

Das Anammox-Verfahren zur Stickstoffentfernung in Kläranlagen

Ergebnis der fruchtbaren Zusammenarbeit von Mikrobiologen und Verfahrenstechnikern

Die Schweiz als Rhein-Anliegerstaat hat sich verpflichtet, den Stickstoffexport in die Nordsee zu verringern. Auf Kläranlagen wird dies heutzutage meist durch eine kostspielige Erweiterung der biologischen Hauptstufe erreicht. In den 90er Jahren deuteten aber mehrere Berichte darauf hin, dass auch unter ganz unerwarteten Betriebsbedingungen Stickstoff eliminiert werden kann. Dies ist auf eine erst seit kurzem bekannte Bakteriengattung zurückzuführen, die auch in einer Schweizer Kläranlage gefunden wurde. Auf der Basis dieses Wissens entwickelten die Verfahrenstechniker anschliessend ein neues Verfahren, das eine nachhaltige Stickstoffentfernung ermöglicht.

Unter Stickstoffelimination versteht man die Umwandlung von biologisch verfügbaren Stickstoffverbindungen wie Ammonium (NH_4^+), Nitrit (NO_2^-) und Nitrat (NO_3^-) zu elementarem Stickstoff (N_2), der als harmloses Endprodukt in die Luft ausgast. In Kläranlagen wird heute fast ausschliesslich die biologische Nitrifikation/Denitrifikation zur Stickstoffelimination verwendet (siehe Kasten). Dabei verzichtet man in Schweizer Kläranlagen häufig auf den Denitrifikationsschritt, so dass noch eine relativ grosse Menge Stickstoff meist in Form von Nitrat in die Gewässer eingeleitet wird. Als Rhein-

Anrainer-Staat hat sich die Schweiz jedoch in der Gewässerschutzverordnung von 1998 verpflichtet, den Stickstoffeintrag in den Rhein bis zum Jahr 2005 um 2000 Tonnen zu verringern und muss daher in naher Zukunft handeln. Der Ausbau aller Schweizer Kläranlagen mit einer ausreichenden Nitrifikation/Denitrifikationsstufe wäre recht teuer und ausserdem ist der Betrieb dieses Verfahrens relativ energie- und ressourcenaufwändig [1]. Deshalb sind neue, schonendere Verfahren gefragt.

Den unbekanntem Mikroorganismen auf der Spur

In den 80er und 90er Jahren gab es mehrere Hinweise, dass Ammonium nicht nur mittels Nitrifikation/Denitrifikation eliminiert werden kann, sondern dass es vermutlich Mikroorganismen gibt, die Ammonium ohne Sauerstoff, jedoch mit Nitrit zu gasförmigem Stickstoff oxidieren können. Holländische und deutsche Wissenschaftler konnten diese Mikroorganismen erstmals identifizieren. Es handelt sich um Bakterien der Ordnung Planctomycetales: *Brocadia anammoxidans* und *Kuenenia stuttgartiensis* [2, 3]. Auch in der Schweizer Kläranlage Kölliken, die ohne Denitrifikationszone betrieben wird, konnte das Phänomen der anaeroben Ammoniumoxidation beobachtet werden. Unsere dortigen Untersuchungen zeigten, dass sich in dieser Kläranlage ein mehrfach geschichtetes Biofilmsystem ausgebildet hatte. In solchen Biofilmen ergeben sich starke Sauerstoffgradienten, z.B. kann die oberste

Schicht sauerstoffreich, die unterste auf dem Trägermaterial jedoch anaerob sein [4]. Wir nahmen deshalb an, dass die gesuchten Mikroorganismen in den untersten Schichten des Biofilms zu finden waren. Dank spezifischer Sonden und der FISH-Technik (Fluoreszenz-*in-situ*-Hybridisierung) [5] wiesen wir dort tatsächlich grössere Mengen eines Planctomyceten-artigen Bakteriums nach (Abb. 1). Bis heute ist es jedoch weltweit nicht gelungen, mit den klassischen Methoden der Mikrobiologie diese neuen Bakterien in Reinkultur zu isolieren. Wir konnten aber eine Probe des Biofilms so weit anreichern, dass etwa 90% aller Bakterien Planctomyceten waren [6]. Bei den Bakterien aus der Kläranlage in Kölliken handelt es sich ebenfalls um die Art *Kuenenia stuttgartiensis*. Mit Hilfe molekularbiologischer und physiologischer Versuche konnte eindeutig gezeigt werden, dass *K. stuttgartiensis* Ammonium unter anaeroben Bedingungen zu Stickstoff oxidiert [3, 6]; dieser Prozess wird deshalb als «anaerobe Ammoniumoxidation» (Anammox) bezeichnet.

