

Case Study:

Optimierte Zulaufstrategie senkt Lachgasemissionen im Nebenstrom um rund 70%.

Reutlingen



Key facts

- Einsparung von rund 70% der Lachgasemissionen durch Anpassung der Zugabegeschwindigkeit des Prozesswassers
- Muster der Emissionen weist auf Probleme in der Denitrifikation hin
- Von Messbeginn zu ersten Optimierungsvorschlägen in nur sechs Monaten



1. Einleitung

Die Nebenstrombehandlung von hochkonzentriertem Stickstoff (z.B. Faulschlamm-Prozesswasser) stellt eine besondere Herausforderung dar. In vielen Kläranlagen wird das beim Schlammfäulungsprozess anfallende Prozesswasser mit hohen Ammonium (NH_4^+)-Konzentrationen ($>1 \text{ g/L}$) separat in Sequencing Batch Reaktoren (SBR) oder ähnlichen Systemen behandelt. Durch die hohe Ammoniumfracht und oft geringe Kohlenstoff-Verfügbarkeit sind diese Prozesse potenziell stärkere Lachgas (N_2O) -Quellen pro Stickstoffeinheit als herkömmliche Hauptstrom-Prozesse. Zugleich bieten sie aber die Möglichkeit, durch gezielte Betriebsweise Emissionen zu steuern, da die Zulaufbelastung hier separat dosiert werden kann.

Vor dem Hintergrund potentiell hoher N_2O Emissionen zielten die vorliegende Untersuchung darauf ab, die N_2O -Emissionen in einem großtechnischen SBR-Nebenstromprozess zu untersuchen und Zusammenhänge zur Betriebsführung zu finden. Beginnend mit einer Observierungsphase wurden hohe Emissionen beobachtet. Dabei wurden 20 bis 30 % des eingetragenen Stickstoffs in Form von Lachgas freigesetzt, was dem sogenannten Emissionsfaktor (EF) entspricht. Durch Korrelation der Abluftmessdaten mit den Prozessdaten des SBR wurde ersichtlich, dass hohe Emissionen auf hohe Ammoniumkonzentrationen zurückzuführen sind.

Dabei stellte sich im Rahmen einer Korrelationsanalyse der Abluftmessdaten mit den Prozessdaten des SBR heraus, dass die Zugabe von Prozesswasser in den ersten 30 Minuten der Nitrifikation zu hohen Ammoniumkonzentrationen im SBR führten, die mit den Lachgasemissionen positiv korrelierten.

Daraus entwickelte sich der Fokus die Zulaufstrategie systematisch zu analysieren und den Prozess hinsichtlich Lachgasemissionen zu optimieren. Untersucht wurde konkret der Unterschied zwischen einer verminderten, zeitlich gestreckten Prozesswasserzugabe und einer stoßartigen, konzentrierten Zugabe hinsichtlich resultierender Lachgasemissionen. Dies schloss gleichzeitig eine Wissenslücke, da bislang nur wenige praxisnahe Daten vorliegen, wie sich die Dosierungsstrategie auf N_2O -Ausstoß auswirkt.

Zum Einsatz kam sowohl zur Analyse der Abluft des SBR das EmiCo lite Messgerät von Variolytics als auch die Variolytics Software EmiCo Insight zur Auswertung der >1 Jahr Daten zum Einsatz.

Die Ziele waren (1) die Quantifizierung der gesamten N_2O -Emissionen und spezifischen Emissionsfaktoren im betrachteten System, (2) der Vergleich der Emissionscharakteristika zwischen den beiden Zulaufstrategien anhand von Clusteranalyse, und (3) die Ableitung von Empfehlungen zur Emissionsminderung.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollten nicht nur wissenschaftlich zum Prozessverständnis beitragen, sondern auch praktisch verwertbar sein, um klimarelevante Emissionen in Kläranlagen gezielt zu reduzieren.

