

Energieeinsparung bei Belebtschlammverfahren durch NH_4 - und O_2 -basierte Regelung

Dr. Sebastian Barfüßer, GIMAT Liquid Monitoring

Zu den Routineaufgaben von Kläranlagen gehört die Behandlung von Abwasser mit hohem Stickstoffgehalt. Das geschieht üblicherweise in einem zweistufigen biologischen Prozess, Nitrifikation und Denitrifikation, in dem Bakterien die Stickstoffverbindungen zu gasförmigem Stickstoff abbauen. Dieser Prozess muss durch Gebläse unterstützt werden, die die Geräte mit dem höchsten Energieverbrauch auf einer Kläranlage darstellen. Die Online-Messung von Prozessparametern kann sicherstellen, dass die Belüftung durch die Gebläse den Bedarf der Bakterien deckt und dadurch einen erheblichen Teil der Energiekosten einsparen. Ein Beispiel aus der Praxis wird vorgestellt, bei dem die Belüftungszeiten um 35% reduziert werden konnten. Des Weiteren skizziert der Artikel die Beziehung zwischen den verfügbaren Prozessparametern und klärt auf, welche Kombination von Parametern bei einer Messung zu favorisieren ist.



Harnstoff gehört zu den wichtigsten stickstoffhaltigen Verbindungen im Abwasser. Der Harnstoff kann aus industrieller Produktion stammen, von Mensch und Tier, die ihn in ihrem Stoffwechsel produzieren, oder kann von Feldern ausgewaschen werden, wo er als Düngemittel eingesetzt wird. Mikroorganismen wandeln Harnstoff und andere organische Verbindungen in Ammonium um

(NH_4^+). Diese Umsetzung beginnt bereits in der Kanalisation.

Hinzu kommt Nitrat (NO_3^-), ein Beitrag zum Abwasser aus Industrie und Landwirtschaft.

In diesen Formen ist Stickstoff als Nährstoff für Algen, Bakterien und Pflanzen einfach verfügbar. Wasser mit hohem Stickstoffgehalt kann zu übermäßigem Wachstum dieser Organismen führen, etwa in Form einer Algenblüte. Die möglichen

Folgeschäden solcher Ereignisse können schwerwiegend sein und beispielsweise den Tod von Fischen und die Kontamination von Trinkwasser einschließen.

Aus diesem Grund muss der Stickstoffgehalt auf "normale" Konzentrationen reduziert werden, bevor das Abwasser in die Umwelt zurückgeführt wird.

Entfernungsstrategie

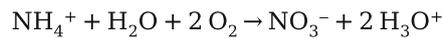
Einige Gruppen von Bakterien verwerten Ammonium oder Nitrat in Ihrem Stoffwechsel. Wenn diese Bakterien zusammen in einem wohlkontrollierten Prozess eingesetzt werden, entsteht als Endprodukt gasförmiger Stickstoff (N_2) aus Ammonium und Nitrat, die verbraucht werden. Diese Form des Stickstoffs ist für Algen, Pflanzen und die meisten Bakterien nicht zugänglich. Stickstoffgas stellt bereits den Hauptbestandteil unserer Atmosphäre dar und hat keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt.

Diese biologische Behandlung, bekannt als Belebtschlammverfahren, ist eine in Kläranlagen sehr verbreitete Art der Behandlung.

Nitrifikation

Der Vorgang umfasst mehrere Schritte. Nitrifizierende Bakterien verbrauchen Ammonium (NH_4^+) und oxidieren es schließlich zu Ni-

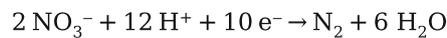
trat (NO_3^-).



