

## Case Study:

Ganzjährige Messung identifiziert Emissionsmuster und gezielte Optimierungshebel.

## Schweinfurt



## Key facts

- Auch bei Anlagen mit niedrigem Emissionsfaktor kann Auswertung der Lachgasmessung Optimierungspotentiale aufzeigen.
- Der Einsatz eines industriellen Gateways erleichtert die zeitlich hochaufgelöste und synchrone Zusammenführung aller Datenströme.
- Bei intermittierend betriebenen Becken lassen sich anhand der Emissionsmuster bereits Rückschlüsse darauf ziehen, ob Lachgas während der Nitrifikation oder Denitrifikation entsteht.



## 1. Einleitung

Lachgasmessungen dienen nicht nur dem reinen Monitoring von Treibhausgasemissionen, sondern können auch ein wichtiger Ausgangspunkt für eine gezielte Prozessoptimierung sein. Im vorliegenden Fall wurde untersucht, welche Prozesszustände zu erhöhten Lachgasemissionen führen und welche betrieblichen Maßnahmen geeignet sind, um diese Emissionen zu verringern. Die Datenauswertung erfolgte dabei auf Basis der gemessenen Lachgaswerte sowie ergänzender Prozess- und Betriebsdaten der Anlage. Auf dieser Grundlage wurden Optimierungsvorschläge entwickelt, die eine nachhaltige Reduktion der Lachgasemissionen unterstützen sollen. Darüber hinaus kann eine solche Prozessanalyse auch genutzt werden, um neben dem Klimaschutz weitere betriebliche Parameter und die Gesamtleistung der biologischen Stufe zu verbessern.

In der vorliegenden Fallstudie wurde an einer Kläranlage mit 165.000 EW ohne separate Prozesswasserbehandlung über ein ganzes Jahr die Emissionen der biologischen Stufe (Belebungsbecken) gemessen. Zur Analyse wurden die Emissionen der Kläranlage zunächst auf Grundlage des sogenannten „Wiener Modells“ abgeschätzt. So wurden anhand standardisierter Emissionsfaktoren jährliche Lachgasemissionen von 65 t CO<sub>2</sub>-Äq. berechnet. Die reale Messung zeigte hingegen, dass lediglich Lachgasemissionen im Umfang von rund 55 t CO<sub>2</sub>-Äq. anfielen. Auch wenn in diesem Fall der Unterschied zwischen Messung und Berechnung vergleichsweise klein ausfällt, zeigt das Ergebnis die Ungenauigkeit der Abschätzung von Emissionen anhand von Modellen. Außerdem zeigte sich, dass die untersuchte Kläranlage eine sehr effiziente biologische Stufe betreibt.



## 2. Messung und Aufbau der untersuchten Biologie

### Messsystem und Messprinzip

Die Lachgas- und Methanemissionen der Becken wurden mittels Haubenmessungen erfasst. Dabei wurde ein EmiCo lite mit zwei schwimmenden Gashauben eingesetzt, welches kontinuierlich die Konzentrationen von  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$  in der Abluft misst. Die Messung basiert auf einem nichtdispersiven Infrarot-Gasanalyser (NDIR) zur Detektion von  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$  und wird durch ergänzende Sensorik zur Erfassung der Messgrößen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Temperatur und Durchfluss ergänzt.



Abbildung 1: Aufbau des EmiCoLite Systems am untersuchten Belebungsbecken

### Messung in intermittierendem Becken

Die Emissionsmessungen wurden an den intermittierend belüfteten Becken der biologischen Stufe einer Kläranlage mit 165.000 EW durchgeführt. Intermittierende Becken zeichnen sich dadurch aus, dass sich belüftete und unbelüftete Phasen im Betrieb abwechseln. Dadurch finden Nitrifikation und Denitrifikation nicht räumlich getrennt, sondern zeitlich versetzt im selben Becken statt. Diese Betriebsweise ermöglicht eine flexible Steuerung der Stickstoffelimination durch wechselnde aerobe und anoxische Bedingungen.

Bei der Messung an intermittierenden Becken können bereits die Muster der Lachgasemissionen einen ersten Hinweis darauf geben, ob Lachgas hauptsächlich in der Denitrifikation oder Nitrifikation entsteht.