2. Messung und Aufbau der untersuchten Biologie

Betrieb und Aufbau des untersuchten SBRs

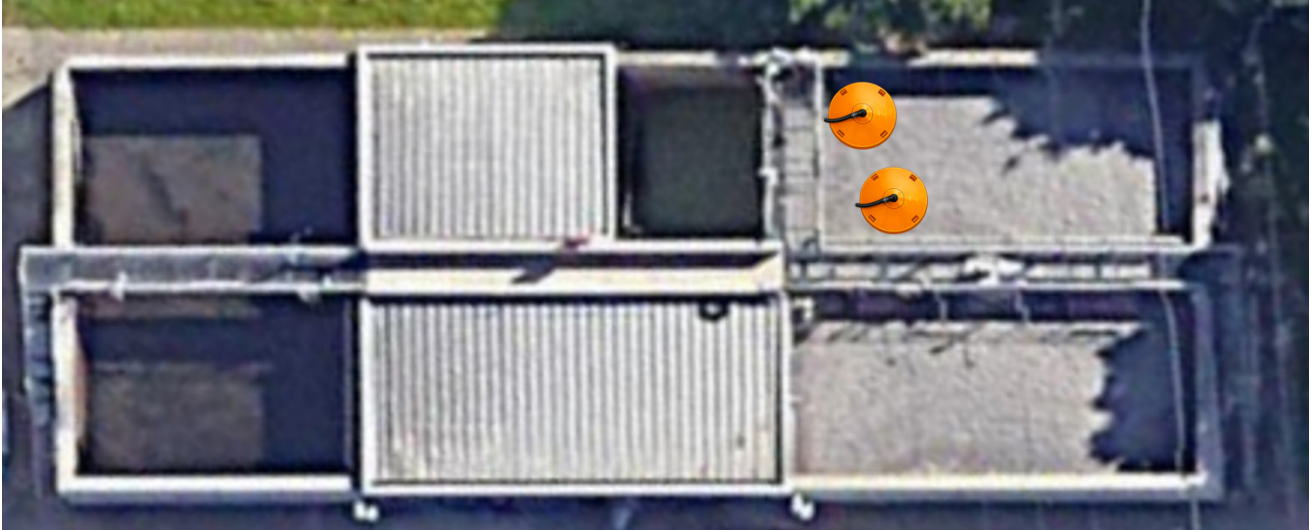


Abbildung 1: Luftbild des untersuchten SBRs mit schematisch eingezeichneten Hauben

Der untersuchte Reaktor ist ein großtechnischer Sequencing Batch Reactor (SBR) zur Nebenstrombehandlung von ammoniumreichem Prozesswasser aus der Faulschlammmentwässerung. Er arbeitet zyklisch mit klar getrennten Füll-, anoxischen, aeroben und Entleerungsphasen, wodurch sich zeitlich wechselnde Redoxbedingungen einstellen. SBR-Reaktoren weisen aufgrund der Betriebsweise und Durchmischung keinen oder nur einen sehr geringen Gradienten der Lachgasemission an der Oberfläche auf, weshalb die Platzierung der Hauben in diesem Fall auch in räumlicher Nähe zueinander stattfinden kann.

Der Ausgangszustand der Betriebsführung des SBR war folgendermaßen: Beginnend mit dem Dekantieren des behandelten Abwassers, erfolgte ein neuer Zyklus. Ein Zyklus war unterteilt in zwei Phasen. Jede Phase beinhaltete rund drei Stunden Nitrifikationsphase mit anschließender dreistündiger Denitrifikationsphase. Innerhalb der ersten 30 Minuten der Nitrifikationsphase wurde das Prozesswasser hinzugegeben. Nach Abschluss der Denitrifikation in der zweiten Phase erfolgte die Entleerungsphase und der Zyklus startete erneut (vergl. Abbildung 5). Das zugeführte Prozesswasser wies sehr hohe Ammoniumkonzentrationen und gleichzeitig eine geringe Kohlenstoffkonzentration auf. Zur Sicherstellung der Denitrifikation wurde daher eine externe Kohlenstoffquelle (Glycerin-basiert) dosiert.

Aufgrund der hohen Stickstoffbelastung und der dynamischen Betriebsweise ist der SBR besonders anfällig für Nitritakkumulation und instabile Nitrifikationsbedingungen. Die Belüftung erfolgt nicht streng DO-geregt, sodass es insbesondere zu Beginn der aeroben Phasen zu transienten Sauerstofflimitierungen kommen kann. Diese Kombination aus hoher NH_4^+ -Fracht, zyklischer Fahrweise und variabler Zulaufstrategie macht den Reaktor zu einer potenziell relevanten Quelle für Lachgasemissionen.