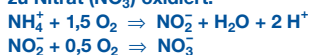
Anaerobe Ammoniumoxidation – ein nachhaltiger Prozess zur Stickstoffelimination

Auf diesem Wissensstand konnten nun die Verfahrenstechniker aufbauen. Auf Kläranlagen mit Schlammvergärung wird besonders ammoniumreiches Abwasser pro-

Nitrifikation

= Aerobe Ammoniumoxidation durch nitrifizierende Bakterien.

Ammonium (NH_4^+) wird durch Sauerstoff (O_2) über das Zwischenprodukt Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert:



Denitrifikation

= Nitratatmung durch denitrifizierende Bakterien.

Nitrat wird unter Zugabe von organischem Kohlenstoff (z.B. Methanol) bei anaeroben Bedingungen zu elementarem Stickstoff (N_2) reduziert:



Anammox

= Anaerobe Ammoniumoxidation durch Anammox-Bakterien.

Ammonium wird unter anaeroben Bedingungen mit Nitrit zu elementarem Stickstoff oxidiert:

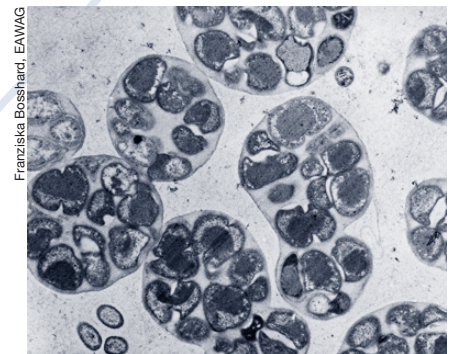


Abb.1: Cluster von Anammox-Bakterien unter dem Elektronenmikroskop.

Das Anammox-Verfahren auf dem Prüfstand

Um die Praxistauglichkeit dieses zweistufigen Verfahrens zu ermitteln, hat die EAWAG in Zusammenarbeit mit der Kläranlage Werdhölzli (Zürich) und weiteren Partnern eine zweistufige Pilotanlage (4 m³) gebaut und betrieben [7]. Diese Versuche ergaben einen umfassenden Einblick in den neuen Prozess und bestätigten seine Praxistauglichkeit. Ausserdem wurden an dieser Pilotanlage die Grundlagen für die Dimensionierung und den Betrieb einer grosstechnischen Anlage erarbeitet.

Leider besteht heute noch eine gewisse Zurückhaltung gegenüber dem neuen Verfahren, vor allem wegen der geringen Wachstumsgeschwindigkeit der Anammox-Bakterien und der mangelnden Praxiserfahrung. Aufgrund der zahlreichen Vorteile kann aber trotzdem in den nächsten Jahren mit den ersten grosstechnischen Anammox-Reaktoren auf Kläranlagen gerechnet werden.



Christian Fux, Verfahrenstechniker, hat Anfang 2003 seine Doktorarbeit über das Anammox-Verfahren in der Abteilung «Ingenieurwissenschaften» der EAWAG abgeschlossen. Seither ist er als Postdoktorand am «Advanced Wastewater Management Centre» der Universität Queensland in Australien tätig.

Koautoren: Konrad Egli, Jan Roelof van der Meer, Hansruedi Siegrist

- [1] BUWAL (1996): Stickstofffrachten aus Abwasserreinigungsanlagen. Schriftenreihe Umwelt Nr. 276, 67 S.
- [2] Strous M., Fuerst J.A., Kramer E.H.M., Logemann S., Muyzer G., van de Pas-Schoonen K.T., Webb R., Kuenen J.G., Jetten M.S.M. (1999): Missing lithotroph identified as new planctomycete. *Nature* 400, 446–449.
- [3] Schmid M., Twachtman U., Klein M., Strous M., Juretschko S., Jetten M., Metzger J.W., Schleifer K.-H., Wagner M. (2000): Molecular evidence for genus-level diversity of bacteria capable of catalyzing anaerobic ammonium oxidation. *Systematic & Applied Microbiology* 23, 93–106.
- [4] Koch G., Egli K., van der Meer J.R., Siegrist H. (2000): Mathematical modeling of autotrophic denitrification in a nitrifying biofilm of a rotating biological contactor. *Water Science and Technology* 41, 191–198.
- [5] Zepp K. (2001): RNA – ein Tracer zum Nachweis von Mikroorganismen. *EAWAG news* 52, 12–13.
- [6] Egli K., Fanger U., Alvarez P., Siegrist H., van der Meer J.R., Zehnder A.J.B. (2001): Enrichment and characterization of a new anammox bacterium from a rotating biological contactor treating an ammonium-rich leachate. *Archives of Microbiology* 175, 198–207.
- [7] Fux C., Böhrer M., Huber P., Brunner I., Siegrist H. (2002): Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitritation and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant. *Journal of Biotechnology* 99, 295–306.