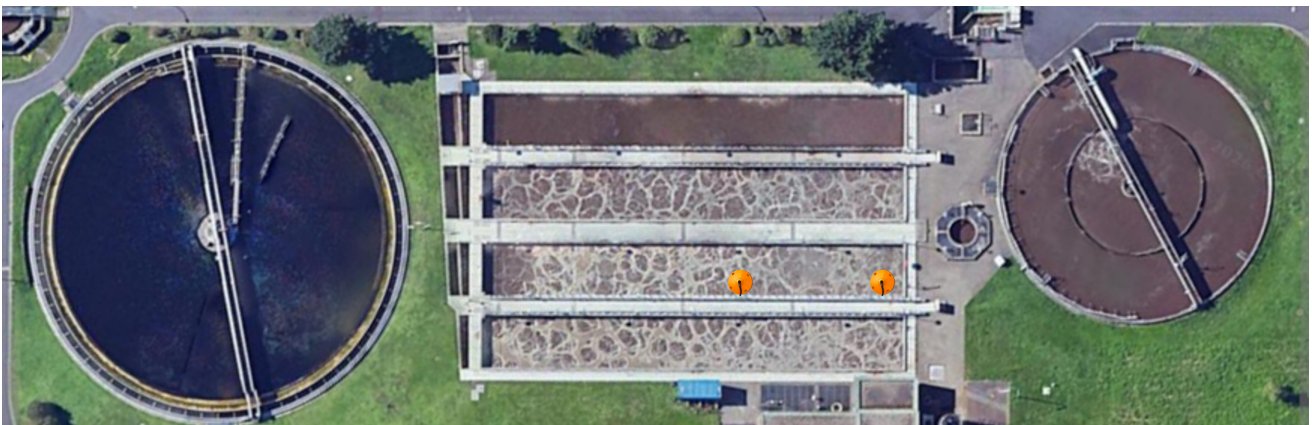


Abbildung 2: Luftbild des untersuchten Belebungsbeckens mit schematisch eingezeichneten Hauben