Der spezifische Emissionsfaktor des untersuchten SBRs von $11,8 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^3$ (bzw. ca. 2–3 % $\text{N}_2\text{O-N/TN}$) liegt innerhalb des in Studien beobachteten Spektrums, aber deutlich höher als die Default-Werte, die lange Zeit für Inventarabschätzungen herangezogen wurden. Zum Vergleich: Der IPCC-Standardfaktor 2019 impliziert 1,6 % N-Verlust als $\text{N}_2\text{O-N}$; unser Befund liegt etwas darüber, was jedoch für eine Nebenstrombehandlung mit hoher Ammoniumfracht nicht unüblich ist.

Messsystem und Messprinzip

Die Lachgasemissionen wurden mit einem Online-Messsystem EmiCo lite erfasst. Dieses System ist speziell für Kläranlagen konzipiert und ermöglicht die kontinuierliche Echtzeit-Überwachung von N_2O - und CH_4 -Konzentrationen im Abluftstrom biologischer Reaktoren. Es basiert auf einem NDIR-Gasanalyser (Nichtdispersive Infrarotspektroskopie) zur Detektion von N_2O , CO_2 und Methan sowie ergänzender O_2 Sensorik. (Im vorliegenden Einsatz wurden zwei Messstellen im SBR-Becken mit Hauben abgedeckt, aus denen kontinuierlich Gasproben entnommen wurden. Über Leitungen (je 10m Länge) gelangte das Gas in das wettergeschützte Messgerät (mit temperiertem Gehäuse). Das System erfasste neben der N_2O -Konzentration im Abluftstrom auch den Luftvolumenstrom (der Belüftungsanlage) mittels Durchflussmesser sowie den Kohlenstoffdioxid- und O_2 -Gehalt.



Abbildung 2: Aufbau des EmiCoLite Systems am untersuchten SBR

3. Ergebnisse: Datenauswertung und Prozessoptimierung

Abbildung 3 zeigt den täglichen N_2O -Emissionsfaktor, die mittlere Ammoniumkonzentration und die Zulaufgeschwindigkeit des Prozesswassers in den untersuchten SBR über einen Zeitraum von 11 Monaten im Jahr 2025 (Januar bis November). Lachgasemissionen können auch als Grundlage zur Prozessoptimierung genutzt werden. So wurden die Abluftmessungen in diesem Fall mit konkreten Prozessdaten kombiniert und so konkrete Handlungsempfehlungen zur Reduktion von Lachgasemissionen abgeleitet. Das Vorgehen und die Ergebnisse der Optimierung sind im folgend beschrieben.

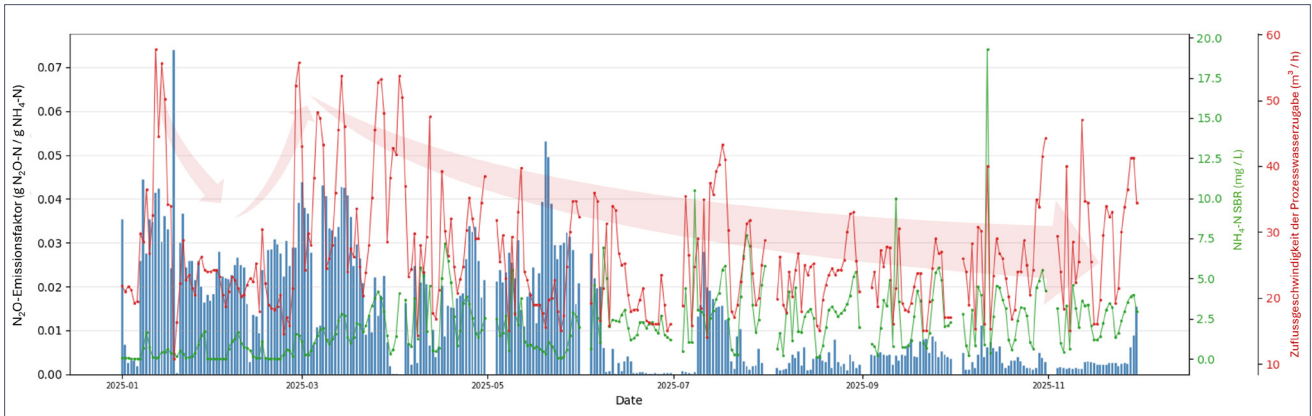


Abbildung 3: Täglicher N_2O -Emissionsfaktor (blau), mittlere Ammoniumkonzentration (grün) und Zulaufgeschwindigkeit des Prozesswassers in den SBR (rot) im Zeitraum von Januar bis November 2025. Die Pumpgeschwindigkeit ließ sich nur über die Verwendung eines Schiebers drosseln. Dadurch konnte der Zufluss nur schrittweise reduziert werden, was zudem zu zeitweisen sprunghaften Anstiegen führte.