Dieser Teil des Vorgangs wird als Nitrifikation bezeichnet und kann von mehreren Gattungen von Bakterien ausgeführt werden. Die Oxidation von Ammonium erfordert gelösten Sauerstoff (siehe O_2 auf der linken Seite der Gleichung)

Denitrifikation

Eine andere Gruppe von Bakterien kann das produzierte Nitrat in einer Denitrifikationsreaktion weiter umsetzen zu Stickstoff:



Die Bakterien benötigen ausreichend organischen Kohlenstoff (als Quelle der Elektronen e^- im linken Teil der Gleichung) für die Denitrifikation und produzieren gasförmigen Stickstoff. Die Denitrifikation kann nur in Ab-

wesenheit von molekularem Sauerstoff (anoxische Bedingungen) effektiv ablaufen.

Strategien zur Optimierung der Belüftungssteuerung

Infolge der Größe der Becken und der schieren Anzahl an Bakterien werden für die Nitrifikation beträchtliche Mengen an Sauerstoff benötigt. Die Sauerstoffaufnahme aus der Luft ist viel zu langsam, wenn die Nitrifikation zeitnah vollständig ablaufen soll. Die Belüftung muss durch Gebläse unterstützt werden, um diesen Engpass zu umgehen. Allerdings verbrauchen Gebläse sehr viel Energie. Nach statistischen Auswertungen machen Gebläse 50-75% der Energiekosten eines Klärwerks aus.

Mehrere Regelungen für die Belüftung wurden in Kläranlagen entwickelt und eingesetzt. Ein grundlegendes System ist eine periodische Belüftung mit regel-

