

Case Study:

Messung deckt massive N₂O-Emissionen im SBR auf: 99 % Reduktion durch gezielte Prozessoptimierung

Bietigheim-Bissingen

Die Fallstudie basiert auf der Masterarbeit: „Treibhausgasbilanzierung der Kläranlage Nesselwörth nach DWA-M 230 – Aufstellung einer Klimabilanz und prozesstechnische Optimierung“, Robin Weiblen, August 2025, Hochschulen Esslingen, Nürtingen, Reutlingen und Stuttgart

Key facts

- Bis zu 5000t Einsparung möglich
- Durchführung innerhalb 6 Monaten
- Human in the loop Optimierung mit Hilfe von Cloudbasierten Daten
- Darstellung in EmiCo Insight



1. Einleitung

In kommunalen Kläranlagen entstehen Treibhausgasemissionen insbesondere durch biologische Umsetzungsprozesse, bei denen neben Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) vor allem Lachgas (Distickstoffmonoxid, N₂O) eine zentrale Rolle spielt. Aufgrund seines hohen Treibhauspotenzials kann N₂O selbst bei vergleichsweise geringen Konzentrationen einen maßgeblichen Beitrag zur Klimawirkung der Abwasserbehandlung leisten.

Zur Bewertung dieser Emissionen werden in der Praxis häufig Emissionsfaktoren aus der Literatur herangezogen, die auf typischen Durchschnittswerten basieren. Solche pauschalen Ansätze können jedoch standortspezifische Betriebsbedingungen und Prozessdynamiken nur eingeschränkt abbilden und führen insbesondere bei Sonderverfahren zu erheblichen Unsicherheiten.

Der in dieser Fallstudie untersuchte Sequencing Batch Reactor (SBR) stellt eine Sonderform der biologischen Prozesswasserbehandlung im Nebenstrom dar. Nicht alle Anlagen setzen SBR-Systeme zur Zentratbehandlung ein, zudem unterscheiden sich diese Reaktoren deutlich hinsichtlich ihrer spezifischen Betriebs- und Steuerungsweise.

Zunächst wurden die Treibhausgasemissionen der Anlage auf Grundlage eines literaturbasierten Emissionsfaktors abgeschätzt, der aus der Gesamtstickstoff-Eliminationsrate der Kläranlage abgeleitet wurde. Auf dieser Basis ergaben sich für das Belebungsbecken im Hauptstrom Emissionen von 1.397 t CO₂e pro Jahr sowie für den SBR im Nebenstrom lediglich 255 t CO₂e pro Jahr.

Im Anschluss erfolgte eine direkte Messung der realen Emissionen des SBR-Systems. Hierzu wurden die Emissionen von N₂O, CO₂ und CH₄ mit einem EmiCo lite Messsystem erfasst, das mit zwei auf der Wasseroberfläche installierten Messhauben ausgestattet war.

Die Messdaten zeigten einen unvorhergesehen hohen Emissionsbeitrag der Prozesswasserbehandlung: Für den untersuchten SBR wurde eine tatsächliche jährliche Emission von 5.318 t CO₂e messtechnisch ermittelt und damit ein Wert, der die literaturbasierte Abschätzung deutlich überstieg. Die Auswertung ergab zudem, dass bis zu 25 % der zugeführten Stickstofffracht als Lachgas entwich, während in der Literatur Werte bis 2 % angegeben werden.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung standortspezifischer Messungen als Grundlage für eine belastbare Emissionsbewertung und gezielte Minderungsmaßnahmen in der biologischen Abwasserbehandlung.

2. Messung und Aufbau der untersuchten Biologie

Messung im SBR zur Nebenstrombehandlung



Abbildung 1: Luftbild des untersuchten SBRs mit schematisch eingezeichneten Hauben

Im vorliegenden Fall wurde der SBR nicht nur zur Behandlung des bei der Entwässerung des ausgefallten Schlammes entstehende stickstoffhaltigem Prozesswassers eingesetzt, sondern auch zur Behandlung externer Industrieabwässer.

Das SBR-Verfahren ist ein Sonderverfahren der intermittierenden Nitrifikation/Denitrifikation, bei dem sämtliche biologischen Reinigungsprozesse sowie die Sedimentation in einem Becken ablaufen. Der Reinigungsprozess folgt dabei einer definierten Zeitachse: Abwasserzufuhr und -entnahme erfolgen diskontinuierlich, sodass sich aerobe und anoxische Phasen zyklisch abwechseln.

Messsystem und Messprinzip

Die Erfassung der gasförmigen Emissionen erfolgte mittels des Messsystems EmiCo lite der Variolytics GmbH. Hierzu wurden zwei schwimmende Kunststoffhauben auf dem SBR-Becken installiert, die die während der Belüftung freigesetzten Gase erfassen. Der unter den Hauben entstehende Abluftstrom wurde kontinuierlich abgesaugt und über beheizte Schläuche dem Messgerät zugeführt.

