichtung nährstoffarme Bedingungen erzeugen.



Abbildung 8: Detailansicht des Aquariums von Bernd Mohr (Foto: B. Mohr)



Abbildung 9: Detailansicht des Aquariums von Markus Resch (Foto: M. Resch)

Was ist also an der Diskussion über die Nährstoffgehalte dran? Ist es wirklich nur Ansichtssache?

Den einzigen Ansatz, den ich zur Findung einer Antwort als sinnvoll erachte, ist der wissenschaftliche. Wenn wir wissen, wie Korallen und Algen funktionieren, wie sie ihren Nährstoffgehalt abdecken können und wie sie auf experimentelle Veränderungen in den Nährstoffgehalten physiologisch reagieren, dann sind wir dazu in der Lage, eine Aussage für unser Aquarium zu treffen. Fragen wir uns also, wie sich eine zooxanthellate Koralle ernährt?

**Wie ernähren sich Korallen?**

Genau wie wir und jedes andere Tier müssen auch Korallen bestehende Nahrung aufnehmen und verdauen, um daraus ihre Energie zu ziehen (sie sind heterotroph). Pflanzen

hingegen sind Organismen, die dazu in der Lage sind, sich selbst Nahrung herzustellen, und zwar durch Ausnutzung der energiereichen Sonnenstrahlung (sie sind photoautotroph). Da wir in unseren Aquarien fast ausschliesslich zooxanthellate Korallen pflegen, die in Symbiose mit einzelligen Algen (Zooxanthellen) leben, ist es zumindest aus aquaristischer Sicht gerechtfertigt, solche Korallen funktionell sowohl als Pflanzen als auch als Tiere anzusehen (wissenschaftlichen Kollegen mögen mir diese Verallgemeinerung verzeihen).

Welche Nährstoffquellen von Korallen genutzt werden können, zeigt Abbildung 10.



Abbildung 10: Ernährung von zooxanthellaten Korallen

In Abbildung 11 ist ein Polyp einer zooxanthellaten Gorgonie aus der Gattung *Plexaurella* gezeigt. Gut zu erkennen sind die Primärtentakel, die wiederum sehr feine und kurze Sekundärtentakel ausgebildet haben. Mit diesen Tentakeln kann der Polyp partikuläre Nährstoffe einfangen und zur Mundöffnung transportieren. Dort wird die Nahrung „verschluckt“ und gelangt in den Gastralraum, wo sie (wie Cyclop Eeze in Abbildung 11) verdaut werden kann. Die äußere Oberfläche eines Polypen ist sehr groß, und über diese können viele gelöste anorganische und organische Nährstoffe absorbiert werden. Der Polyp ernährt sich also nicht nur über die orale Aufnahme von Partikeln, sondern auch über die gesamte Oberfläche mit gelösten Nährstoffen.

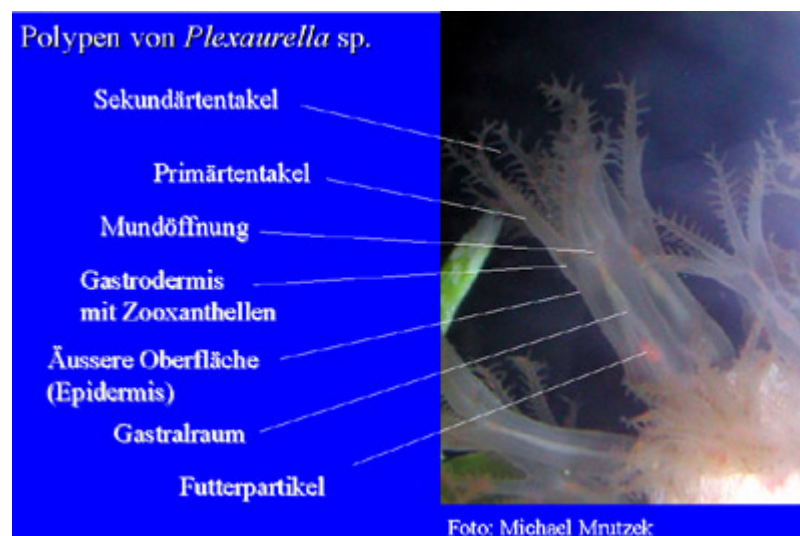


Abbildung 11: Polypen einer *Plexaurella* sp. Die Polypen wurden mit „Cyclop Eeze“ gefüttert. Die roten Futterpartikel sind gefressen worden und nun im Gastralraum sichtbar.

Nesseltiere besitzen charakteristischerweise ein Gewebe, das aus zwei einzelligen Schichten (einschichtiges Epithel) besteht. Die äussere – dem Meerwasser zugewandte Schicht – nennt man Epidermis, die innere – dem Gastralraum zugewandte Schicht – wird als Gastrodermis bezeichnet. Zooxanthellen findet man grundsätzlich nur in der gastrodermalen Schicht, also der Inneren. Das hat folgenden Grund: Die Zooxanthellen sind als ursprünglich freilebendes Phytoplankton (Dinoflagellaten) von der Koralle „gefressen“ worden. Allerdings hat die Koralle in ihrem Magen (Gastralraum) anhand spezifischer Signalstrukturen auf der Zelloberfläche der Algen erkannt, dass diese Algen „nützlich“ sind. Sie wurden also nicht wie Nahrung verdaut, sondern von den gastrodermalen Zellen „importiert“ und lebend in die Gastrodermis eingelagert. Hier verweilen sie nun eine unbestimmte Zeit in den Zellen (endocytisch) und treiben Photosynthese.

Der Sinn, der hinter dieser Endocytiose (eine Symbiose, bei der der Symbiosepartner in den Zellen des Wirtsorganismus lebt) steckt, ist relativ einfach: Die Algen produzieren mittels Photosynthese Nahrung, und zwar Zuckeralkohole, Fettsäuren und Aminosäuren. Durch bestimmte Signalstoffe gelingt es der Koralle, die Zooxanthellen zur Abgabe dieser energiereichen Stoffwechselverbindungen (Metabolite) zu bewegen. Als typisches Transportmetabolit dient hier i.d.R. Glycerol, ein Zuckeralkohol, den die Koralle ihrerseits als Nahrung verwerten kann.

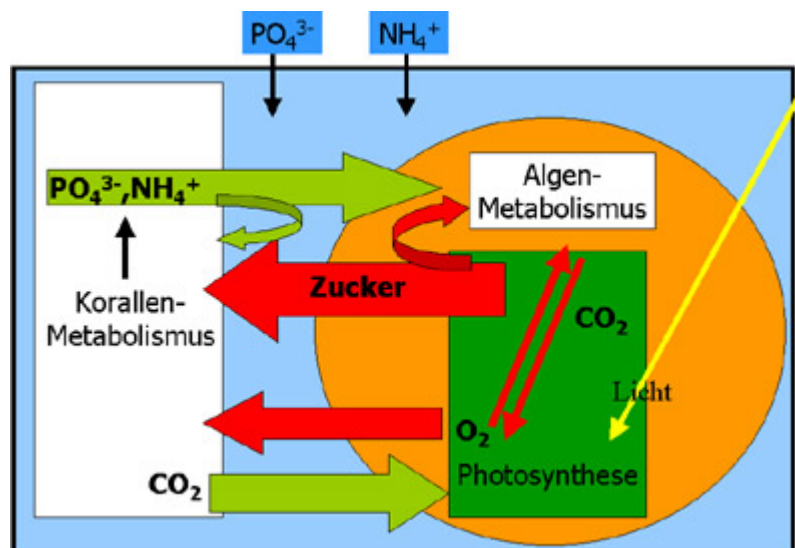


Abbildung 12: Die funktionierende Symbiose zwischen Koralle und Zooxanthellen. Gezeigt ist eine Gastrodermiszelle der Koralle, die eine Zooxanthelle (brauner Kreis) beherbergt. Die Pfeildicke verdeutlicht im Vergleich, wie stark der Stoffaustausch zwischen Koralle und Zooxanthelle ist.

Abbildung 12 verdeutlicht das Symbiosekonzept zwischen der Koralle und ihren symbiontischen Algen, das auf dem Austausch von Stoffwechselendprodukten basiert.

Jeder der beiden Partnerorganismen besitzt einen eigenen Stoffwechsel, der charakteristischerweise Ausgangsstoffe in Endprodukte umwandelt und dabei Energie freisetzt oder „verbraucht“. Die Photosynthese ist ein Stoffwechselweg, der Energie „verbraucht“, denn die absorbierte Strahlungsenergie durch Photosynthesepigmente (z.B. Chlorophyll) wird in den Aufbau von Zuckerverbindungen investiert. Einen solchen aufbauenden Stoffwechselweg nennt man Anabolismus.

Demgegenüber steht der abbauende Stoffwechsel (Katabolismus) der Koralle und Zooxanthellen, bei dem die aufgebauten Zucker wieder in ihre Ausgangsverbindungen (CO<sub>2</sub> und Wasser) zersetzt werden. Die dabei frei werdende Energie kann in Form von chemischen Verbindungen (Adenosintriphosphat, ATP) gespeichert werden.



Bei jedem Katabolismus und Anabolismus gibt es Ausgangs- und Endprodukte. Bei der Photosynthese dienen Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) als Ausgangsverbindungen (Edukte), und als Produkte entstehen Zucker und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ). Bei dem Katabolismus der Koralle und Zooxanthellen werden diese Zucker zusammen mit Sauerstoff erneut in die Produkte  $\text{CO}_2$  und Wasser umgesetzt, also genau rückläufig. Was für den einen Stoffwechselweg Ausgangsverbindung ist, stellt für den anderen Stoffwechselweg das Produkt dar, und umgekehrt.

Bislang haben wir nur über den Kohlenstoff- bzw. Zuckermetabolismus gesprochen. Darüber hinaus gibt es unzählige weitere (und weitaus kompliziertere) Stoffwechselwege, in denen sowohl Stickstoff als auch Phosphor sowie alle anderen Nährelemente vorkommen. Aus diesem Grunde spielen Ammonium und Phosphat ebenfalls wichtige Rollen in der Ernährung der Koralle und Zooxanthellen und sind in Abb. 12 mit einbezogen.

Wie bereits erwähnt geben die Zooxanthellen einen Großteil ihrer Zuckerverbindungen in Form von Glycerol an die Koralle ab. Den Zucker wird die Koralle mit Sauerstoff verbrennen und kann dadurch einen Teil ihres Energiebedarfs abdecken. Eine Koralle muss den Kohlenstoff also nicht zwangsläufig durch das Fressen partikulärer Nahrung erwerben. Als Endprodukte entstehen  $\text{CO}_2$  und Wasser, also genau die Ausgangsverbindungen, die die Algen wieder für die Photosynthese brauchen.