Für die Datenauswertung wurden zunächst aus den zeitlich hochaufgelösten Messreihen durch Integration der Emissionsrate über die Zeit die Gesamtemissionen über den gesamten Beobachtungszeitraum ermittelt und ins Verhältnis zur behandelten Prozesswassermenge gesetzt. Dazu wurde die dem SBR zugeführte Prozesswassermenge über den Zeitraum summiert und ein spezifischer Emissionsfaktor in $kg\ CO_2\text{-eq}\ pro\ m^3$ Prozesswasser berechnet. Anschließend wurde der Datensatz hinsichtlich der Zulaufcharakteristik analysiert. Die Betriebsphasen des SBR wurden anhand der Zuflussgeschwindigkeit in drei Kategorien eingeteilt:

- Niedrige Zulaufgeschwindigkeit: unter $21,5\ m^3/h$
- Mittlere Zulaufgeschwindigkeit: $21,5\text{--}28,3\ m^3/h$
- Hohe Zulaufgeschwindigkeit: über $28,3\ m^3/h$

Abbildung 4 zeigt deutlich, dass die schnelle Zugabe mit signifikant höheren Emissionsfaktoren einhergeht.

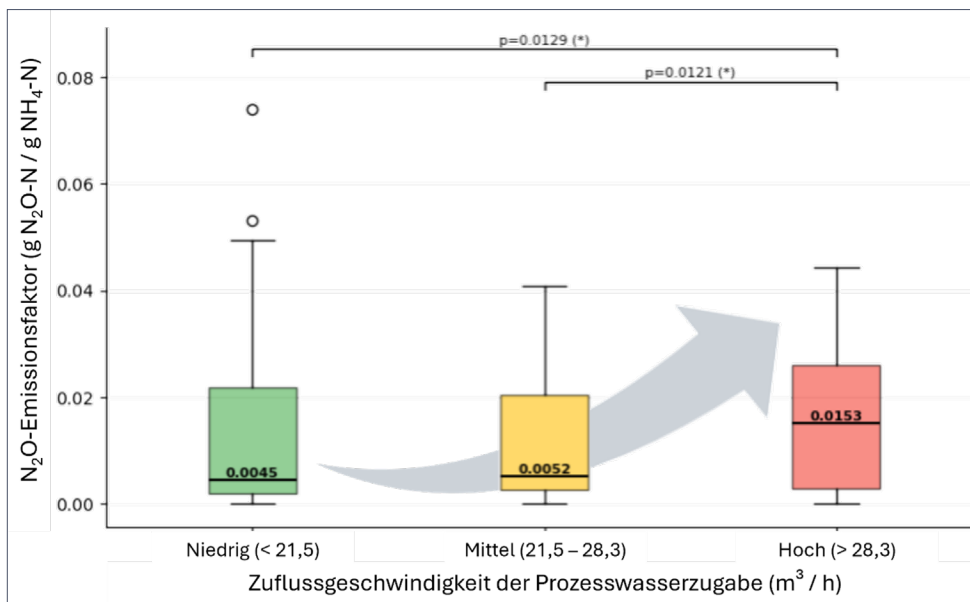


Abbildung 4:

N_2O -Emissionsfaktor verschiedener Prozesszustände. Prozesszustände aufgeteilt anhand der Geschwindigkeit der Prozesswasserzugabe in unteres (grün), mittleres (gelb) und oberes (rot) Drittel der ermittelten Zugabegeschwindigkeit. Eine hohe Zugabegeschwindigkeit führt zu signifikant höheren Emissionsfaktoren ($p < 0,05$).

Der Effekt der durchgeführten Optimierung ist bereits in Abbildung 3 deutlich zu erkennen. So wurde als Handlungsempfehlung die Prozesswasserzugabe verlangsamt. Dies führte zu einer deutlichen Verringerung der Lachgasemissionen (siehe Abbildung 4). Allerdings ist in Abbildung 3 zu erkennen, dass derzeit noch nicht dauerhaft mit einer niedrigen Zulaufgeschwindigkeit gearbeitet werden kann. Dies liegt daran, dass die derzeit verbaute Pumpe zu groß dimensioniert ist und eine Regulation der Zulaufgeschwindigkeit nur mit Hilfe eines manuellen Schiebers möglich ist. Dies führt aber wiederum zu einer größeren Belastung der Pumpe und verhindert eine gleichmäßige Zugabegeschwindigkeit des Prozesswassers. Der Einbau einer neuen (kleineren) Pumpe wurde als konkrete Maßnahme identifiziert.