### 3. Ergebnisse

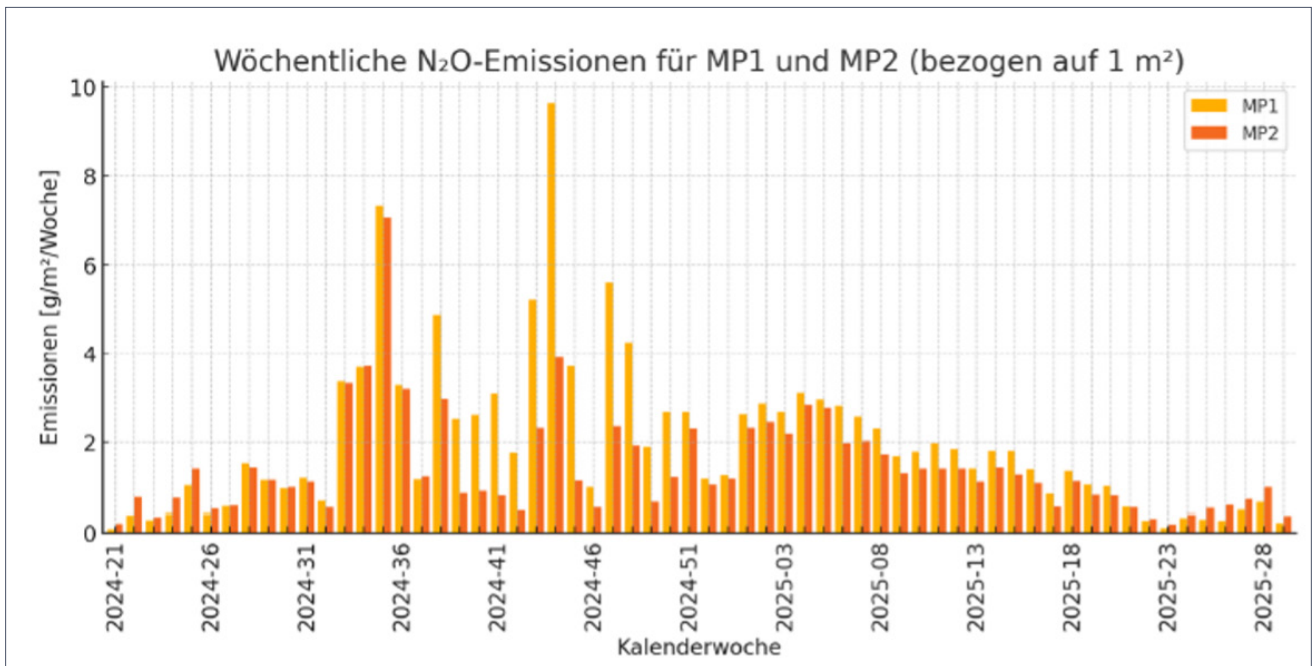


Abbildung 3: Wöchentliche Lachgasemissionen im untersuchten Zeitraum (KW21 2024 bis KW29 2025)

Die ausgewerteten Messungen wurden von Ende Mai 2024 bis Ende April 2025 durchgeführt (siehe Abbildung 3). Dadurch konnten auch jahreszeitliche Schwankungen abgebildet werden. Die Treibhausgasemissionen unterlagen im Jahresverlauf deutlichen saisonalen Schwankungen (siehe Abbildung 1). Insgesamt waren die höchsten Monats-Emissionen im August bis Februar zu verzeichnen.

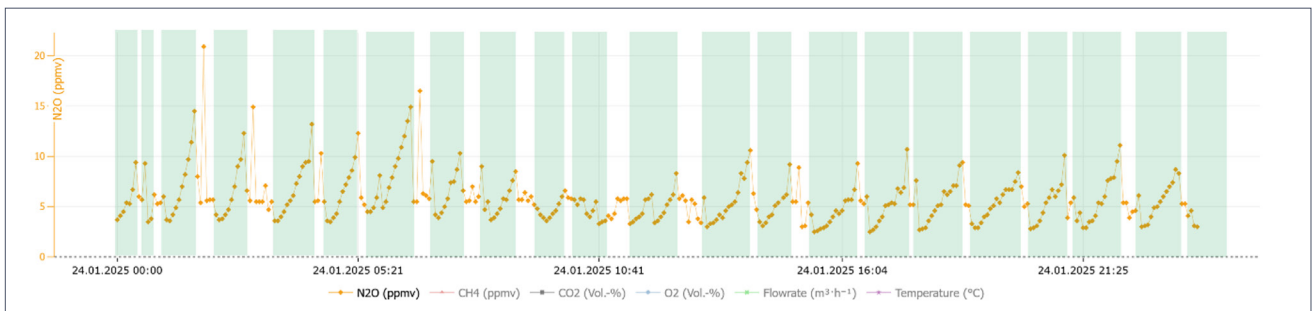


Abbildung 4: Typisches Tagesgangprofil der N<sub>2</sub>O-Emission. Belüftete Phasen sind grün hinterlegt. Deutlich zu sehen ist der Anstieg der Lachgaskonzentration in belüfteten Phasen. Dieses Emissionsmuster weist darauf hin, dass das Lachgas in der Nitrifikation entsteht.

Die Analyse feinauflösender Messdaten ergab charakteristische Tagesgangmuster der Emissionen. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den 24-Stunden-Verlauf der Lachgaskonzentration über einem Becken an einem Wintertag (24. Januar 2025). Deutlich erkennbar ist Lachgasbildung während der Nitrifikationsphase. Würde Lachgas in der Denitrifikationsphase akkumulieren, würde mit Beginn der Belüftung Lachgas gestrippt werden, die Konzentration sofort einen maximalen Wert einnehmen und während der Nitrifikationsphase kontinuierlich abnehmen.