Aus dem Korallenmetabolismus resultieren auch Ammonium und Phosphat, was die Korallen zur Algendüngung bereitstellen können. Im Falle einer schlechten Nährstoffverfügbarkeit für die Algen kann die Koralle ihre Zooxanthellen mit Stickstoff und Phosphor versorgen.

Natürlich können die Algen nicht alle aufgebauten Zucker abgeben, sonst würden sie verhungern. Folglich behalten sie einen Teil für sich und nutzen auch den in der Photosynthese produzierten Sauerstoff dazu, ihre „Brennstoffe“ wieder energiebringend abzubauen.

Aber warum brauchen die symbiontischen Algen nicht alle die von ihnen mühselig aufgebauten Zucker?

Die Koralle erreicht die Abgabe von Zuckern nicht nur über die angesprochenen Signalstoffe. Vielmehr ist sie dazu in der Lage, das Wachstum und die Zellteilung der Algen herabzusetzen, in dem sie die Algen stickstofflimitieren. Wir werden später ausführlicher über Nährstofflimitierungen und u.a. speziell über die Stickstofflimitierung sprechen, aber an dieser Stelle muß bereits etwas vorgegriffen werden.

Stickstoff ist als Nährelement in Aminosäuren vorhanden, und letztere sind wiederum Grundbausteine von Proteinen. Wenn Organismen wachsen, haben sie einen erhöhten Stickstoffbedarf, weil sie neue Proteine aufbauen müssen. In dem die Koralle es schafft, den Algen Stickstoff z.B. in Form von Ammonium vorzuenthalten, verlangsamen die Zooxanthellen ihr Wachstum und ihre Teilungsaktivität. Zwar kann die Koralle die Zellteilung nicht völlig lahmlegen, aber doch zu einem nicht unerheblichen Teil hemmen. Während die Photosynthese der Zooxanthellen im lichtdurchfluteten Korallenriff(aquarium) viel Zucker und damit potentielle chemische Energie produziert, die Algen diese Energie aufgrund des verlangsamten Wachstums aber nicht nutzen, können die Zucker an die Koralle abgegeben werden, ohne dass es den Algen schaden würde. Die Stickstofflimitierung ist also mit ein Grund dafür, warum in den Korallen unter optimalen Bedingungen die Zooxanthellendichte im Gewebe relativ stabil bleibt und es nicht zu einer übermäßigen Vermehrung der Algen kommt.

Das Recycling-Prinzip ist der Schlüssel zum Erfolg. Abgesehen von dem Verständnis, wie Korallen und Zooxanthellen funktionieren, gibt uns das vorgestellte Schema einen wichtigen Hinweis: Die Korallen können ihre Algen ernähren. In dem sie mit ihrem Fangapparat (Tentakel) Plankton fangen und dieses verdauen, setzen sie früher oder später Ammonium und Phosphat frei und können diese den Algen zur Verfügung stellen. Ein wesentlicher Vorteil für die Zooxanthellen, die nun also nicht darauf angewiesen sind, Ammonium, Nitrat

oder Phosphat aus dem Meerwasser aufzunehmen (was das freilebende Phytoplankton muß). Wenn wir also im Aquarium die Korallen füttern, dann versorgen wir auch automatisch die symbiontischen Algen. Ich werde dieses Thema später noch einmal aufgreifen.

Wie reagiert nun die Koralle-Zooxanthellen-Symbiose auf eine Nährstoffhöhung? Sind im Wasser viele anorganische und organische Nährstoffe enthalten, werden die Zooxanthellen im Gewebe der Korallen gedüngt. Ammonium, Nitrat und Phosphat sind Moleküle, die klein genug sind, um passiv in das Korallengewebe eindringen zu können. Die passive Aufnahme erfolgt über die gesamte äußere Oberfläche der Korallen und durch die Aufnahme von Meerwasser über die Mundöffnung.

Eine Düngung der Zooxanthellen resultiert in verstärktem Wachstum und einer verstärkten Vermehrung (Zellteilung) der Zooxanthellen. Wir erinnern uns an die Stickstofflimitierung der symbiontischen Algen durch die Koralle. Ich sprach dabei von optimalen Bedingungen, bei denen die Koralle dies kann. Eine Nährstoffhöhung verschlechtert dabei die Bedingungen.

In dem Ammonium, Nitrat und Phosphat ins Korallengewebe einsickern, wird das Wachstum und die Zellteilung der Zooxanthellen angeregt, was zu einer Verschiebung des Energiebedarfs innerhalb der Koralle – Zooxanthellen – Symbiose und damit zu einer disharmonischen Symbiose führt.

Wachstum und Zellteilung bedeuten einen höheren Energiebedarf. Das wiederum heißt, dass die Algen die in der Photosynthese synthetisierten Zucker selbst mit Sauerstoff verbrennen müssen und nicht an die Koralle abgeben können.

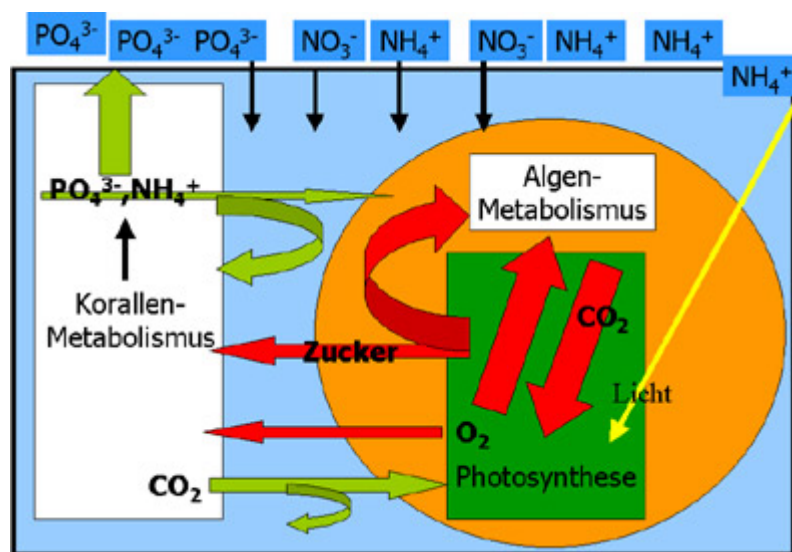


Abbildung 13: Die disharmonische Symbiose. Gezeigt ist eine Gastrodermiszelle der Koralle, die eine Zooxanthelle (brauner Kreis) beherbergt. Die Pfeildicke verdeutlicht im Vergleich, wie stark der Stoffaustausch zwischen Koralle und Zooxanthelle ist.

Abbildung 13 zeigt die disharmonische Symbiose. Im Vergleich mit Abbildung 12 fällt anhand der Veränderung in der Dicke der Pfeile auf, dass der Zuckertransport von den Algen hin zu der Koralle stark vermindert ist. Wo in der funktionierenden Symbiose die Algen ihre Koralle miternähren, wird die Koralle hier mit der Situation konfrontiert, dass sie bezüglich der Kohlenstoffquelle (Zucker) nicht auf ihre Zooxanthellen zurückgreifen kann.

Welche Konsequenz eine Disharmonie in der Symbiose haben kann, soll folgende Beobachtung im Aquarium verdeutlichen:

Aufgrund eines langsam aber sicher stärker werdenden Fadenalgenwachstums in ihrem Riffaquarium werden Sie stutzig und kontrollieren Ihren Nitrat und Phosphatgehalt. Sie

werden wahrscheinlich feststellen, dass die Werte gegenüber vorherigen Messungen deutlich angestiegen sind. Ohnehin ist Ihnen aufgefallen, dass Ihre Korallen in letzter Zeit nicht mehr so gut wachsen, die ehemals weißen Wachstumsspitzen nun mittlerweile alle die gleiche braune Farbe wie das übrige Korallengewebe angenommen haben und die bunten Farben mehr oder weniger verschwunden sind.

Ursache für dieses Problem ist, dass Ihre Korallen weniger Kohlenstoff von ihren Zooxanthellen erhalten, also schlicht und einfach hungern. Die Zooxanthellen haben sich durch die Nährstoffhöhung stark vermehrt und dabei mehr Energie verbraucht. Gleichzeitig findet die Koralle nur unzureichend Nahrung in Form von Plankton oder nährstoffbeladenen Sedimenten. Das zu stagnieren beginnende Korallenwachstum reduziert gleichzeitig auch die Fähigkeit der Korallen, sich gegenüber Fadenalgen zu behaupten. Sie unterliegen im Konkurrenzkampf, womit den Fadenalgen Raum und Nährstoffe zur Verfügung stehen, um sich im gesamten Aquarium auszubreiten.

Die geschilderte Beobachtung ist sehr häufig, muß aber nicht zwangsläufig der Fall sein. Wenn die Korallen im Zuge einer disharmonischen Symbiose zu hungern beginnen, müssen sie als tierische Organismen selbst für ihre Ernährung sorgen. Dazu benötigen sie partikuläre Nahrung die sie fangen können, also z.B. Plankton. Finden sie solche Nährstoffquellen in ausreichender Menge, dann können sie genau so weiter wachsen wie bisher. Zwar wird auch hier die Zooxanthellenvermehrung eine Verdunklung des Korallengewebes und damit einhergehend u.U. auch ein Rückgang in der Farbigkeit verursachen, aber die Korallen können weiter wachsen, zeigen weiterhin Wachstumsspitzen, und bis auf ein vernachlässigbares Wachstum von Fadenalgen werden sie nur schwer Anhaltspunkte für eine Erhöhung ihrer Nährstoffgehalte im Aquarienwasser finden. Es gibt auch genügend Fälle, in denen selbst die Farbigkeit unter solchen Bedingungen erhalten bleibt oder sogar zunimmt. Sie messen ihren Nitrat- und Phosphatgehalt also nicht sofort, sondern erst in einigen Wochen oder Monaten, wenn Sie mal wieder Zeit dafür haben.