Konzentration oder Redoxpotential

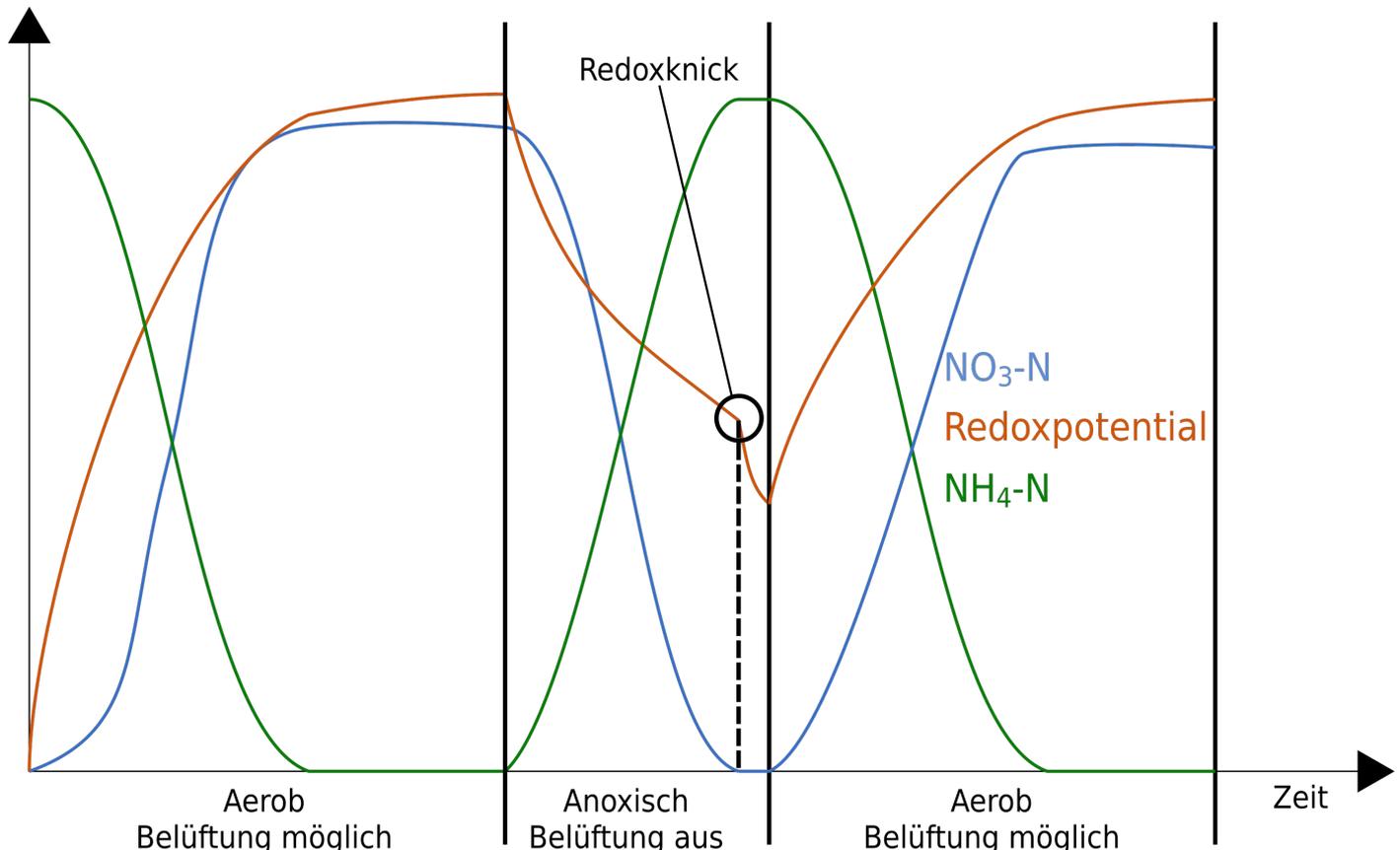


Abbildung 1: Typisches Verhalten von Ammonium-, Nitrat- und Redoxwerten in der biologischen Reinigungsstufe

mäßigen Belüftungs- und Pausenzeiten (siehe Abbildung 3, untere Hälfte). Dieses System arbeitet unabhängig von Prozessparametern. Eine verbesserte Regelung der Belüftung versucht den Sauerstoffbedarf der Bakterien zu bestimmen und die Gebläse nur bei Bedarf zu aktivieren, mit dem Ziel die Behandlungseffizienz zu verbessern und zusätzlich die Energiekosten zu reduzieren. Einfach zugängliche Parameter, auf denen die Regelung der Belüftung aufgebaut werden kann, sind gelöster Sauerstoff, Nitrat und Redox.

Sauerstoffbasierte Regelung der Belüftung

Die Regelung der Belüftung anhand der Sauerstoffwerte ist eine gangbare Methode. Praktische Erfahrungen mit sauerstoffbasierter Regelung führten zu folgenden Beobachtungen und Schlussfolgerungen:

Eine hohe Sauerstoffkonzentration fördert die Nitrifikation. Der Effekt nimmt allerdings bereits wieder ab, wenn der Sauerstoffwert 2 mg/l überschreitet. Jenseits dieser 2 mg/l steigt der Energiebedarf für die Gebläse weiter an, der Nutzen für die Nitrifikation aber wird immer geringer. Der Betrieb einer Anlage mit einem Zielwert von 1,5–2 mg/l gelöstem Sauerstoff hat sich als am wirtschaftlichsten erwiesen.

Eine rein auf dem Sauerstoffwert aufbauende Regelung berücksichtigt keine weiteren Daten, vor allem Ammonium- und Nitratkonzentration, was einen großen Nachteil darstellt. Sogar weitere Bedingungen wie pH, Temperatur und Schlammalter haben einen Einfluss auf die Nitrifikationsleistung.

Eine Sauerstoffsonde ist allerdings eine sinnvolle ergänzende Messung für die Regelung, erlaubt sie doch die Überwachung der ökonomischen 2 mg/l O₂-Grenze während der Belüftungsphasen.