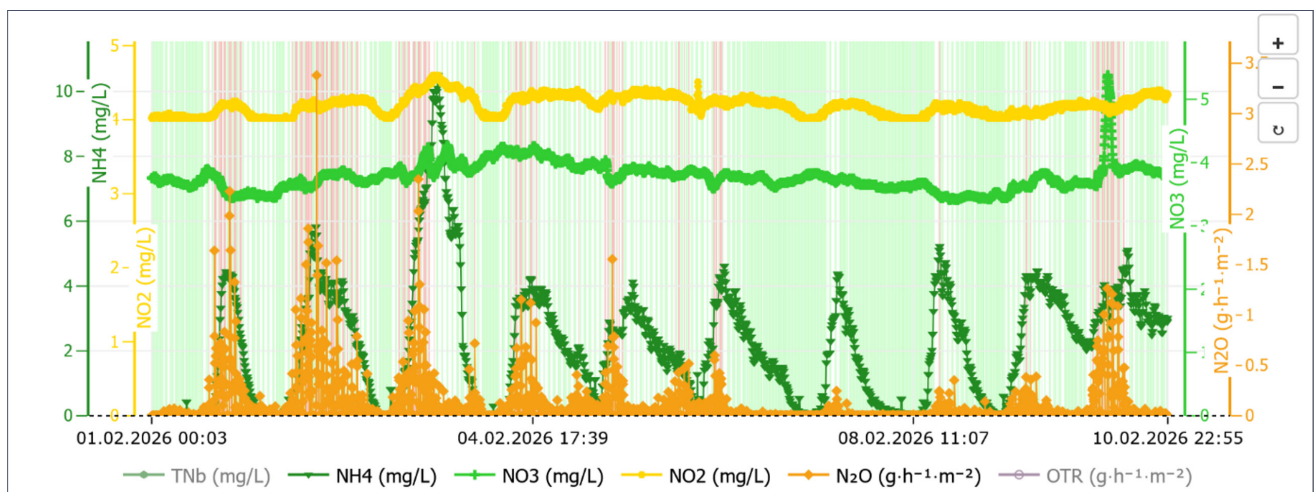
Für Lachgas wird häufig der Emissionsfaktor in Bezug auf die behandelte Stickstofffracht angegeben (N<sub>2</sub>O-N [%] der Zulaufstickstoffmenge im Zulauf der Kläranlage). Der Emissionsfaktor wurde über den Messzeitraum auf Basis wöchentlicher Mittelwerte der Emissionsraten und Stickstofffrachten berechnet (Abbildung 4). Im Berichtsjahr betrug dieser Faktor etwa 0,096 %. Zum Vergleich: der IPCC-Standardansatz unterstellt einen Default-Wert von 1,6 % N<sub>2</sub>O-N bezogen auf den Zulaufstickstoff. Der für diese Anlage errechnete Wert lag deutlich darunter, was für einen sehr guten Zustand der biologischen Reinigungsstufe spricht.

## Prozessanalyse und -optimierung

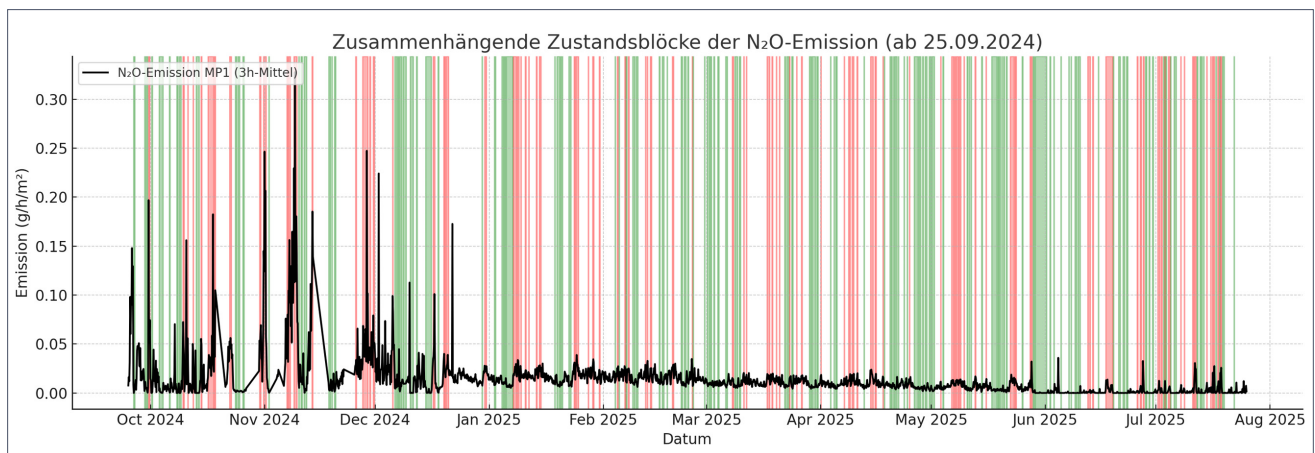
Für die vertiefte Prozessanalyse wurden die kontinuierlich erfassten Emissionsdaten mit den relevanten Betriebs- und Prozessparametern der Anlage synchronisiert ausgewertet. Hierzu wurden sowohl die Offgas-Messdaten ( $N_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , Volumenstrom) als auch ausgewählte Prozessdaten aus dem Leitsystem über ein industrielles Gateway-System automatisiert erfasst und in Echtzeit in eine zentrale, cloudbasierte Analyseumgebung übertragen.