## Phosphat als Skelettgift

Eine besondere Eigenschaft kommt dem Phosphat-Anion zu, das wir als gelösten anorganischen Nährstoff im Aquarienwasser messen können. Wie im Rahmen der Besprechung des Phosphorkreislaufs geschildert wurde, ist Phosphat z.B. mit Calcium fällbar. Die gleiche chemische Fällungsreaktion kann auch bei der Kalkskelettbildung (Calcifizierung) in Steinkorallen stattfinden. Hier werden am Ort der Calcifizierung Calciumionen mit Carbonationen zu Calciumcarbonat (Kalk, in Form von Aragonit) ausgefällt. Wenn Phosphat aus dem Meerwasser durch eine passive Aufnahme in das Korallengewebe einsickert und bis zum Ort der Calcifizierung vordringt, ist die Wahrscheinlichkeit gegeben, dass Anstelle eines Carbonat-Anions ein Phosphat-Anion mit Calcium ausgefällt wird. Im Gegensatz zu Kalkkristallen zeigen Calciumphosphatkristalle eine andere Kristallstruktur. Entsprechend paßt ein Calciumphosphatkristall nicht optimal in die Kristallstruktur von Aragonit (siehe Abb. 14). Die Folge davon kann sein, dass das Kalkskelett bei einer vermehrten Einlagerung von Calciumphosphaten brüchiger wird. Durch die nicht optimale Paßform der Calciumphosphatkristalle entstehen kleine Lücken im Kristallgitter, was man durch die Bestimmung der Skelettdichte messen kann. Darüber hinaus kann durch die räumlichen Veränderungen im Kalkskelett der weitere Aufbau des Skelettes gestört werden, so daß Steinkorallen langsamer wachsen oder ihr Wachstum sogar einstellen.

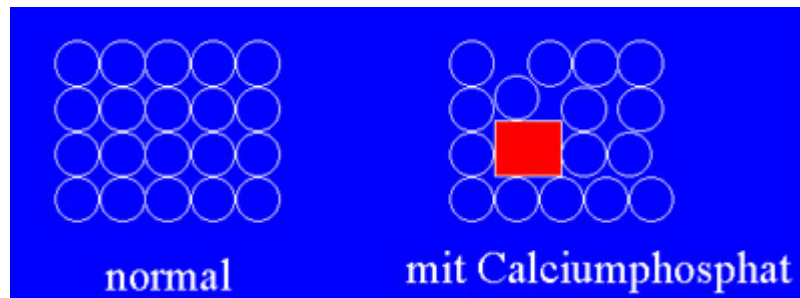


Abbildung 14: Einlagerung von Calciumphosphaten wirkt sich negativ auf die Skelettstruktur von Steinkorallen aus.

Mit diesem Hintergrund erklärt sich die Gefahr von erhöhten Phosphatgehalten in Bezug auf die Haltung von Steinkorallen. Erfahrungsgemäß wird für die Steinkorallenhaltung ein Phosphatgehalt  $< 0,1$  mg/L empfohlen.

Die Abbildungen 15 und 16 verdeutlichen den Effekt von erhöhten Nährstoffgehalten auf die Zooxanthellendichte. Allerdings ist hier Vorsicht geboten, denn auch die Strahlungsintensität nimmt maßgeblich Einfluß auf die Zahl der Zooxanthellen im Gewebe der Korallen. Je dunkler eine Koralle plaziert ist, desto höher ist die Zooxanthellendichte. In einem solchen Falle wird die Koralle ihre Zooxanthellen verstärkt düngen, damit sich die Algen zu teilen beginnen. Die Anzahl der Algenzellen im Gewebe steigt entsprechend kurzzeitig an, bis die „gewünschte“ Zooxanthellendichte erreicht ist. Dadurch soll gewährleistet werden, dass ein Maximum an Photonen (energiereiche Teilchen der Sonnenstrahlung) von den Zooxanthellen absorbiert wird und keine Strahlung verloren geht.

Erst bei einer hohen Strahlungsintensität wird die Zooxanthellendichte herabgesetzt. Hierbei geht es darum, dass bei hohen Strahlungsintensitäten bereits eine geringe Zahl an Zooxanthellen die gleiche „Leistung“ erbringen kann, wie bei niedrigen Strahlungsintensitäten, weil pro Zeiteinheit mehr Strahlungsenergie absorbiert werden kann.



Abbildung 15: Braunes Korallengewebe bedeutet eine hohe Zooxanthellendichte, die durch einen höheren Gehalt an gelösten Nährstoffen oder durch eine geringe Strahlungsintensität hervorgerufen wird. Foto: Jörg Kokott

Die Farbigkeit von Korallen hat nichts mit den Zooxanthellen zu tun. Die Zooxanthellen bestimmen nur die braune Grundfärbung des Gewebes, wohingegen blaue, rote, grüne und andere Farben auf sog. Chromoproteine (farbige Eiweiße) zurückzuführen sind, die von den Korallen selbst aufgebaut (synthetisiert) werden.

Für die Proteinsynthese muß eine Koralle Energie aufwenden. Hat sie diese Energie nicht zur Verfügung, wird sie auch nicht farbig werden. Zu viele wichtigere Stoffwechselprozesse

müssen in Gang gehalten werden, als dass „Luxusgüter“ wie farbige Proteine hergestellt werden könnten. Der Zusammenhang zwischen Ernährungszustand und Farbigkeit ist also eindeutig: kein Geld, kein Porsche!

Nur zu oft werben Hersteller nährstoffsenkender Filtertechniken oder Filtermedien damit, daß unter nährstoffarmen Bedingungen die tollen Farben von Korallen erhalten und neu ausgebildet werden können – eine völlig falsche Annahme.



Abbildung 16: Je niedriger die Zooxanthellendichte, desto heller wird das Korallengewebe. Bei dieser Koralle läßt sich die geringe Zooxanthellendichte auf einen sehr niedrigen Gehalt an gelösten Nährstoffen zurückführen. Foto: Michael Mrutzek

Primär ist die Beleuchtung für die Farbigkeit verantwortlich, vorausgesetzt, dass die Korallen gut genährt sind. Bestimmte spektrale Bestandteile des Lichtes setzen die Produktion von Chromoproteinen in Gang. Auch die Beobachtung, dass bestimmte Spurenelemente die Farbigkeit fördern können, hat nichts mit der primären Induktion der Synthese zu tun. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Produktion von Chromoproteinen über Stoffwechselwege der Koralle abläuft, in denen Spurenelemente als Bestandteile von Enzymen vorkommen, ohne die der Organismus die Farbproteine nicht synthetisieren kann. Wenn also durch eine Spurenelementdosierung die Farbigkeit gesteigert werden kann, dann ist das lediglich ein Hinweis darauf, dass sehr wahrscheinlich ein Spurenelementmangel bestand. Ein solcher führt dazu, dass die Farbproteine nicht so produziert werden können, wie es eigentlich sein sollte.

Dies erklärt auch die Beobachtung, dass in vielen Aquarien durch die Dosierung von Spurenelementen keine Steigerung in der Farbintensität erreicht werden kann. Wenn Spurenelemente ausreichend vorhanden sind, wird die Koralle nicht mehr Chromoproteine synthetisieren. Spurenelemente als Mikronährstoffe sind also nur dann für die Färbung förderlich, wenn sie für die Korallen im Aquariensystem nicht ausreichend verfügbar waren.

Das einzige was bei niedrigen Nährstoffgehalten passiert ist, dass die Zooxanthellendichte im Korallengewebe abnimmt und das Gewebe dadurch durchsichtiger wird. Bestehende Farben kommen dadurch besser zur Geltung. Je höher die Zooxanthellendichte, desto stärker werden die Farben von den braunen Zooxanthellen überlagert.

## Nährstoffgehalte und die Effekte auf Korallen – Zusammenfassung

- Bei der funktionierenden Symbiose können die Algen ihre Koralle mit Nahrung versorgen.

- Wird die Symbiose disharmonisch, verbrauchen die Algen ihre eigene Nahrung selbst, wobei die Koralle nicht mehr auf diese Nährstoffquelle zurückgreifen kann
- Wenn die Korallen im Falle einer disharmonischen Symbiose keine Nahrung fangen und verwerten können, wird sich das Korallenwachstum verlangsamen und ggf. stagnieren.
- Sind im Aquarium genügend partikuläre Nährstoffe (z.B. Plankton) vorhanden, wird die Koralle diese Nährstoffquelle nutzen und trotz einer disharmonischen Symbiose weiter wachsen.
- In der funktionierenden Symbiose werden die Zooxanthellen von der Koralle stickstofflimitiert. Der Stickstoffmangel führt dazu, dass die Algen ihr Wachstum und ihre Zellteilung stark verlangsamen und damit den durch die Photosynthese erzielten „Energieüberschuß“ an die Koralle abgeben können.
- Je höher der Gehalt an gelösten Nährstoffen im Aquarium, desto stärker werden die Zooxanthellen gedüngt, was sich in einem Anstieg der Zooxanthellen und damit einhergehend einer Intensivierung in der braunen Grundfarbe äußert.
- Vor allem die Stickstoffdüngung führt zu einer starken Vermehrung der Zooxanthellen.
- Bei niedrigen Nährstoffgehalten ist die Zooxanthellendichte i.d.R. geringer, so daß sich das Korallengewebe aufhellt.
- Phosphat ist ein „Skelettgift“, das mit Calcium ausgefällt und in die Kalkstruktur eingelagert werden kann. Durch die unterschiedliche Kristallstruktur verändert ausgefalltes Calciumphosphat die Skelettstruktur, was zu verlangsamtetem Wachstum und/oder zu einer Verringerung der Skelettdichte (Skelett wird brüchig) führen kann.
- Die Farbigkeit von Korallen läßt sich auf farbige Proteine (Chromoproteine) zurückführen, die von der Koralle synthetisiert werden.
- Die Bildung von farbigen Proteinen hängt primär von den Beleuchtungsparametern und vom Ernährungszustand der Korallen ab. Je besser der Ernährungszustand, desto wahrscheinlicher ist die Produktion von Chromoproteinen, vorausgesetzt die Proteinsynthese wird durch eine optimale Beleuchtung induziert.
- Mit abnehmender Zooxanthellendichte (z.B. unter niedrigen Nährstoffgehalten) kommen die Farben von Korallen besser zur Geltung.
- Je höher die Zooxanthellendichte, desto eher werden die Farben von den Zooxanthellen verdeckt.

## Gefahren beim Betrieb von nährstoffarmen und nährstoffreichen Riffaquarien

Wir bräuchten über Nährstoffgehalte nicht zu diskutieren, wenn sie uns in der Riffaquaristik keine Probleme bereiten würden. Wie bereits bildhaft erläutert wurde, existieren Beispiele für gut und schlecht funktionierende Aquarien, unabhängig davon, ob sie nährstoffarm oder nährstoffreich betrieben werden. Eigentlich ist dies ein Widerspruch zum vorherigen Satz, denn wenn der Erfolg in der Riffaquarienpflege nicht vom Nährstoffgehalt abhängig ist, wovon ist er dann abhängig?

In diesem Kapitel wird erläutert, warum beide Varianten – nährstoffarm und nährstoffreich - funktionieren und auch nicht funktionieren kann. Darüber hinaus werden wir uns mit Nährstofflimitierungen als eine der größten Gefahren beim Betrieb von Riffaquarien befassen. Nicht selten kommt es vor, dass man ein bestehendes Aquariensystem mit neuer Filtertechnik bestückt oder bisher nicht verwendete Filtermedien einsetzt, um die Nährstoffgehalte zu beeinflussen. Dabei ist dem zeitlichen Aspekt bei der Veränderung von Nährstoffgehalten unbedingt Beachtung zu schenken, damit Probleme und sogar Verluste von Aquarientieren vermieden werden können.