Regelung basierend auf NO₃-N

Nitrat (NO₃) ist Produkt der Nitri-



Abbildung 2: Controller GICON mit den Sonden für Ammonium- und gelösten Sauerstoff

fikation und Ausgangsstoff für die Denitrifikation. Prinzip einer auf Nitrat aufbauenden Regelung der Belüftung ist, dass sehr niedrige NO₃-N –Werte anzeigen, wenn der größte Teil des Nitrats von den Denitrifikanten verbraucht worden ist. Zu diesem Zeitpunkt sollte die Belüftung wieder verstärkt werden, damit die Aktivität der nitrifizierenden Bakterien unterstützt wird und sie in die Lage versetzt werden, mehr NO₃⁻ zu produzieren. Wenn der darauffolgende Anstieg des NO₃-N-Werts beendet ist, kann die Belüftung wieder abgestellt werden.

Der Nachteil: Wenn sehr niedrige NO₃-N-Werte auftreten, wenn die NH₄-N-Werte ebenfalls niedrig sind (z. B. nachts, wenn die Auslastung der Kläranlage gering ist), dann hat die Belüftung keinen Effekt, weil kaum NH₄⁺ verfügbar ist, das nitrifiziert werden könnte.

Regelung nach dem Redoxpotential

Das Redoxpotential zeigt einen ausgeprägten Abfall, wenn die NO₃⁻-Konzentration auf sehr niedrige Werte fällt. Diese Regelung ähnelt einer NO₃⁻-basierten Regelung. Das Redoxpotential dient als indirekter Indikator für die Nitratkonzentration.

Abbildung 1 illustriert die Beziehung zwischen den Parametern Ammonium, Nitrat und Redox

Zu Beginn ist die Ammoniumkonzentration hoch. Im Abwasser läuft die Nitrifikation ab, dabei fällt die Ammoniumkonzentration und die Nitratkonzentration nimmt zu. Dieser Schritt wird üblicherweise in bestimmtem Ausmaß durch Belüftung unterstützt. Wenn die Nitrifikation (und andere sauerstoffverbrauchende Schritte wie die Kohlenstoffoxidation) abgeschlossen sind, endet die aerobe Phase, die Belüftung wird gestoppt.

Die Behandlung tritt in die anoxische Phase ein. Während die Denitrifikation fortschreitet, nimmt die Nitratkonzentration ab. Wenn die Nitratkonzentration auf null fällt, zeigt die Redoxkurve (im Idealfall) eine charakteristische Form, bezeichnet als „Redoxknick“. Der Redoxknick kann mehr oder weniger stark ausgeprägt sein, abhängig von den Bedingungen. Zu den verbreitetsten Problemen mit redoxbasierter Kontrolle gehört, dass der Redoxknick nicht immer zuverlässig registriert werden kann, z. B. in Anlagen, die 0 mg/l NO₃-N nicht erreichen können.

Kurz nachdem 0 mg/l Nitrat oder der Redoxknick registriert wurden, ist das System bereit für die nächste aerobe Phase mit Belüf-