Die zeitlich hochaufgelöste und synchrone Zusammenführung aller Datenströme bildete die Voraussetzung für eine konsistente Korrelations- und Zustandsanalyse. Insbesondere konnte dadurch sichergestellt werden, dass Emissionsereignisse exakt den jeweiligen Betriebszuständen (z.B. Belüftungsintensität, Schlammalter, C/N-Verhältnis, Rücklaufschlammrate) zugeordnet werden.

Auf Basis dieser integrierten Datengrundlage wurde eine dynamische Zustandsklassifikation implementiert, bei der die Emissionsraten in einem rollierenden Zeitfenster statistisch bewertet und in emissionsarme („gute“), neutrale und emissionsintensive („schlechte“) Betriebszustände eingeteilt wurden (siehe Abbildung 5). Die Klassifikation ermöglichte es, nicht nur Einzelereignisse zu betrachten, sondern systematisch wiederkehrende, emissionsrelevante Prozessmuster zu identifizieren.

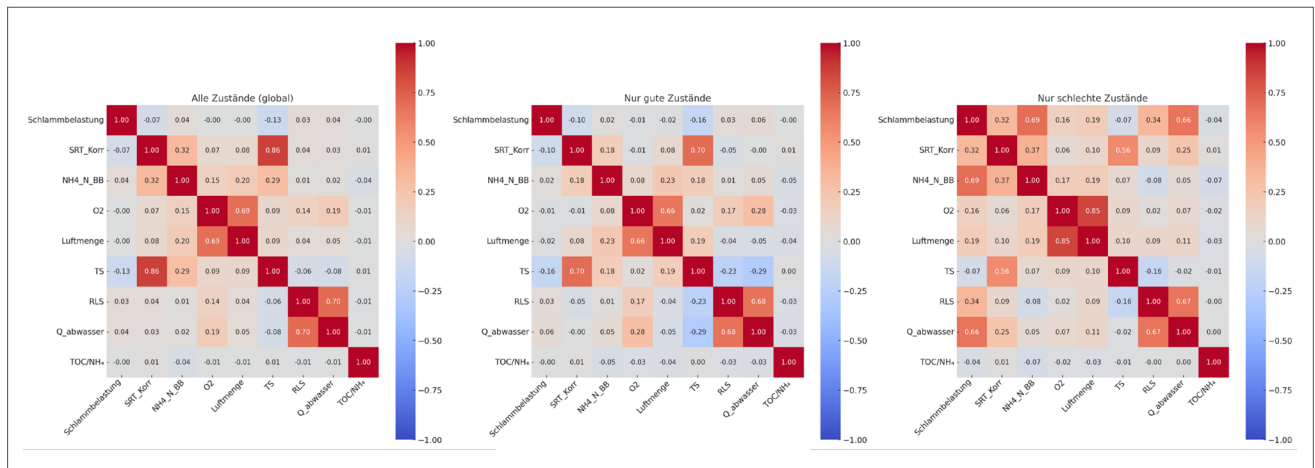


**Abbildung 5:** Beispiel einer zustandsbasierten Klassifizierung des Anlagenbetriebs auf Basis von  $N_2O$ -Emissionsrate, Stickstoffparametern und Offgas-basierten Prozessindikatoren. Dargestellt sind zeitliche Verläufe sowie die Einteilung in emissionsarme (grün), neutrale (weiß) und emissionsintensive (rot) Betriebszustände.