## Warum funktioniert beides oder beides auch nicht?

Im letzten Kapitel wurde recht ausführlich beschrieben wie Korallen funktionieren und welche Effekte Nährstoffanreicherungen bzw. Nährstoffsenkungen auf die Korallen und Zooxanthellen haben können.

Es ist nun also ein guter Zeitpunkt, um zu der Frage zurückzukehren, weshalb sowohl nährstoffangereichertes Wasser als auch nährstoffarmes Wasser eine optimale Pflege von Algen und Korallen erlaubt, bzw. warum beide Bedingungen auch zu Problemen führen können?

Hier die Antwort:

Sind alle lebensnotwendigen Nährelemente verfügbar, dann ist die Nährstoffversorgung unabhängig von der **Nährelementkonzentration** und der **Nährstoffquelle**.

In diesem Zusammenhang bedeutet „verfügbar“, dass die Korallen die Nährelemente aufnehmen und verwerten können.

Dazu ein Beispiel:

Gegeben sei eine faustgroße *Acropora millepora* Kolonie, die täglich 5 mg Stickstoff aufnehmen muß, um gleichbleibend schnell wachsen zu können. Dieser Koralle ist es dabei egal, ob sie die 5 mg Stickstoff täglich gerade so erhält (also pro Tag 5 mg Stickstoff im Aquariensystem vorhanden sind), oder ob neben diesen 5 mg noch weitere 45 mg (also insgesamt 50 mg Stickstoff) vorhanden sind. Hauptsache ist, dass sie täglich 5 mg N aufnehmen und verwerten kann. Das bedeutet unabhängig von der Nährelementkonzentration.

Darüber hinaus spielt es für die Koralle auch keine Rolle, ob sie die 5 mg N täglich über die Aufnahme von Ammonium, Nitrat oder durch das Fressen von Plankton bekommt. Das bedeutet unabhängig von der Nährstoffquelle.

Für uns ist es also wichtig zu verstehen, dass egal in welchem Aquariensystem die Korallen das bekommen, was sie benötigen. Wie wir im Vergleich mit dem Great Barrier Riff gesehen haben, spielen Nitrat und Phosphat als Nährstoffquellen eher eine untergeordnete Rolle. Ein für uns anhand des Nitrat- und Phosphatgehaltes beurteiltem nährstoffarmen Aquarium, in dem aber ausreichend Plankton (was wir nicht messen können) vorhanden ist, dann kann hier die Stickstoff und Phosphorverfügbarkeit absolut ausreichend sein. Ein solches nährstoffarmes Aquarium kann also prinzipiell dann funktionieren, wenn andere Nährstoffquellen außer Nitrat und Phosphat vorhanden sind.

Gleiches gilt für die anhand des Nitrat- und Phosphatgehaltes beurteilten nährstoffreichen Aquarien. Auch hier müssen alle Nährstoffe verfügbar sein, damit die gepflegten Organismen wachsen können.

Die Verfügbarkeit von Nährstoffen ist stets der Grund dafür, dass es sowohl bei nährstoffreichen als auch nährstoffarmen Aquarien zu Problemen kommen kann. Dabei sind folgende Punkte als Ursachen dafür in Betracht zu ziehen, dass beides auch nicht funktionieren kann.

1) Bestimmte Nährstoffe sind definitiv nicht vorhanden

Für diesen Punkt gibt es ein Paradebeispiel: Eisen.

Das Element Eisen ist neben Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor mit das bedeutendste Nährelement für Organismen. Es ist Bestandteil vieler wichtiger Enzyme, ohne die ein Organismus nicht überleben kann. Eisen ist in Meerwasser sehr schlecht verfügbar, weil es äußerst schnell zu unlöslichen Eisenhydroxiden bzw. mit Phosphat zu unlöslichem

Eisenphosphat ausfällt. Dazu kommt, dass wir Eisen nicht zuverlässig in Meerwasser messen können.

Ein bestehender Eisenmangel ist mit die häufigste Ursache für schlechtes Algen und Korallenwachstum in Riffaquarien. Fast alle Probleme mit erhöhten Phosphatgehalten sind nicht auf das Phosphat selbst zurückzuführen, sondern darauf, dass Eisen mit Phosphat ausfällt und somit aus dem Meerwasser eliminiert wird. Ein Eisenmangel ist dabei also das primäre Problem, das durch einen erhöhten Phosphatgehalt hervorgerufen wird.

In einem solchen Fall wird selbst das mit geeigneten Spurenelementlösungen nachdosierte anorganische Eisen (z.B. als Eisenchlorid oder Eisensulfat) schneller wieder ausgefällt, als dass es von den Organismen genutzt werden könnte.

Geeigneter sind hier organische Eisenverbindungen, die wir z.B. in Form von Eisencitrat zugeben können. Auch entsteht organisch verfügbares Eisen direkt im Aquarium aus dem Abbau von Biomasse (z.B. abgestorbene Algen) welches anteilmäßig auch in Lösung gehen kann. Darüber hinaus ist Phytoplankton eine gute Eisenquelle. Auf die Rolle von Phytoplankton für die Makro- und Mikronährstoffergänzung im Aquarium wird später ausführlicher eingegangen.

Aber auch Phosphor oder Nitrat sind potentiell in „zu gut“ funktionierenden Aquarien- bzw. Filtersystemen Mangelware, wenngleich dies eher selten ist.

## 2) Bestimmte Nährstoffe sind vorhanden, aber nicht verfügbar

Als Beispiel sei der elementare Stickstoff ( $N_2$ ) angeführt, der sich über die Luft ständig im Aquarium anreichert. Wie bereits dargestellt wurde, ist Stickstoff in Form von elementarem Stickstoff immer im Aquarium vorhanden, aber es kann von Algen und Korallen nicht genutzt werden. Nur von den stickstofffixierenden Cyanobakterien ist es verwertbar. Es reicht nicht aus, dass ein Nährelement im Aquariensystem vorhanden ist, sondern es muß in geeigneter (verfügbarer) Form vorliegen.

Auch sollten wir uns an das Schnittmengen-Schema erinnern, in dem gezeigt wurde, dass Algen und Bakterien ausschließlich der Korallen gebundene Nährstoffe wie Calciumphosphate aufschliessen können. Wäre im Aquarium weder gelöster noch suspendierter partikulärer Phosphor, aber in den Lebenden Steinen gebundene Calciumphosphatdepots vorhanden, würden Fadenalgen ohne Weiteres überleben können. Korallen hätte jedoch keine Möglichkeit diese Phosphatdepots aufzuschliessen und würden rasch an einer Phosphorlimitierung absterben.

## 3) Das Verhältnis zwischen bestimmten Nährstoffen ist nicht optimal

Bis jetzt blieb es unerwähnt, dass die Verfügbarkeit von Nährstoffen nicht nur von dem Gehalt des jeweiligen Nährelements abhängt, sondern auch die Verteilung aller Nährelemente eine wichtige Rolle spielt. Oft herrschen in unseren Riffaquarium unausgewogene Nährstoffverhältnisse, die sich zum Beispiel in hohen Nitrat- aber geringen Phosphatgehalten darstellen. Während wir mit aquaristisch erhältlichen Phosphatadsorbentien das Phosphat-Anion schnell binden und aus dem Aquariensystem entfernen können, bedarf es einer langfristigen Förderung der Denitrifikation, damit hohe Nitratkonzentrationen auf ein niedrigeres Level gebracht werden können. Die Folge dabei ist ein schneller Entzug von Phosphat, dem ein langsamer Abbau von Nitrat gegenüber steht.

Das Verhältnis zwischen Stickstoff und Phosphor kann in verschiedenen Aquarien in Abhängigkeit von den eingesetzten Filtermedien und Filtertechniken sehr unterschiedlich sein.



Im Weiteren wird explizit und ausführlich darüber diskutiert, welche Nährstoffverhältnisse im Aquarium optimal und welche nicht optimal sind.

## Nährstofflimitierungen

Nährstofflimitierungen sind häufige Verursacher von Problemen beim Betrieb von Riffaquarien. Dabei ist den meisten Aquarianern nicht klar, was eine solche Limitierung überhaupt ist und mit welchen Konsequenzen der Pfleger dabei rechnen muß.

Wenn eines der lebensnotwendigen Nährelemente nicht oder nur unzureichend verfügbar ist, dann bezeichnet man dieses Nährelement als wachstumslimitierend. Nährstofflimitierungen sind in vielen Fällen auf ein nicht optimales Verhältnis zwischen den verschiedenen essentiellen Nährelementen zurückzuführen. Jedes Nährelement erfüllt bestimmte Aufgaben im Organismus, entweder als Bestandteil eines größeren Moleküls (z.B. Protein) oder einer Struktur (z.B. Silicium als Bestandteil des Kieselsäurepanzers von Kieselalgen). Der komplex aufgebaute und funktionierende Organismus kann i.d.R. auf keines seiner essentiellen Nährelemente verzichten, ohne dabei selbst Schaden zu nehmen oder zumindest in der Lebensqualität eingeschränkt zu sein.

Wann ein Nährelement wachstumslimitierend wird hängt davon ab, wieviel ein Organismus im Verhältnis zu anderen Nährelementen davon benötigt. Am einfachsten läßt sich dies mit dem sog. Redfield-Verhältnis erklären.

Das Redfield-Verhältnis geht auf den Forscher Redfield zurück, der den Gehalt von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor in marinem Phytoplanktonarten gemessen und daraus Rückschlüsse auf deren Nährelementbedarf geschlossen hat.

In der Trockenmasse (nachdem alles Wasser aus den Organismen entzogen wurde) konnte Redfield folgendes Verhältnis zwischen Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Phosphor (P) messen:

106 C : 16 N : 1 P.

Pro 1 Phosphoratom muß marines Phytoplankton 16 Stickstoffatome und 106 Kohlenstoffatome aufnehmen und verwerten, damit der Bedarf all dieser Nährelemente abgedeckt ist. Idealerweise müssten Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor im gleichen Verhältnis im Meerwasser vorhanden sein, damit eine optimale Aufnahme ermöglicht ist.

Die gleiche Messung wurde auch für marine Makroalgen (mehrzellige Algen wie z.B. *Caulerpa* oder Fadenalgen der Gattung *Derbesia*) durchgeführt, wobei sich das Verhältnis C : N : P wie folgt darstellt:

550 C : 30 N : 1 P.

In Bezug auf die Haltung und Vermehrung von Makroalgen in Riffaquarien und in Algenrefugien, oder wie im Falle von akuten Fadenalgenproblemen müßten wir das Verhältnis 30 N : 1 P anwenden.