Im Gerät wird aus dem jeweiligen Haubenluftstrom abwechselnd ein Teilstrom entnommen und mittels einer Membranpumpe der Analytik zugeführt. Die Gasanalyse erfolgt kontinuierlich über einen nichtdispersiven Infrarot-Analysator (NDIR) zur Bestimmung von Distickstoffmonoxid (N_2O), Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2). Ergänzend wird die Sauerstoffkonzentration mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Zusätzlich werden Ablufttemperatur und Volumenstrom erfasst.

Das System ist speziell für den Einsatz auf Kläranlagen konzipiert und ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung der Treibhausgase im Abluftstrom biologischer Reaktoren. An ein EmiCo lite können zwei Gassammelhauben angeschlossen werden, wobei die Probenahme alternierend zwischen beiden Messpunkten erfolgt.

Die Berechnung der Emissionsraten basiert auf den gemessenen Gaskonzentrationen sowie dem erfassten Volumenstrom unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Gasdichte.



Abbildung 2: Screenshot der aktuellen Version der Variolytics Insight Software

Die Messdaten wurden in Echtzeit an die Variolytics-Cloud übertragen und konnten über die Variolytics Insight Software über gewöhnliche Browser abgerufen und ausgewertet werden. Die App ermöglichte eine übersichtliche Darstellung der Emissionsdaten an beiden Messpunkten, den Export der Messdaten im .xlsx-Format sowie die Berechnung kumulierter N_2O - und CH_4 -Emissionen über definierte Zeiträume, gewichtet nach ihrem Global Warming Potential (GWP).

Mit der Insight-App stand ein direkter Überblick über die Emissionsdynamik im Prozess zur Verfügung, was insbesondere im Rahmen von Prozessoptimierungen von hoher Relevanz ist. Im vorliegenden Fall wurden verschiedene Betriebsparameter gezielt angepasst. Deren Effekt auf die Lachgasemissionen konnten unmittelbar über das Messsystem verfolgt werden.

3. Ergebnisse

Die für diese Fallstudie relevanten Messungen wurden in einem Zeitraum von Ende März bis Juni 2025 durchgeführt. Die Messkampagne zur quantitativen Emissionsbewertung umfasste dabei einen repräsentativen zweiwöchigen Zeitraum im Frühjahr, während sich daran anschließend Optimierungsversuche zur Emissionsminderung bis in den Juni erstreckten.

Die Analyse der zeitlichen Emissionsmuster zeigte, dass Distickstoffmonoxid (N_2O) überwiegend während der anoxischen Denitrifikationsphasen gebildet und zu Beginn der nachfolgenden Nitrifikationsphasen infolge der Belüftung ausgetrieben wurde. Vor diesem Hintergrund wurden drei betriebliche Ansätze zur Reduktion der Lachgasemissionen untersucht: (i) eine Verlängerung der Denitrifikationsdauer durch Verringerung der täglichen Zyklusanzahl, (ii) eine reduzierte Zugabegeschwindigkeit der externen Kohlenstoffquelle (Glycerin) sowie (iii) eine Erhöhung des CSB/N-Verhältnisses in der Denitrifikation.