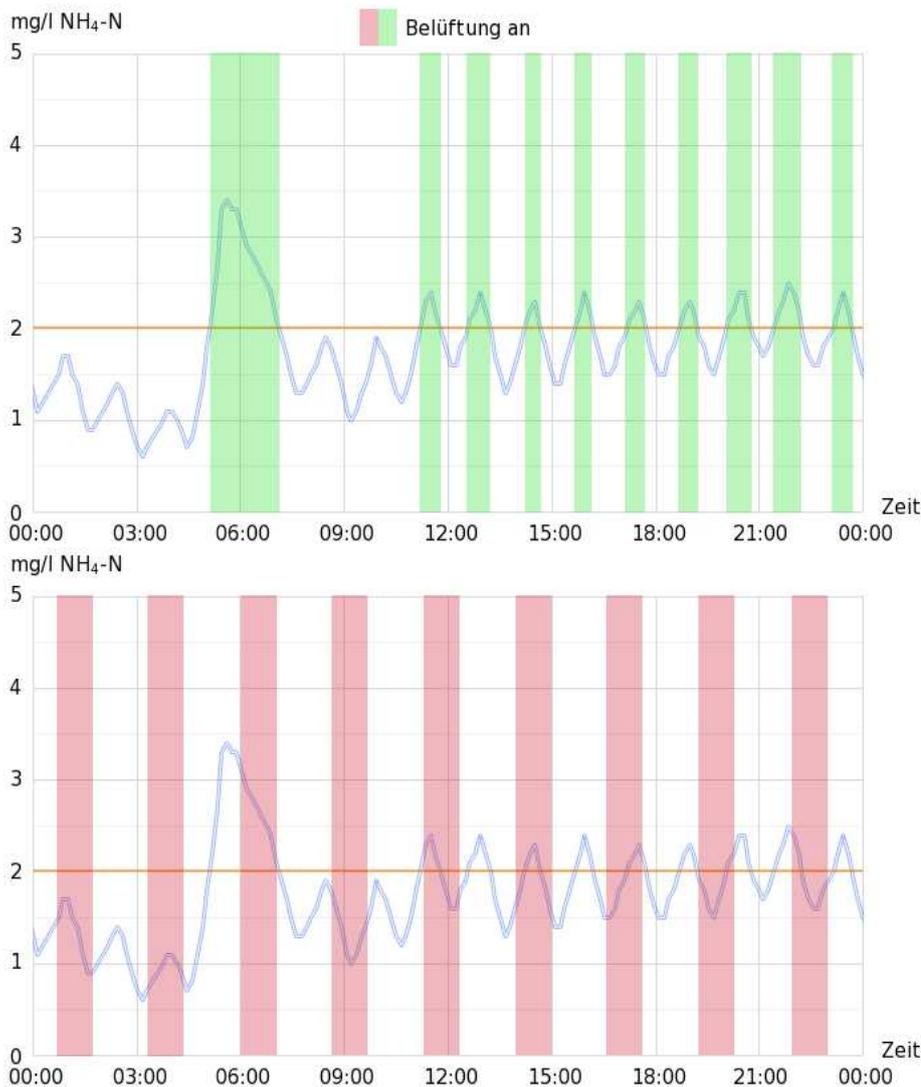


Abbildung 3: Belüftung basierend auf Daten der Ammoniummessung (oben) und regelmäßige, periodische Belüftung (unten).

Hinweis: Die Anlage verfügt über 3 Gebläse, die unabhängig voneinander eingesetzt werden können. Im Diagramm sind nur die Hauptbelüftungsphasen (mindestens 2 der 3 Gebläse aktiv) dargestellt; schwächere Belüftung ist der Übersichtlichkeit wegen nicht abgebildet.

tung.

Ergebnisse und Diskussion

GIMAT hat ein insitu-Multiparameter-Messsystem auf der Kläranlage eines Kunden installiert. Das System besteht aus einer Ammoniumsonde, einer Sonde für gelösten Sauerstoff und einem Controller GICON (Abbildung 2). Die Anlage hat eine Kapazität von 4000 Einwohnerwerten, seine biologische Behandlungsstufe setzt ein Belebtschlammverfahren in einem Belebungsbecken ein. Die Folge dieses verbreiteten Anlagenaufbaus ist, dass die Regelung der Belüftung der Anlage einige Bedingungen erfüllen muss:

1) Es muss ausreichende Belüftung für die sauerstoffverbrauchende Nitrifikation im Belebungsbecken vorgesehen werden.

2) Es muss ausreichende Phasen ohne Belüftung geben, damit sauerstofffreie Zonen im Becken entstehen, in denen die Denitrifikation (die keinen gelösten Sauerstoff toleriert) ablaufen kann.

3) Lange Phasen ohne jegliche Belüftung würden das Gleichgewicht der verschiedenen Bakterienspezies im Belebungsbecken stören und müssen vermieden werden.