**Abbildung 6:** Klassifikation zusammenhängender Prozesszustände anhand der  $N_2O$ -Emissionen (3-Stunden-Mittel) an MP1 ab dem 25.09.2024. Grün markiert sind „gute“ Zustände mit niedrigen Emissionen, rot markiert „schlechte“ Zustände mit erhöhten Emissionen. Die Klassifikation basiert auf einer dynamischen Analyse der Emissionsverteilung im rollierenden 2-Wochenfenster. Sie dient der Identifikation emissionsrelevanter Betriebsbedingungen.

Trotz der sehr guten Werte konnten Phasen mit hohen und niedrigen Emissionsraten identifiziert werden. Hierzu wurde ein rollierendes 2-Wochen-Fenster eingesetzt, innerhalb dessen die Verteilung der gemittelten  $N_2O$ -Emissionsraten analysiert wurde (siehe Abbildung 6). Auf dieser Grundlage wurden sogenannte „gute“ und „schlechte“ Zustände klassifiziert.



**Abbildung 7:** Ergebnis der Korrelationsanalyse der verschiedenen Betriebsparameter. Darstellung aller Daten (A) und geclustert in gute (B) und schlechte (C) Prozesszustände.

In einer umfangreichen Korrelationsanalyse wurden neun Betriebsparameter der biologischen Reinigungsstufe untersucht: Schlammbelastung, korrigiertes Schlammalter, Ammoniumkonzentration im Belebungsbecken, Sauerstoffgehalt, Belüftungsrate, Trockenmassegehalt, Rücklaufschlammrate, Abwasserzulauf, sowie das Verhältnis organische Kohlenstoffverfügbarkeit zu Ammonium. Die Korrelationen dieser Kenngrößen wurden sowohl für den Gesamtdatensatz (global) als auch getrennt für Betriebsphasen mit geringen Treibhausgas-Emissionen („gute“ Zustände) und Phasen mit erhöhten Emissionen („schlechte“ Zustände) analysiert (siehe Abbildung 6).

Global betrachtet zeigen sich erwartungsgemäß enge Beziehungen zwischen verschiedenen Steuerungsparametern: Beispielsweise korrelieren Schlammalter und Schlammbelastung stark negativ (ein höheres Schlammalter geht mit geringerer F/M-Belastung einher), während die Belüftungsintensität und gelöster Sauerstoff positiv korrelieren (mehr Luftzufuhr erhöht den  $O_2$ -Gehalt im Becken).

Während schlechter Betriebszustände lösten sich bestimmte Parameterbeziehungen, die im Normalbetrieb galten, auf oder kehrten sich sogar um. So wurde beispielsweise beobachtet, dass an Tagen mit gestörter Biologie zusätzliche Lachgasbildung auftrat, die nicht mehr linear mit der umgesetzten Stickstofffracht zunimmt, sondern überproportional ansteigt. Die höchsten Lachgas-Emissionsfaktoren traten in der Analyse genau dann auf, wenn die Denitrifikation gehemmt war. In diesen „schlechten“ Zuständen wurden oft Nitritakkumulation im Ablauf und einen Abfall des  $TOC/NH_4$ -Verhältnisses registriert. Das ist ein klares Indiz dafür, dass Kohlenstoffmangel und unvollständige Denitrifikation vorliegen. Entsprechend zeigt der Korrelationsplot für schlechte Zustände deutliche Abweichungen: So besteht in schlechten Zuständen eine starke negative Korrelation zwischen  $TOC/NH_4$  und  $N_2O$ -Emission, d.h. niedrige C/N-Verhältnisse gehen mit hohen Lachgasraten einher, was die Bedeutung der Kohlenstoffverfügbarkeit unterstreicht.

Insbesondere Parameterkombinationen, die mit Stickstoffumsatz und Denitrifikation zu tun haben, zeigen in schlechten Phasen auffällige Verschiebungen: z.B. ein hoher Rücklaufschlammanteil korreliert in diesen Phasen nicht mehr positiv mit Nitratabbau wie sonst, da die Denitrifikation insgesamt stockt.