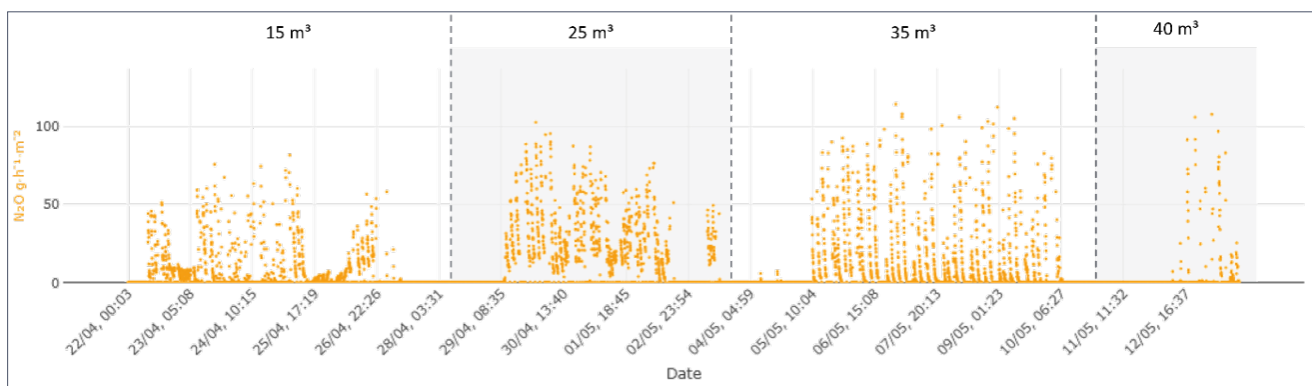


Abbildung 3: Lachgasemissionen bei unterschiedlicher Zykluszahl und -länge

Im Rahmen eines ersten Ansatzes wurde geprüft, ob eine Verringerung der Zyklusanzahl und damit eine Verlängerung der aeroben und anoxischen Phasen zu einer Minderung der N_2O -Emissionen führt. Hierzu wurde die Beschickungsmenge pro Zyklus schrittweise erhöht, sodass größere Chargenvolumina (von 15 m³ bis 40 m³) behandelt wurden. Diese Anpassung zeigte jedoch keinen positiven Effekt auf die Lachgasemissionen (siehe Abbildung 3).

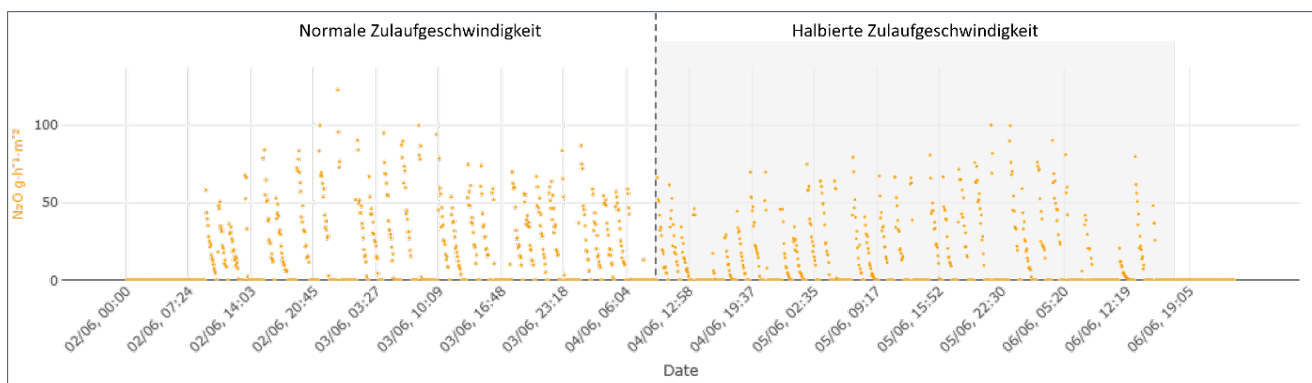


Abbildung 4: Lachgasemissionen bei veränderter Zugabegeschwindigkeit der Kohlenstoffquelle

Anschließend wurde untersucht, ob kurzfristige CSB-Stöße infolge der Kohlenstoffdosierung die N_2O -Bildung begünstigten. Die Dosiergeschwindigkeit der externen Kohlenstoffquelle wurde hierfür halbiert. Auch dieses Vorgehen führte – trotz zusätzlich verlängerter Denitrifikationsphasen – nicht zu einer Reduktion der Lachgasemissionen, sodass Dosierspitzen in diesem Fall nicht als primärer Einflussfaktor identifiziert wurden (siehe Abbildung 4).