Aber auch das Verhältnis 16 N : 1 P ist für uns anwendbar. Zunächst sei hier die Zucht von Phytoplankton angesprochen, bei der idealerweise ein solches Verhältnis zwischen den Nährelementen Stickstoff und Phosphor vorliegen würde.

Darüber hinaus sind aber auch die Zooxanthellen der symbiontischen Korallen marine Phytoplanktonorganismen, die jedoch nicht freilebend sind. Von daher würden wir bei der Diskussion um symbiontische Korallen das Verhältnis 16 N : 1 P als optimal ansehen.

Ganz so einfach ist es aber nicht. Wie ausführlich beschrieben wurde nimmt die Koralle unmittelbar Einfluß auf die Stickstoff- und Phosphorverfügbarkeit für die Zooxanthellen. Die

Gastrodermiszellen in der Koralle stellen ein eigenes Mikromilieu dar, was nicht mit dem externen Meerwasser vergleichbar ist. Zwar könnten wir versuchen, das Verhältnis von 16 N : 1 P im Aquarienwasser einzustellen, aber es würde uns wahrscheinlich wenig nützen. Wenn wir darüber hinaus die Koralle mit partikulärer Nahrung füttern, dann setzt die Koralle in den Zellen Stickstoff und Phosphor frei, so daß hier unabhängig vom umgebenden Meerwasser eine weitere Nährstoffquelle vorliegt, die wir dabei berücksichtigen müßten.

In der Regel wird der Kohlenstoff vernachlässigt, weil der CO<sub>2</sub>-Eintrag von der Luft ins Wasser ausreichend ist, um den Bedarf für die Algen zu decken. Wir erinnern uns, dass CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle in der Photosynthese Ausgangssubstanz für die später aufgebauten Zucker ist. Zwar kann ein CO<sub>2</sub>-Mangel vor allem bei dem Betrieb von Algenrefugien, die 24 Stunden beleuchtet werden auftreten, aber allgemein kann man den Kohlenstoffgehalt in den meisten Riffaquarien ebenfalls vernachlässigen.

Wenden wir uns also dem Verhältnis von Stickstoff zu Phosphor zu. Wenn wir mittels Phosphatadsorbern Phosphor aus dem Wasser entfernen, der Nitratgehalt aber gleich hoch bleibt, dann sollte es nicht verwundern, wenn sich das Verhältnis N : P von idealerweise 16 : 1 auf z. B. 20 : 1 verschiebt. Das bedeutet, dass in Relation zu Stickstoff zu wenig Phosphor vorhanden ist, was potentiell einer Phosphorlimitierung gleich kommt.

Wenn andererseits der Phosphatgehalt im Aquariumwasser durch eine erfolgte Futterumstellung (z. B. von Flockenfutter auf Frostfutter) erhöht wird, der Nitratgehalt aber gleich bleibt, dann kann sich N : P auf 10 : 1 verändern und potentiell zu einer Stickstofflimitierung führen.

Soweit zum Verständnis. In wie fern das Redfield-Verhältnis für uns Aquarianer nützlich ist oder nicht, hängt ganz entscheidend davon ab, was wir messen können. Das Thema Messung von Nährstoffgehalten wurde bereits eingehend behandelt. Es ist uns klar geworden, dass wir mit der Messung von Ammonium, Nitrit, Nitrat und Phosphat nicht den Gesamtstickstoff- und Gesamtphosphorgehalt im Aquarium erfassen können. Da das Redfield-Verhältnis von den total messbaren Nährelementgehalten ausgeht, wir aber i.d.R. nur Nitrat und Phosphat messen, ist die Anwendung des Redfield-Verhältnisses für uns nicht möglich.

In der Vergangenheit ist von einigen Aquarianern das Verhältnis zwischen Nitrat und Phosphat als relevant angesehen worden, was aber ein großer Fehler ist. Erstens wurde dabei nicht berechnet, wieviel Stickstoff in Nitrat und wieviel Phosphor in Phosphat enthalten ist, und darüber hinaus wurden die organischen Stickstoff- und Phosphorverbindungen völlig außer Acht gelassen. Letztere spielen aber mit Sicherheit eine wichtige Rolle in der Ernährung von Algen und Korallen, auch wenn wir sie nicht messen können.

Hier eine Beispielrechnung:

Im Aquarienwasser werden 10 mg/L Nitrat und 0,1 mg/L Phosphat gemessen. Bei der direkten Berechnung des Verhältnis zwischen den Nährstoffen Nitrat : Phosphat würde 100 : 1 resultieren. Da aber in 10 mg Nitrat 2,26 mg Stickstoff und in 0,1 mg Phosphat 0,033 mg Phosphor enthalten ist, ergibt sich ein Verhältnis der Nährelemente N : P von 22,6 : 1. Beachtet man dies nicht und berechnet das Verhältnis von Nitrat : Phosphat, dann hat das nichts mit den von Redfield gemessenen Nährelementgehalten zu tun.

Angenommen im gleichen Aquarienwasser wären neben den 2,26 mg/L Nitrat-Stickstoff auch noch 3 mg/L Stickstoff in Aminosäuren und neben den 0,033 mg/L Phosphat-Phosphor noch 1 mg/L Phosphor aus organischen Phosphorverbindungen enthalten, dann wäre das reale Verhältnis nicht 22,6 : 1 sondern nur 5,1 : 1.

Wie gesagt können wir weder Aminosäuren noch organische Phosphorverbindungen messen, und entsprechend entzieht sich das reale Stickstoff zu Phosphor Verhältnis unseres

Wissens. Würde man bei N : P von 22,6 : 1 von einer leichten Phosphorlimitierung ausgehen, man aber real mit N : P von 5,1 : 1 eine starke Stickstofflimitierung im Aquariensystem hätte, dann zeigt sich darin das Risiko in der falschen Anwendung des Redfield-Verhältnisses für die Aquaristik.

Das Redfield-Verhältnis ist also aquaristisch nicht anwendbar, es sei denn, man gibt eine Laboranalyse des Gesamtstickstoff- und Gesamtphosphorgehaltes im Aquarienwasser in Auftrag und berechnet das Redfield-Verhältnis auf Basis der ermittelten Ergebnisse. Zwar ist eine solche Analyse sehr kostenaufwendig, aber im Falle von Problemaquarien mit beginnendem Korallensterben, das möglicherweise auf ein Ungleichgewicht im Nährstoffhaushalt zurückzuführen ist, fallen solche Kosten weitaus geringer aus als jene für die Neueinschaffung eines gesamten Steinkorallenbesatzes in einem 500 Liter Aquarium.

## Symptomatik einer Nährstofflimitierung

Wenn Aquarianer von schlechtem Algen- und Korallenwachstum berichten, diagnostizieren sie damit ohne es zu wissen eine Nährstofflimitierung. Wie es bereits bei der Besprechung des Redfield-Verhältnisses erläutert wurde, sind Stickstoff und Phosphor neben Kohlenstoff die wichtigsten Nährelemente für Organismen. Auch wurde auf eine durch hohe Phosphatgehalte induzierte Eisenlimitierung eingegangen.

Es ist also wichtig zu wissen, wie sich Nährstofflimitierungen äußern und welche Symptome v.a. Korallen zeigen, wenn sie nährstofflimitiert sind. Das rechtzeitige Erkennen von Nährstofflimitierungen gibt uns die Möglichkeit, gezieht und sicher in das Aquariensystem einzugreifen um die Lebensbedingungen für Algen und Korallen zu verbessern.

### Stickstofflimitierung

Stickstofflimitierungen sind in Riffaquarien sehr häufig. Wenn Korallen schlecht stehen, kaum Polypen zeigen, Steinkorallen ihr Skelettwachstum einstellen und sich weiße Wachstumsspitzen braun färben, und auch andere Algen wie *Caulerpa* nicht mehr richtig wachsen wollen, dann sind dies Anzeichen für eine Stickstofflimitierung. Extreme N-Limitierungen können auch zum Ausbleichen des Korallengewebes führen, allerdings ist dies eher selten.

Charakteristischerweise ist eine N-Limitierung für Korallen i.d.R. nicht lethal (tödlich), lediglich das Wachstum und das Polypenbild verschlechtert sich drastisch.

### Phosphorlimitierung

Im Gegensatz zur Stickstofflimitierung äußert sich eine P-Limitierung in akutem Korallenbleichen (siehe Abb. 17) einhergehend mit schnell absterbendem Korallengewebe. Allerdings erfolgt das Absterben des Gewebes nicht krankhaft nekrotisch (wie man es von diversen Korallenkrankheiten wie Rapid Tissue Necrosis, RTN her kennt), sondern es „verschwindet“ einfach nach und nach, oft von der Basis der Korallenkolonie aus. Es scheint nicht nur, als wenn sich die Koralle selber auffressen würde, sondern für die Korallenkolonie ist es der letzte Ausweg, um durch das Verdauen des eigenen Gewebes noch an Phosphor zu gelangen. Ein weiteres Charakteristikum ist das teilweise gute Polypenbild von akut P-limitierten Steinkorallen. Die Koralle versucht, möglichst viel partikulären Phosphor in Form von Plankton oder Staubfutter zu fangen, kann dabei aber schon völlig ausgebleicht sein (vergl. Abb. 17).



Abb. 17: Hier ist eine akut phosphorlimitierte Steinkoralle aus der Gattung *Montipora* gezeigt. Charakteristischerweise bleichen solche Korallen aus, zeigen dabei aber noch ein relativ gutes Polypenbild. Auffällig am oberen Bildrand ist, dass bereits lila gefärbte Kalkrotalgen begonnen haben, die Koralle durch ihr Wachstum zu bedrängen. Foto: Michael Mrutzek.

In einigen Fällen wurde von befreundeten Aquarianern berichtet, dass phosphorlimitierte Steinkorallen ihre Fähigkeit verlieren, sich gegen hohe Strahlungsintensitäten und UV-Strahlung zu schützen. Gerade nahe der Wasseroberfläche platzierte Steinkorallen können dann regelrecht verbrennen. Hier äußert sich dann die Geweschädigung eher nekrotisch und das Gewebe reißt in Fetzen ab.

Phosphorlimitierungen sind fast immer lethal. Entsprechend können die Verluste bei einer P-Limitierung enorm hoch sein, bedenkt man, dass es innerhalb weniger Tage einen ganzen Steinkorallenbestand in einem 1000 L Becken hinraffen kann. Gott sie Dank sind Phosphorlimitierungen nicht so häufig wie Stickstofflimitierungen. Ich denke aber, dass viele Fälle von akuten Verlusten insbesondere bei Steinkorallen nicht auf Korallenkrankheiten sondern auf akute Phosphorlimitierungen zurückzuführen sind.