Im Messzeitraum wurden insgesamt Emissionen von 271,35 t CO₂e ermittelt. Ohne die durchgeführte Maßnahme hätten die Emissionen bei ständiger hoher Zulaufgeschwindigkeit des Prozesswassers bis zu 328,69 t CO₂e betragen. Das ergibt schon jetzt eine Einsparung von 57,34 t CO₂e. Würde eine reduzierte Zugabe, durch Anschaffung einer neuen Pumpe, konsequent umgesetzt, können die Emissionen noch weiter gesenkt werden. So wären bei ständiger niedriger Zulaufgeschwindigkeit des Prozesswassers im Messzeitraum Emissionen von lediglich 97,06 t CO₂e möglich gewesen. Das würde einer Einsparung von 234,63 t CO₂e oder circa 70 % entsprechen.

Dieses oben beschriebene eindeutige Ergebnis zeigt einen direkten Zusammenhang des Emissionsfaktors zum Prozesswasserzulauf. Allerdings wurden bei verminderter Zugabe sowohl keine Emissionen als auch Emissionen gemessen, die zu täglichen Emissionsfaktoren bis zu 10% führten. Wie bereits erwähnt, wurden in der Freisetzung des Lachgases unterschiedliche Muster beobachtet. So können auch Emissionen durch die N₂O-Anreicherung in der Denitrifikationsphase entstehen. Die Freisetzung des in der Denitrifikation gebildeten Lachgases kann unterschieden werden, indem mit Start der Belüftung in der Nitrifikationsphase ausgestrippt wird und die Emissionen im Laufe der Nitrifikation abnehmen. Dieses Ereignis zeichnet sich durch einen Sprung auf eine maximale Emissionsrate aus. In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die verschiedenen Muster dargestellt:

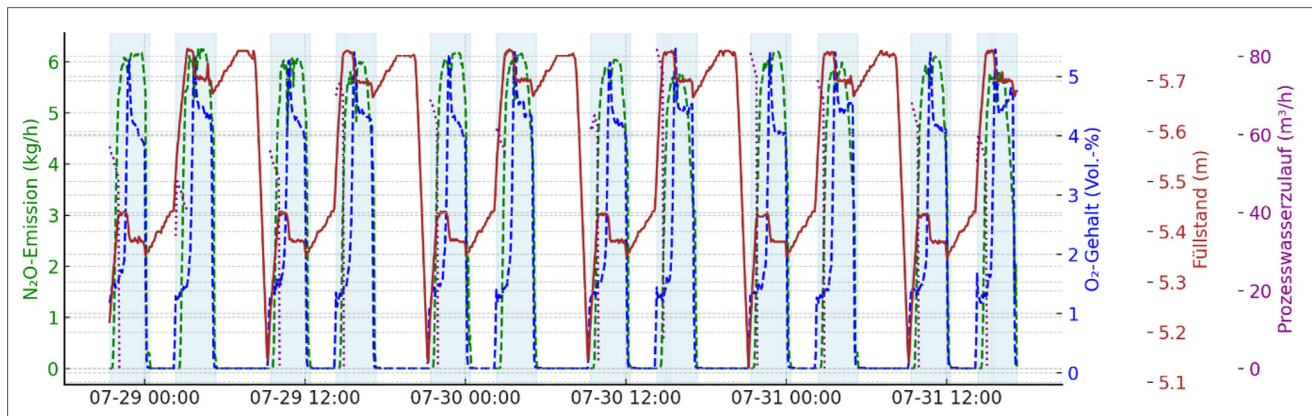


Abbildung 5: Neben dem Verlauf der N₂O-Emission (grün) sind der Verlauf des O₂-Gehalts (blau), des Füllstands (braun) und des Prozesswasserzulaufs (violett) dargestellt. Im dargestellten Zeitraum wurde das Prozesswasser schnell dazugegeben (>28,8 m³/h). Die hinterlegten Bereiche markieren die Nitrifikationsphasen. Es zeigt sich eine ausgeprägte Lachgasbildung unmittelbar während der Nitrifikation infolge der stoßartigen Prozesswasserzugabe mit Zulaufspitzen bis 80 m³/h. In diesem Zeitraum wurde der höchste Emissionsfaktor der gesamten Messkampagne registriert.