Bisher wurde auf der Anlage eine periodische Regelung mit einem Zeit-Pausen-Intervall eingesetzt. Dieses System sah 7,1 h Belüftung

pro Tag vor. In dieser Form betrieben waren die Gebläse für 66% der Gesamtenergiekosten der Anlage verantwortlich.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft Daten von der Kläranlage kurz nach Installation der Ammoniummessung. Ausgewählt wurde ein typischer Betriebstag.

In der oberen Hälfte von Abbildung 3 ist die optimierte Regelung der Belüftung gezeigt (Hauptbelüftungsphasen in grün). Die Regelung basiert auf den gemessenen Ammoniumwerten. Die neu konzipierte Belüftungsstrategie der Anlage verwendet einen Zielwert von 2 mg/l NH₄-N. Ammoniumkonzentrationen über diesem Wert zeigen hohen Sauerstoffbedarf an. Die Gebläse werden angestellt, um den Sauerstoffbedarf zu decken, wenn Werte von 2 mg/l NH₄-N oder höher gemessen werden.

Zusätzlich zu den grün markierten Belüftungszeiten wurden zwei kurze Belüftungsphasen zwischen 00:00 Uhr und 05:00 Uhr und zwei weitere zwischen 07:00 Uhr und 11:00 Uhr eingeschoben (nicht dargestellt), um das Gleichgewicht der Bakterienspezies im Becken zu gewährleisten.

Die Anlage betrachtete im Rückblick die an diesem Tag erhaltenen Daten mit der zuvor eingesetzten Regelung. Wären an diesem Tag die Belüftungszeiten der alten, periodischen Regelung verwendet worden, so wäre wie in der unteren Hälfte von Abbildung 3 (in rot) dargestellt belüftet worden.

Im Vergleich der zwei Graphen ist klar zu erkennen, dass die ammoniumbasierte Regelung dem tatsächlichen Bedarf der Bakterien besser entspricht. Selbst die Belastungsspitze gegen 06:00 Uhr wurde von der neuen Regelung voll abgedeckt. Die alte Regelung dagegen hätte mit der Belüftung eine Stunde zu spät begonnen. Ein Großteil des Ammoniums wäre nicht abgebaut worden, eine wesentliche Verschlechterung der Ablaufwerte wäre die Folge gewesen.

Während der Belüftungsphasen werden die Daten der zusätzlichen Sauerstoffsonde genutzt, um die Belüftungsstärke anzupassen. Falls

die Konzentration an gelöstem Sauerstoff auf über 2 mg/l ansteigt, wird eines der Gebläse abgestellt. Das berücksichtigt, dass die Belüftung am effizientesten ist, solange sich die Sauerstoffkonzentration zwischen 0 und 2 mg/l bewegt. Diese Ergänzung der Regelung verhindert übermäßige Belüftung und Energieverschwendung.

Die neue Regelung der Belüftung wurde mehrere Monate lang getestet und im Anschluss daran dauerhaft übernommen. Nach einem halben Jahr ergab die statistische Auswertung, dass die täglichen Belüftungszeiten auf durchschnittlich 4,6 Stunden reduziert worden waren, 2,5 Stunden weniger als mit dem zuvor eingesetzten Zeit-Pausen-Intervall. Die Einsparungen an Belüftungsenergie belaufen sich auf $2,5 \text{ h} / 7,1 \text{ h} = 35\%$.

Fazit

Die Ammoniummessung war in der Lage, wertvolle Daten zur Verbesserung der Belüftung zu liefern. Eine neue Regelung der Belüftung basierend auf diesen Daten wurde übernommen. Das System ermittelte erfolgreich die Belastungszeiten der Anlage und erlaubte eine daran orientierte Belüftung, wodurch die Leistung der Anlage gesteigert werden konnte. Die Belüftungszeiten konnten im Durchschnitt um 2,5 h oder 35% gesenkt werden.

Wenn sich dieser Trend fortsetzt, wird sich das System bereits nach zwei Jahren amortisiert haben.