### **Eisenlimitierung**

Obwohl im Vortrag nicht explizit darauf eingegangen wurde, möchte ich diesen Fall einer Nährstofflimitierung der Vollständigkeit halber nicht Außen vor lassen. Den meisten Pflanzenliebhabern wird die „Chlorose“ ein Begriff sein, eine Pflanzenkrankheit, die auf eine unzureichende Eisenverfügbarkeit (Eisenlimitierung) zurückzuführen ist.

Eisen (Fe) ist als Metall-Kation in vielen Biokatalystoren („Enzymen“) und weiteren wichtigen Komponenten des Pflanzen- und Tierstoffwechsels beteiligt. Eisenlimitierte Pflanzen haben u.a. die Fähigkeit eingebüßt, die als Photosynthesepigmente bekannten Chlorophylle (grüner Blattfarbstoff) zu produzieren. Eine Chlorose äußert sich also in einem Verlust von grünen Pigmenten in Blättern und grünen Zweigen/Stengeln. Chlorosen gibt es auch bei Wasserpflanzen und Algen.

Möglicherweise haben einige Aquarianer schon einmal Eisen in welcher Form auch immer dem Aquarium zugeführt und dabei beobachtet, dass sich z.B. Algen deutlich stärker grün färben. Dabei wurde also eine bestehende Eisenlimitierung ausgeglichen.

Da in Pflanzen bei einer Eisenlimitierung die Photosynthese stark beeinträchtigt wird, ist es nicht verwunderlich, dass Algen und auch zooxanthellate Korallen schlecht wachsen. Genau

wie bei einer Chlorose in Landpflanzen führt eine langanhaltende Eisenlimitierung zu Kümmerwuchs und schlimmstenfalls auch zum Ausbleichen von Korallen.

Ob eine Fe-Limitierung in Korallen lethal ist, hängt maßgeblich davon ab, in wie fern wir den Korallen brauchbare Eisenverbindungen z.B. bei der Staubfütterung in partikulärer Form bereitstellen. Auch können Algen ausgefällte Eisenhydroxide aus dem Sediment oder den Lebenden Steinen aufschliessen (vgl. Phosphatdepots).

Eisen ist in Meerwasser äußerst schlecht löslich und fällt sehr schnell bei der Reaktion mit Wasser als Eisenhydroxidflocken aus und lagert sich im Boden und den Lebenden Steinen ab. Nicht selten sind auch Fadenalgen- oder Cyanobakterienplagen darauf zurückzuführen, dass neben Phosphat solche ausgefällten Eisenverbindungen zur Verfügung stehen. Eine falsche bzw. übermäßige Dosierung von Eisen-haltigen Spurenelementlösungen fördert die Bildung von Eisendepots in der Dekoration.

Eisen können wir im Meerwasser nicht gut und v.a. nicht ausreichend reproduzierbar messen, auch wenn es angeblich meerwassertaugliche Eisentests gibt. Dies erschwert die Diskussion über das Nährelement Eisen und dessen Bedeutung in der heutigen Meerwasseraquaristik ungemein. Es liegen mir persönlich keine Fälle vor, in denen eine Eisenlimitierung eindeutig diagnostiziert wurde. Auf diesem Gebiet stellt sich uns also ein hoher Aufklärungsbedarf zur Hausaufgabe.

## Behebung von Nährstofflimitierungen

Wie bereits gesagt können wir etwas gegen Nährstofflimitierungen tun, vorausgesetzt, Nährstofflimitierungen werden korrekt diagnostiziert. Hier liegt genau das Problem, v.a. wenn wie beispielhaft gezeigt das Redfield-Verhältnis falsch angewendet wird und dabei absolut falsche Stickstoff : Phosphorverhältnisse berechnet werden.

Für ein Aquariensystem ist es fatal wenn anstatt einer praktisch vorliegenden Stickstofflimitierung eine nicht vorhandene Phosphorlimitierung anhand falscher Datenberechnungen diagnostiziert wird. Damit „fährt man sich das Becken an die Wand“, wenn ich Dr. Jens Kallmeyer in seinem Vortrag zitieren darf.

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten, wie wir Nährstofflimitierungen beheben können:

- 1) Der Gehalt des die Limitierung verursachenden Nährelements wird gesenkt. Wenn z.B. eine Stickstofflimitierung (z.B. Ammonium und Nitrat nicht nachweisbar) vorliegt, weil der Phosphatgehalt bei 0,75 mg/L liegt, dann kann man mit dem Einsatz von Phosphatadsorbern den Phosphatgehalt senken und damit die Limitierung aufheben
- 2) Der Gehalt des limitierenden Nährelements wird angehoben. Gleiches Beispiel: Anstelle Phosphat zu adsorbieren, kann man den Stickstoffgehalt durch die Dosierung einer geeigneten Stickstoffquelle (siehe unten) anheben und dadurch die Stickstofflimitierung aufheben.

Für die im Folgenden behandelten Nährstoffquellen wird im Anhang auch eine Rezeptur und Dosierempfehlung angegeben. In keinem Fall ist es gerechtfertigt, Chemikalien mit einem Löffel ins Aquarium zu geben („Löffelmethode“). Solche Nährlösungen müssen berechnet und für das individuelle Aquarium abgestimmt werden. Dabei rechnet man idealerweise das vorhandene Defizit aus und liefert dem Aquarium genau so viel, wie es benötigt. Da die wenigsten Aquarianer Chemiker sind, habe ich die angesprochenen Rezepturen für bestimmte Nährstofflösungen erstellt. Ich weise darauf hin, dass die Nährelemente in diesen Lösungen nicht hoch konzentriert sind, damit Fehler in der Anwendung nicht als Katastrophe enden.

## Wie behebe ich eine Stickstofflimitierung?

Es bieten sich einige potentiell günstige Stickstoffquellen an:

- 1) **Aminosäurelösungen** – diese gibt es auf dem aquaristischen Markt käuflich zu erwerben. Aminosäuren enthalten Stickstoff und können von Korallen und Algen aufgenommen und verwertet werden (sie sind verfügbar). Dabei sollte man ausgehend von der Dosierempfehlung des jeweiligen Produktes ausgehen und ggf. die Dosierung erhöhen. Die Aminosäuren werden einerseits direkt verwertet, aber auch in Ammonium und über die Nitrifikation weiter zu Nitrat umgebaut. Die Ammonium- und Nitratmessung kann also neben der qualitativen Kontrolle des Polypenbildes und des Korallenwachstums als analytische Kontrolle dienen.
- 2) **Ammoniumchloridlösung ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )** – Im Ammonium-Anion ist der Stickstoff reduziert. Es ist die anorganische Stickstoffform, die sofort von Pflanzen und Tieren in Aminosäuren eingebaut werden kann. Entsprechend ist Ammonium eine sehr günstigste Stickstoffquelle. Allerdings muß man beachten, dass Ammoniumchloridlösungen nicht in der Einfahrphase verwendet werden dürfen. Im ersten Schritt der Nitrifikation wird Ammonium von bestimmten Bakterien in Nitrit umgewandelt (Ammoniumoxidation). Im zweiten Schritt wandeln andere Bakterien das entstandene Nitrit in Nitrat um (Nitritoxidation). Hier ist es wichtig zu wissen, dass die Nitrit-oxidierenden Bakterien (NOB) empfindlich auf Ammonium reagieren und von Ammonium vergiftet werden. Zunächst wird man also abwarten müssen, bis sich genügend Ammonium-oxidierende Bakterien (AOB) angesiedelt haben, die dann das Ammonium zügig in Nitrit umwandeln. Nur dann können sich in einem zweiten sukzessiven Schritt die Nitrit-oxidierenden Bakterien entwickeln. Das ist der Grund dafür, dass in frisch eingerichteten Aquarium in der Regel zunächst ein Nitrit-Peak entsteht (der für zu früh eingesetzte Fische oft den Tod bedeutet), bevor sich dann schlagartig von einem auf den anderen Tag die Nitrit-oxidierenden Bakterien entwickeln und der bislang gemessene Nitritgehalt auf Null geht und gleichzeitig der Nitratgehalt ansteigt.
- 3) **Calciumnitrat ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ )** – Calciumnitrat wird oft als Stickstoffquelle verwendet. Der Vorteil liegt darin, dass man mit dem Calciumnitrat den Steinkorallen und Kalkrotalgen auch Calcium anbieten kann. Nachteil von Nitrat ist, dass im Nitrat der Stickstoff maximal oxidiert ist. Wie gesagt kann nur der maximal reduzierte Stickstoff im Ammonium-Anion direkt in Aminosäuren eingebaut werden. Eine Pflanze, die Nitrat aufnimmt, kann den Stickstoff erst verwerten, wenn sie das Nitrat wieder zu Ammonium reduziert hat. Dies ist ein energieaufwendiger Prozess und es ist meines Erachtens günstiger, direkt Ammoniumchlorid zu dosieren. Calciumnitrat ist darüber hinaus auch nicht leicht z.B. über Apotheken zu beziehen, da man Calciumnitrat zur Sprengstoffherstellung benutzen kann.
- 4) **Staubfuttermittel** – Einige Staubfuttermittel wie z.B. Ultramin (Claude Schuhmacher, Aquaterrashop) enthalten viel Stickstoff in Form von Aminosäuren oder anderen organischen Stickstoffverbindungen. Auch das von Tropic Marin angebotene (Pro Coral Organics) enthält Stickstoff und kann gezieht die Stickstoffverfügbarkeit für Korallen und Algen erhöhen.

## Wie behebe ich eine Phosphorlimitierung?

Eine Phosphorlimitierung ist nicht leicht zu beheben. Darüber hinaus ist es enorm wichtig zu wissen, dass man bei der Verwendung von Phosphatverbindungen sehr viel falsch machen kann, v.a. wenn man eine Phosphorlimitierung falsch diagnostiziert hat. Wer zu viel Phosphat ins Becken schüttet läuft Gefahr seinen gesamten Korallenbestand zu verlieren.