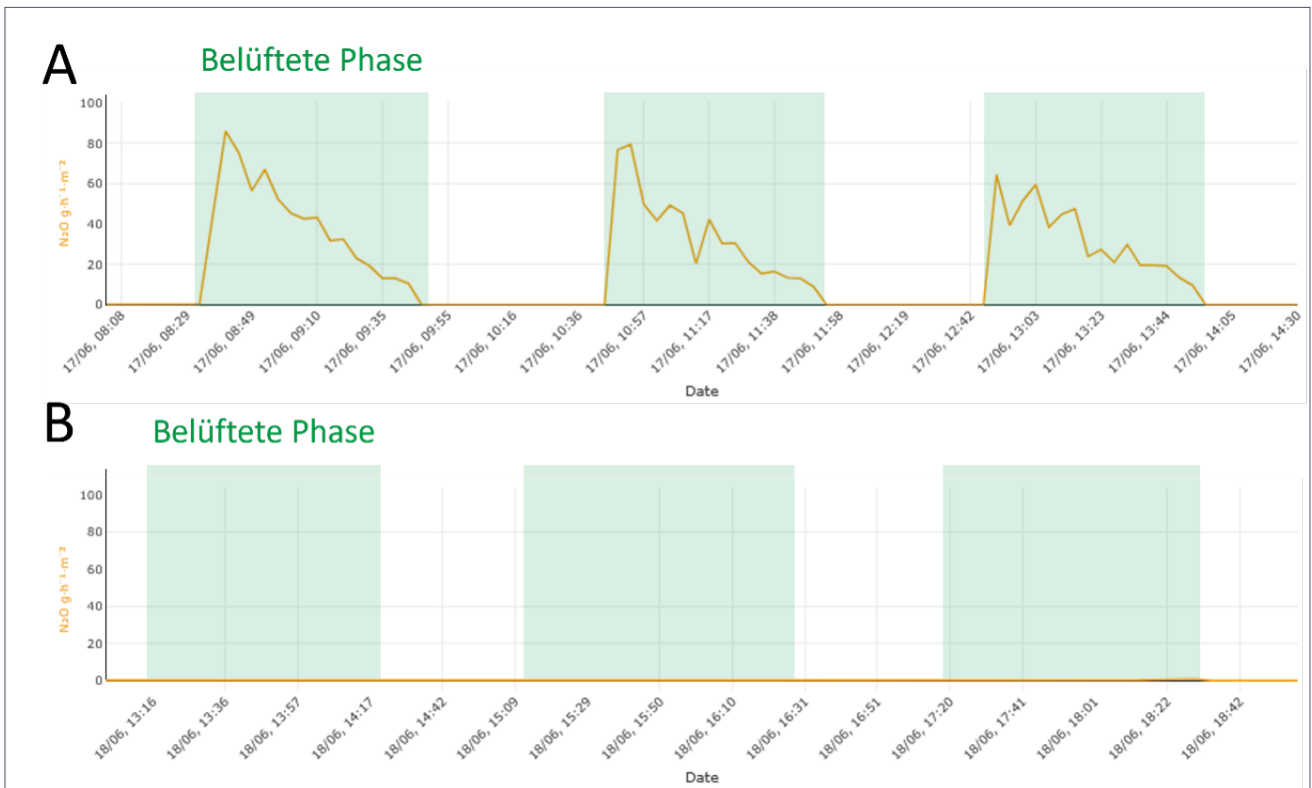


Abbildung 5: Lachgasemissionen bei ursprünglicher (A) und erhöhter Kohlenstoffdosierung (B).

Erst durch die gezielte Erhöhung des CSB/N-Verhältnisses in der Denitrifikationsphase konnte eine deutliche Emissionsminderung erreicht werden (siehe Abbildung 5). Eine Steigerung der Kohlenstoffzugabe von 5 L auf 8 L pro m³ Zentrat bewirkte im konkreten Fall eine Reduktion der Lachgasemissionen um bis zu 99 %. In nachfolgenden Optimierungsversuchen zeigte sich zudem, dass bereits eine Dosierung von etwa 6 L pro m³ Zentrat ausreichte, um einen vergleichbaren Effekt zu erzielen.

Die hohe relative Reduktion ist insbesondere vor dem Hintergrund zu interpretieren, dass die Ausgangsemissionen des untersuchten SBR deutlich über den in der Literatur typischerweise erwarteten Bereichen lagen. Die Ergebnisse beziehen sich somit spezifisch auf die betrachtete Prozesswasserbehandlung und erlauben keine unmittelbare Übertragbarkeit auf andere Kläranlagen oder SBR-Systeme.

4. Zusammenfassung

Diese Fallstudie verdeutlicht, dass pauschale Emissionsfaktoren die tatsächlichen Treibhausgasemissionen biologischer Klärprozesse erheblich unterschätzen können. Nur durch direkte Messungen in Kombination mit einer detaillierten Analyse der betrieblichen Emissionsmuster lassen sich die realen Ursachen identifizieren und gezielte, wirksame Minderungsmaßnahmen ableiten.

Im vorliegenden Fall konnte durch eine datengestützte Optimierung der Denitrifikationsbedingungen mit vergleichsweise geringem betrieblichem Mehraufwand eine nahezu vollständige Reduktion der Lachgasemissionen am untersuchten SBR erreicht werden (bis zu -99 %). Das entspricht einer Einsparung von rund 5.000 Tonnen CO₂-Äquivalente. Auch wenn die Ergebnisse aufgrund der spezifischen Betriebs- und Steuerungsweise dieses Nebenstrom-SBRs nicht unmittelbar auf andere Anlagen übertragbar sind, zeigt das Beispiel, das erhebliche Potenzial standortspezifischer Prozessoptimierung für die Klimaschutzstrategie kommunaler Kläranlagen.

Ein zentraler Faktor war dabei die kontinuierliche Emissionsüberwachung und die unmittelbare Verfügbarkeit der Messdaten über die Insight-App. Die Anwendung ermöglichte eine schnelle Überprüfung des Einflusses betrieblicher Anpassungen in Echtzeit und unterstützte damit eine iterative, datenbasierte Optimierung der Prozessführung.

Damit liefert die Fallstudie ein praxisnahes Beispiel, wie digitale Emissionsmessung und Prozesssteuerung einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Abwasserbehandlung leisten können.