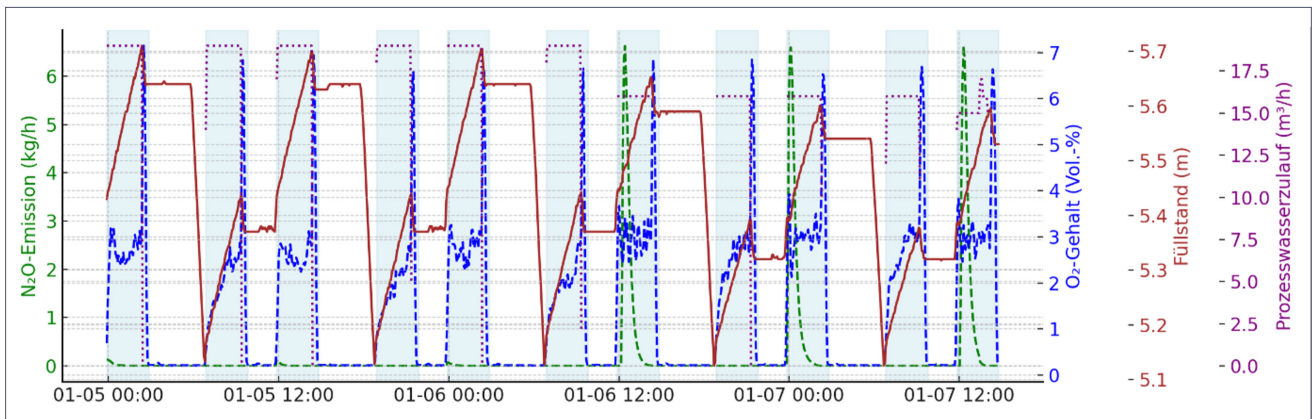


Abbildung 6: Neben dem Verlauf der N₂O-Emission (grün) sind der Verlauf des O₂-Gehalts (blau), des Füllstands (braun) und des Prozesswasserzulaufs (violett) dargestellt. Im dargestellten Zeitraum wurde das Prozesswasser langsam dazugegeben (<21,8 m³/h). In den ersten Zyklen treten keine Emissionen auf. Ab dem 06.01. kommt es zu einem schlagartigen Anstieg der Lachgasfreisetzung jeweils direkt zu Beginn der Nitrifikation. Dieses Muster weist darauf hin, dass während der vorübergehenden Denitrifikationsphase N₂O in der Flüssigphase akkumuliert und anschließend bei Belüftungsbeginn ausgetrieben wird.

Anhand der Füllstandsänderung durch Prozesswasserzugabe während der Nitrifikation in Abbildung 6 wird verdeutlicht, dass die abnehmende Emissionsrate unabhängig von der kontinuierlichen Zugabe von NH₄-N ist. Die Ursache der Emissionen bei verminderter Prozesswasserzugabe lässt sich demnach größtenteils auf die Akkumulation während der Denitrifikation mit anschließender Freisetzung durch die Belüftung zurückführen.

4. Zusammenfassung

Die vorliegende Fallstudie zeigt, dass ein großtechnischer SBR zur Nebenstrombehandlung von ammoniumreichem Prozesswasser ein erhebliches, jedoch steuerbares Potenzial für Lachgasemissionen aufweist. Die Ergebnisse belegen, dass die Art der Prozesswasserzugabe einen entscheidenden Einfluss auf Höhe und Dynamik der N_2O -Emissionen hat: Stoßartige Zuläufe führten zu stark erhöhten Emissionsfaktoren, während eine zeitlich gestreckte Zulaufstrategie deutlich niedrigere Emissionen ermöglichte. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass Lachgas nicht ausschließlich während der Nitrifikation entsteht, sondern auch in anoxischen Phasen akkumulieren und zu Beginn der Belüftung ausgestrippt werden kann. Die Nutzung kontinuierlicher Online-Abluftmessungen erwies sich dabei als zentrales Werkzeug, um Emissionsmuster, Prozesszustände und Ursachen eindeutig zu identifizieren. Insgesamt verdeutlicht die Studie, dass betriebliche Optimierungen ohne große bauliche Maßnahmen, insbesondere eine angepasste Zulaufstrategie, einen wirksamen Hebel zur Reduktion von Lachgasemissionen darstellen und zugleich wertvolle Erkenntnisse für eine klimafreundlichere Fahrweise von Nebenstrom-SBRs liefern.