- 1) **„Cyclop Eeze“** - Ist als Staubfuttermittel dafür bekannt, dass es sehr fettreich ist und viel Phosphat in Form von Phospholipiden enthält. Allerdings wird man bei der Fütterung von „Cylop Eeze“ auch den Stickstoffgehalt anheben. Das ist in so fern nachteilig, als dass man eine Phosphorlimitierung, die durch einen zu hohen Nitratgehalt induziert ist, mit der Fütterung dieses Staubfuttermittels sehr wahrscheinlich nicht in den Griff bekommt. Dennoch, wenn zu wenig Phosphat im Becken ist, kann man u.U. mit diesem Futter eine Phosphorlimitierung aufheben.
- 2) **Kalium-dihydrogenphosphat ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )** – Diese anorganische Phosphorverbindung enthält Phosphat und ist in Osmosewasser gut löslich. Achten muß man darauf, dass man das **di**-hydrogenphosphat erwirbt und nicht das **di-Kalium**hydrogenphosphat ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ). Letzteres ist schwer wasserlöslich und daher ungeeignet. Ich rate von der Herstellung dieser Lösungen ab, weil es in meinen Augen zu gefährlich ist. Sehr schnell hat man sich verrechnet oder eine zu große Masse dieser Substanz abgewogen. Fehler mit diese Methode zur Erhöhung des Phosphatgehaltes wird kein Aquariensystem verzeihen, schon gar nicht, wenn es sich um Steinkorallenbecken handelt. Wenn sie keine chemische Ausbildung genossen haben und darüber hinaus keine Laborwaage zur Verfügung haben – FINGER WEG!

## Weitere Methoden

- 1) **Phytoplankton** – Lebendes Phytoplankton sowie Phytoplanktonkonzentrate haben den großen Vorteil, dass hier alle Nährelemente in einer verwertbaren organischen Form enthalten sind. Mit der Dosierung von Phytoplankton können sie einerseits Korallen und andere Filtrierer füttern, andererseits stirbt im Aquarium ein gewisser Anteil der Phytoplanktonorganismen ab und zerfällt in die dann verfügbaren organischen Nährstoffformen wie Aminosäuren, Aminozucker, organische Phosphorverbindungen und in das enorm große Spektrum an Molekülen, die Spurenelemente wie Eisen, Zink oder Mangan enthalten. Mit einer regelmäßigen Phytoplanktondosierung und einem ausreichenden Wasserwechsel können Sie den Spurenelementebedarf des Aquariums vollkommen abdecken. Die Zucht z.B. von *Nanochloropsis* ist mittlerweile relativ einfach, in der aquaristischen Literatur beschrieben und spezielle Phytoplanktonzuchtgeräte gibt es ebenfalls käuflich zu erwerben. Darüber hinaus ist der „Quirbach-Planktonreaktor“ seit langem publiziert (KORALLE Ausgabe 2003). Der Artikel enthält eine Bauanleitung für den Reaktor und liefert darüber hinaus wertvolle Informationen rund um die Phytoplanktonzucht.
- 2) **Ethanol dosierung** – Sehr aktuell ist mit dem Erscheinen des Meerwasseraquarianers 01/2004 die „Mrutzek'sche Ethanol dosierung“ in Form von Wodka. Dabei wird das Wachstum von heterotrophen Bakterien gesteigert und der Nitrat und Phosphatgehalt im Aquarium gleichmäßig und in Abhängigkeit von der Ethanol dosierung gesenkt. Dabei vermehren sich Bakterien so stark, das die oberen Schichten der wachsenden Biofilme abreißen und dabei Bakterien in die freie Wassersäule übergehen und Bakterioplankton bilden. Diese Bakterienflocken sind einerseits sehr gut über die Abschäumung zu entfernen, andererseits ist es ein hervorragendes Futter für Korallen und Filtrierer. In relativ kurzer Zeit kann man mit der Wodka-Dosierung effektiv Nitrat und Phosphat im Wasser eliminieren und gleichzeitig die Korallen mit Bakterien ernähren. Es ist dadurch nun möglich, dem Aquariensystem eine unglaublich große Menge an Fischfutter, Phytoplankton und die ganze Palette an Staubfuttermitteln zu verabreichen, ohne dabei den Nitrat und Phosphatgehalt zu erhöhen.

## Gefahren und was es sonst zu beachten gilt

Ganz entscheidend bei Eingriffen jeglicher Art ins Aquariensystem ist der Zeitfaktor. Alle Organismen müssen sich an Veränderungen akklimatisieren, unabhängig davon, ob diese Veränderungen letztlich positiv oder negativ zu bewerten sind.

Entsprechend müssen Senkungen oder Erhöhungen von Nährstoffgehalten im Aquarium langsam erfolgen und v.a. kontrolliert sein. Gerade eine schnelle Absenkung des Phosphatgehaltes durch den effizienten Einsatz von Phosphatadsorbern wird von vielen Steinkorallen schlecht vertragen. Dabei kann es zu akuten Ausbleichungserscheinungen und sogar zum Absterben von Korallenkolonien kommen.

Gerade in alteingefahrenen Aquarien mit langjährig hohen Nährstoffgehalten sollte man die Nährstoffsenkung so durchführen, dass die Korallen und Algen über mindestens ein Jahr Zeit haben, sich an die stetigen Veränderungen anzupassen.

Auch die Erhöhung von Nährstoffgehalten bedarf einer entsprechenden Anpassungszeit. Nährstofflimitierte Korallen und Algen müssen sich an eine plötzliche Verfügbarkeit von nachdosierten Nährstoffen zunächst gewöhnen, weil Stoffwechselprozesse neu anlaufen müssen. Viele Bakterien – darunter die gefürchteten Cyanobakterien – sind hier in ihrer Akklimatisationsfähigkeit oft deutlich schneller als z.B. Korallen oder *Caulerpa* Algen. Eine zu schnelle Erhöhung kann also zunächst das Auftreten von Cyanobakterienarten begünstigen. Dies kann man dadurch vermeiden, in dem man einerseits kontrolliert Nährlösungen dosiert und die Dosiermenge langsam steigert.

Hier muß auch die Ammoniumchlorid-Dosierung angesprochen werden. Wie erläutert wirken zu hohe Ammoniumkonzentrationen toxisch auf Nitrit-oxidierende Bakterien. Wenn plötzlich eine große Menge Ammoniumchlorid ins Aquarium gegeben wird, kann es durchaus passieren, das selbst in einem seit langer Zeit eingefahrenen Aquariensystem die Ammonium-oxidierenden Bakterien überfordert sind und dabei Ammonium akkumuliert und die Nitrit-oxidierenden Bakterien vergiftet. Es ist also wichtig, anfänglich die Ammoniumkonzentration langsam zu steigern, damit sich die Population der Ammonium-oxidierenden Bakterien vergrößert und dadurch die Umsatzrate von Ammonium im System gesteigert werden kann.

Auch bei der Ethanol (Wodka-)dosierung muß sehr langsam vorgegangen werden, damit der Nitrat- und Phosphatgehalt nicht zu schnell absinkt. Dies ist eine der wenigen ernsthaften Gefahren bei einer Falschanwendung der Ethanoldosierung im Riffaquarium.

## Nährstoffarm oder nährstoffreich ?

Wie auch in vielen anderen Bereichen gilt in der Aquaristik der Grundsatz „Never change a winning team“. Gerade alte Aquarien würde ich persönlich keiner „Schönheitsoperation“ mehr unterziehen.

Natürlich ist es möglich, das man auch in alten Aquarien Änderungen vornehmen kann, allerdings sollte dies mit entsprechender Vorsicht durchgeführt werden. Nicht selten sind Aquarianer zu ungeduldig, das eigene Becken steht nicht so wie die der Aquarienfreunde und die Folge davon ist, dass innerhalb von zwei Jahren an einem Becken drei verschiedene Filtersysteme, fünf verschiedene Leuchtmittel und sieben verschiedene Spurenelementmischungen ausprobiert wurden. Solche Vorgehensweisen behindern die Entwicklung von Aquarien.

Wenn man seit 15 Jahren ein Aquarium pflegt, das seit eh und je einen Nitratgehalt von 25 mg/L und einen Phosphatgehalt von 0,1 mg/L aufweist, dann würde ich „einen Teufel tun“



und anfangen, an diesen Werten zu drehen. Im Prinzip sollte man sich dann mit dem Gedanken anfreunden, ein neues Aquarium zu planen und aufzubauen.

Während dieses Vortrags wurde versucht zu erklären, wie Korallen und Algen funktionieren, um mit diesem Hintergrund die Frage „nährstoffarm oder nährstoffreich“ zu beantworten. Wir haben kennengelernt, dass Korallenriffe nicht so nährstoffarm sind, wie wir immer behaupten. Darüber hinaus sind die verschiedenen relevanten Nährstoffgruppen – gelöste anorganische und organische sowie partikulär gebundene und suspendierte Nährstoffe – benannt und deren Bedeutung für die Organismen im Aquarium erläutert worden.

Nun ist es also soweit, die Frage zu beantworten. Natürlich wird sich jeder einzelne Aquarianer auf sein eigenes Wissen und seine Erfahrungen verlassen, wenn es um die Beantwortung dieser Frage geht. Aus diesem Grunde gebe ich nun meine Antwort, mit der sie selbstverständlich nicht konform gehen müssen.

In meinen Augen weist das ideale Riffaquarium von heute nur sehr geringe Mengen an Ammonium, Nitrat und Phosphat auf. Entsprechende Möglichkeiten, solch nährstoffarme Becken langjährig zu pflegen gibt es (hier sei besonders auf die Ethanoldosierung verwiesen). Auf der anderen Seite sollten wir versuchen, dem Aquarium möglichst viele der verschiedenen Nährstoffgruppen (organische und partikuläre Nährstoffe) anzubieten. Hier eignen sich Aminosäure-, Vitamin- und andere Nährstofflösungen sowie Staubfutter und Plankton. Die Förderung der heterotrophen Ernährung unserer Korallen mit Plankton (Bakterio-, Phyto- und Zooplankton) und Staubfutter ist der Schlüssel zum Erfolg, v.a. in der Haltung von azooxanthellaten Arten. Refugien sind darüber hinaus hervorragend geeignet, um die Kleinsfauna im Aquarium zu fördern, so daß natürliches Plankton im Aquarium entsteht und für Korallen und Fische verfügbar wird.

## Zusammenfassung

Abschliessend werden noch einmal die wesentlichen Kernaussagen dieses Vortrages zusammengefaßt wiedergegeben:

### 1) Messen von Nährstoffen

- Wir beziehen uns i.d.R. nur auf Nitrat und Phosphat, wenn wir über Nährstoffgehalte sprechen
- daran kann man nicht zwangsläufig beurteilen, ob ein Aquarium nährstoffarm oder nährstoffreich ist
- Wir müssen uns über andere Nährstoffquellen im Aquarium bewußt werden
- Phosphatdepots können von Algen, aber nicht von Korallen genutzt werden
- Korallen fressen suspendierte Feinsedimente

### 2) Von nichts kommt nichts

- Nährelemente wie N oder P müssen in einer bestimmten Konzentration vorhanden sein und in einem geeigneten Verhältnis zueinander stehen
- Wenn wir Nitrat und Phosphat als gelöste anorganische Nährstoffe eliminieren, müssen wir für eine andere Nährstoffquelle sorgen
  - i. Förderung der heterotrophen Ernährung (Staubfutter, Plankton)
  - ii. Umstieg auf organische Nährstoffe (z.B. Aminosäuren)

### 3) Futter für Bakterien

- Viele Bakterien müssen mit Kohlenstoff versorgt werden, damit sie Nitrat abbauen (Denitrifikanten) und durch ihr Wachstum Phosphat entfernen können
- und zwar unabhängig von allen bekannten Aquarien- und Filtersystemen!