Für die Denitrifikation lautete die konkrete Handlungsempfehlung daher für effektive anoxische Bedingungen und genügend organische Kohlenstoffquelle sorgen. Ein hohes TOC/N-Verhältnis begünstigt, dass die mikrobielle Gemeinschaft Nitrat bis zum Ende ( $N_2$ ) reduzieren kann. Bei zu geringem C/N dagegen bleibt vermehrt  $N_2O$  als Zwischenprodukt stehen. So kann durch Anhebung des C/N-Verhältnisses (etwa durch veränderte Rezirkulationsraten, Co-Substratzugabe oder Optimierung der anaeroben Vorklärung) die  $N_2O$ -Emission verringert werden, da mehr  $N_2O$  zu  $N_2$  weiterreduziert werden kann. Zusätzlich schafft eine Verlängerung der phasenweisen Abschaltung der Belüftung ausreichend lange anoxische Intervalle, in denen die Denitrifikation ablaufen kann.

Aber auch in der Nitrifikation kam es zur Lachgasbildung. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zeigten deutlich, dass Sauerstoffunterversorgung und unzureichende Schlammalter vermieden werden müssen. Entsprechend den DWA-Empfehlungen (vgl. DWA-M 229-1) sollte die Belüftung so geführt werden, dass im Nitrifikationsphasen dauerhaft ein ausreichender  $O_2$ -Gehalt herrscht (üblich sind ca. 1–2 mg/L). Andernfalls drohen Nitritbildung und daraus resultierende Lachgasproduktion. In der Praxis bedeutet das, Spitzenbelastungen frühzeitig zu erkennen und diesen mit erhöhter Belüfterleistung zu begegnen, um einen  $O_2$ -Abfall unter die kritische Schwelle zu verhindern. Gleichzeitig darf die Biomassekapazität nicht zum limitierenden Faktor werden: Das temperaturkorrigierte Schlammalter ist insbesondere in kalten Wintermonaten hoch genug zu halten, damit ausreichend Nitrifikanten verfügbar sind. Falls notwendig, sind die Überschussschlammabzüge anzupassen oder die Beckenbevorratung zu erhöhen, um ein Absinken des SRT unter den Mindestwert zu vermeiden.

Diese Fallstudie zeigt, dass auch bei sehr gut betriebenen Anlagen durch die Offgas-Analyse und Lachgas-Signale als Indikator Optimierungspotential identifiziert werden kann, woraus sich konkrete Maßnahmen ableiten lassen, welche die Lachgasemissionen reduzieren. Zentrales Ziel ist stets eine stabile und vollständige Nitrifikation und Denitrifikation sicherzustellen.

## 4. Zusammenfassung

Die vorliegende Fallstudie zeigt, dass auch bei einer sehr effizient betriebenen großtechnischen Kläranlage mit insgesamt niedrigem Emissionsfaktor gezielt emissionsrelevante Prozesszustände identifiziert werden können. Die kontinuierlichen Haubenmessungen über ein gesamtes Jahr verdeutlichten saisonale Schwankungen sowie charakteristische Tagesgangmuster, die darauf hinweisen, dass die Lachgasbildung im vorliegenden Fall überwiegend während der Nitrifikation erfolgt. Gleichzeitig konnten innerhalb des Messzeitraums Phasen mit deutlich erhöhten Emissionen von stabilen Betriebszuständen abgegrenzt werden.

Die Kombination aus dynamischer Zustandsklassifikation und Korrelationsanalyse ermöglichte es, zentrale Einflussgrößen für erhöhte  $N_2O$ -Emissionen herauszuarbeiten. Insbesondere eine eingeschränkte Denitrifikation bei niedriger Kohlenstoffverfügbarkeit sowie Sauerstofflimitierungen in der Nitrifikation erwiesen sich als wesentliche Treiber für Emissionsspitzen. Daraus lassen sich konkrete betriebliche Optimierungsmaßnahmen ableiten, wie die Sicherstellung ausreichender anoxischer Reaktionszeiten, eine Verbesserung des C/N-Verhältnisses sowie eine stabile Sauerstoffversorgung in nitrifizierenden Phasen.

Insgesamt unterstreicht die Studie, dass Online-Lachgasmessungen nicht nur eine realistische Emissionsbewertung ermöglichen, sondern auch ein wirkungsvolles Instrument zur Prozessdiagnose und Betriebsoptimierung darstellen. Selbst bei Anlagen mit sehr niedrigen Gesamtemissionen können dadurch gezielt Maßnahmen entwickelt werden, um Lachgasbildung weiter zu minimieren und gleichzeitig die Stabilität der biologischen Stickstoffelimination langfristig zu sichern.