duziert, es enthält noch 15–20% der Stickstofffracht des zugeführten Abwassers. Heutzutage wird dieses Faulwasser wieder mit dem Zulauf aus der Kanalisation vermischt und im Belebtschlammbecken der Hauptstufe gereinigt. Anstelle dieser «Rückbelastung» könnte das Faulwasser mit geringem Ressourcen- und Energieaufwand separat mit dem neuen Anammox-Prozess behandelt werden. Hierzu braucht es Nitrit, das im Faulwasser nicht vorhanden ist, jedoch als Zwischenprodukt bei der Nitrifikation (siehe Kasten) produziert wird. Folglich bietet sich ein zweistufiger Prozess an (Abb. 2). In einem ersten belüfteten Reaktor wird Ammonium teilweise zu Nitrit oxidiert (*partielle Nitrifikation*), welches in einem nachgeschalteten Behälter mit dem verbleibenden Ammonium unter Sauerstoff-

ausschluss zu elementarem Stickstoff reduziert wird (*Anammox*). Das ganze Verfahren nennt sich deshalb «partielle Nitrifikation/Anammox» oder kurz Anammox-Verfahren. Bisher wird es allerdings nur bei ammoniumreichen Abwässern eingesetzt. Dank der genetischen Methoden können die Anammox-Bakterien jederzeit einfach nachgewiesen werden, was in der Anlaufphase und bei Prozessstörungen des Reaktors wichtige Information liefert.

Gegenüber der herkömmlichen Nitrifikation/Denitrifikation hat das Anammox-Verfahren einige Vorteile (Abb. 3):

- Die Sauerstoffzugabe kann um 60% reduziert werden. Damit wird auch der Energieaufwand gesenkt, der zum Einblasen des Sauerstoffs benötigt wird.

- Die Anammox-Bakterien benötigen zum Wachsen keine organische Kohlenstoffquelle. Im Gegensatz dazu muss beim Nitrifikation/Denitrifikationsverfahren organischer Kohlenstoff beispielsweise in Form von Methanol hinzugegeben werden.

- Die Anammox-Bakterien produzieren wenig Biomasse, so dass die zu entsorgende Schlammmenge gering ist.

Damit verbraucht das neue Anammox-Verfahren nicht nur weniger Energie und Ressourcen, sondern ist daneben auch noch preiswerter als das konventionelle Nitrifikation/Denitrifikationsverfahren.

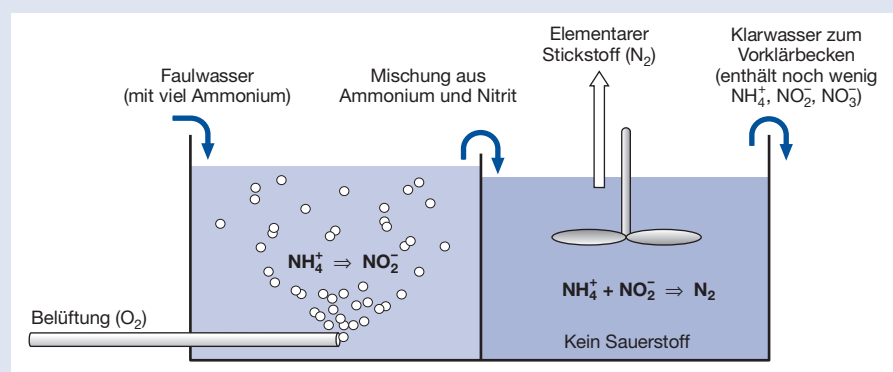


Abb. 2: Das Anammox-Verfahren.

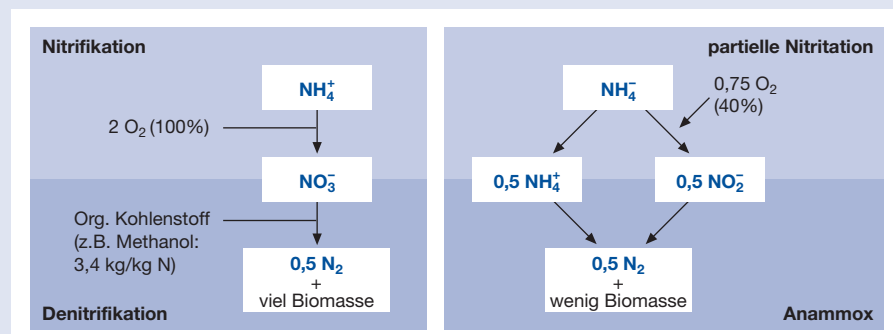


Abb. 3: Vergleich des Anammox-Verfahrens (rechts) mit der konventionellen Stickstoffelimination durch das Nitrifikation/Denitrifikations-Verfahren (links).