- Der Kohlenstoff, der im Aquarium in Form von Detritus oder toten Algenresten vorhanden ist, reicht i.d.R. nicht aus!

## Anhang – Rezepte und Dosierempfehlungen für Nährlösungen

Als Nährlösungen finden Sie hier eine Ammoniumchloridlösung und eine Calciumnitratlösung. Beide enthalten die gleiche Menge Stickstoff, so daß es Ihnen überlassen ist, für welche Lösung Sie sich im Falle einer Stickstofflimitierung in Ihrem Aquarium entscheiden. Die Lösungen sind sehr „dünn“ angesetzt. Ich übernehme keine Haftung für eventuell auftretende Schäden oder gar Verluste an Aquarientieren und Aquariumpflanzen. Die angegebenen Nährlösungen sind so berechnet, dass sie für eine möglichst breite Masse an Aquarianern ohne großes Risiko nutzbar sind. Eine Falschanwendung, z.B. bei Fehlern in der Herstellung der Lösungen oder bei Nichtbeachtung der angegebenen Dosieranleitung, kann es zu Verlusten bei Korallen, Pflanzen und insbesondere mit der Ammoniumchloridlösung bei Fischen führen.

Ganz bewußt habe ich an dieser Stelle keine Rezeptur für eine Kaliumdihydrogenphosphat-Lösung angegeben, weil ich die Gefahr sehe, dass damit mehr falsch als richtig gemacht wird. Ich bitte Sie dies zu verstehen, weil ich für mich persönlich dieses Risiko nicht eingehen möchte.

Wenn Sie Fragen zur Herstellung oder Anwendung der Lösungen haben, können Sie über das [www.meerwasserforum.com](http://www.meerwasserforum.com) schnell kompetenten Rat einholen und über meine dort angegebene email-Adresse oder der PN-Funktion Kontakt zu mir aufnehmen. Viel Erfolg und allzeit salzigen Daumen!

### Ammoniumchlorid-Lösung

Chemische Summenformel:  $\text{NH}_4\text{Cl}$

Molekulargewicht: 53,5 g/mol

Reinheit: reinst oder pro analysi (p.a.)

Bezugsquelle: Apotheke oder Chemikalienhandel (z.B. Omikron.de)

**Sicherheitsinformationen** zur Chemikalie: Merck Online Katalog, [www.merck.de](http://www.merck.de),

**Chemikalien sind immer von Kindern fern zu halten und dürfen nicht in der Nähe von Lebensmitteln aufbewahrt werden! Auch im Aquarienschrank haben Chemikalien nichts verloren!**

Wichtiges Zubehör bei der Anwendung: ein funktionierender und zuverlässiger Ammonium, Nitrat und Phosphattest.

Stammlösung: 0,25 mol/L  $\text{NH}_4$ , Volumen = 0,5 L (Osmosewasser), Stoffmenge  $\text{NH}_4$  = 0,125 mol.

In dieser Stammlösung (0,5 L) sind 1,75 g Stickstoff in Form von 2,25 g Ammonium enthalten, was einem Gehalt von 4,5 g  $\text{NH}_4$ /L entspricht. 1 mL Stammlösung enthält folglich 4,5 mg Ammonium.

Rezeptur: 6,7 g  $\text{NH}_4\text{Cl}$  in 0,5 L Osmosewasser (!) auflösen (alternativ 13,4 g in 1 L Osmosewasser, wenn es mit 6,7 g Wiegeprobleme gibt).

Lagerung: Fern ab von Kindern und Lebensmitteln im verschlossenen Glasbehälter kühl und dunkel lagern (bitte nicht im Kühlschrank)!

Dosierung: 1 mL pro 100 L Nettobeckenvolumen täglich erhöht den Ammoniumgehalt im Aquarium um 0,045 mg/L (2,5  $\mu\text{mol/L}$ ). Werden diese 0,045 mg/L nicht verbraucht

(theoretisch), dann wird im Zuge der Nitrifikation daraus 0,155 mg/L Nitrat. Daran sehen sie, dass die Stammlösung sehr „dünn“ ist.

Wichtig: Vor der Erstanwendung messen Sie bitte Ihren Ammonium, Nitrat und Phosphatgehalt und notieren Sie sich diese Werte mit Datumsangabe. Sie sollten ausgehend von der empfohlenen Dosierung von 1 mL/100 L täglich ihren Ammonium und Nitratgehalt im Aquarium im Rhythmus von 2 Tagen messen. 1 Mal wöchentlich sollten Sie auch Ihren Phosphatgehalt kontrollieren. Alle Werte sind im „Tagebuch“ zu protokollieren.

Ganz wichtig: Schauen Sie bei der Anwendung auf Ihre Korallen und das Algenwachstum. Wenn Sie eine Stickstofflimitierung diagnostiziert haben, dann sollten die Korallen bei der Ammoniumdüngung auch wieder „aufgehen“ und wachsen (weiße Wachstumsspitzen bei Steinkorallen). Wenn dies der Fall ist und gleichzeitig der Ammonium- und Nitratgehalt täglich und linear ansteigt, dann hat bereits diese Stammlösung mit der täglichen Dosierung von 1 mL den Stickstoffbedarf im Aquarium überschritten. Sie sollten die Dosierung dann entweder einstellen und abwarten, ob und wann sich das Verhalten ihrer Korallen wieder ändert, oder sie verdünnen ihre Stammlösung 1:2, d.h. sie nehmen 100 mL der Stammlösung ab, überführen sie in ein neues Gefäß und geben weitere 100 mL zu diesen 100 mL Stammlösung Osmosewasser dazu (nicht die gesamte Stammlösung verdünnen, da möglicherweise das genaue Volumen nicht mehr bekannt ist). Von der 1:2 verdünnten Lösung geben Sie wie gehabt 1 mL/100 L Nettoaquarienvolumen täglich.

Wenn sich bei einer täglichen Dosierung von 1 mL/100 L Aquarienwasser innerhalb von 2 Wochen nichts tut, dann erhöhen Sie die Dosierung um 1 mL/100 L und beobachten Sie wiederum für eine Woche. Wenn dann immer noch nichts passiert ist, erhöhen Sie wieder um 1 mL/100L Aquarienwasser usw. Dadurch können Sie langsam ermitteln, wie hoch der Stickstoffbedarf Ihres Aquariums ist.

### **Ammoniumchlorid-Lösung NICHT IN DER EINFAHRPHASE ANWENDEN!**

#### **Calciumnitrat-Lösung**

Chemische Summenformel:  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Molekulargewicht: 164,1 g/mol

Reinheit: reinst oder pro analysi (p.a.)

Bezugsquelle: Chemikalienhandel (z.B. Omikron.de)

**Sicherheitsinformationen** zur Chemikalie: Merck Online Katalog, [www.merck.de](http://www.merck.de),

**Chemikalien sind immer von Kindern fern zu halten und dürfen nicht in der Nähe von Lebensmitteln aufbewahrt werden! Auch im Aquarienschrank haben Chemikalien nichts verloren!**

Wichtiges Zubehör bei der Anwendung: ein funktionierender und zuverlässiger Nitrat und Phosphattest.

Stammlösung: 0,25 mol/L  $\text{NO}_3$ ,  $V=0,5$  L, Stoffmenge 0,125 mol  $\text{NO}_3$

In dieser Stammlösung (0,5 L) sind 1,75 g Stickstoff in Form von 7,75 g Nitrat enthalten, was einem Gehalt von 15,5 g  $\text{NO}_3$ /L entspricht. 1 mL Stammlösung enthält folglich 15,5 mg Nitrat. Der Calciumgehalt in der Stammlösung beträgt 5 g/L, d.h. 1 mL Stammlösung enthält 5 mg Calcium.

Rezeptur: 10,3 g  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  in 0,5 L Osmosewasser(!) auflösen.

Lagerung: Im verschlossenen Glasbehälter kühl und dunkel lagern (bitte nicht im Kühlschrank)!

Dosierung: 1 mL pro 100 L Nettobeckenvolumen täglich erhöht den Nitratgehalt im Aquarium um 0,155 mg/L (2,5 µmol/L) und den Calciumgehalt um 0,05 mg/L.

Wichtig: Vor der Erstanwendung messen Sie bitte Ihren Nitrat und Phosphatgehalt und notieren Sie sich diese Werte mit Datumsangabe. Sie sollten ausgehend von der empfohlenen Dosierung von 1 mL/100 L täglich ihren Nitratgehalt im Aquarium im Rhythmus von 2 Tagen messen. 1 Mal wöchentlich sollten Sie auch Ihren Phosphatgehalt kontrollieren. Alle Werte sind im „Tagebuch“ zu protokollieren.

Ganz wichtig: Schauen Sie bei der Anwendung auf Ihre Korallen und das Algenwachstum. Wenn Sie eine Stickstofflimitierung diagnostiziert haben, dann sollten die Korallen bei der Nitratdüngung auch wieder „aufgehen“ und wachsen (weiße Wachstumsspitzen bei Steinkorallen). Wenn dies der Fall ist und gleichzeitig der Nitratgehalt täglich und linear ansteigt, dann hat bereits diese Stammlösung mit der täglichen Dosierung von 1 mL den Stickstoffbedarf im Aquarium überschritten. Sie sollten die Dosierung dann entweder einstellen und abwarten, ob und wann sich das Verhalten ihrer Korallen wieder ändert, oder sie verdünnen ihre Stammlösung 1:2, d.h. sie nehmen 100 mL der Stammlösung ab, überführen sie in ein neues Gefäß und geben weitere 100 mL zu diesen 100 mL Stammlösung Osmosewasser dazu (nicht die gesamte Stammlösung verdünnen, da möglicherweise das genaue Volumen nicht mehr bekannt ist).

Wenn sich bei einer täglichen Dosierung von 1 mL/100 L Aquarienwasser innerhalb von 2 Wochen nichts tut, dann erhöhen Sie die Dosierung um 1 mL/100 L und beobachten Sie wiederum für eine Woche. Wenn dann immer noch nichts passiert ist, erhöhen Sie wieder um 1 mL/100L Aquarienwasser usw. Dadurch können Sie langsam ermitteln, wie hoch der Stickstoffbedarf Ihres Aquariums ist.