

LACHGAS AUS ARA

PRAXISBEISPIELE ZUR REDUKTION DER TREIBHAUSGAS-EMISSIONEN IN ABWASSERREINIGUNGSANLAGEN

Treibhausgasemissionen aus Abwasserreinigungsanlagen entstehen an mehreren Orten entlang der Prozesskette und wurden lange Zeit unterschätzt. Praxisbeispiele zeigen, dass es verschiedene technische Möglichkeiten gibt, diese Emissionen erheblich zu reduzieren. Aktuell laufen Förderprogramme, mit deren Beitrag sich die Emissionsreduktionen auch wirtschaftlich lohnen.

Peter Barmet, InfraWatt; Daniel Braun, ETH Zürich; Stefan Binggeli, Bernd Kobler, INFRAconcept; Wenzel Gruber, Manuel Layer, upwater AG; Hanspeter Bauer, ARA St. Gallen-Hofen; Darja Aepli, Stiftung KliK

RÉSUMÉ

EXEMPLES PRATIQUES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DES STEP

Les quelque 800 stations d'épuration des eaux usées (STEP) de Suisse sont responsables de 1 à 3 pour cent des émissions nationales de gaz à effet de serre (émissions de GES). En raison du fort potentiel de gaz à effet de serre du méthane et du protoxyde d'azote (N_2O), l'effet de levier pour leur élimination est important, voire très important – les émissions de protoxyde d'azote, en particulier, étaient nettement sous-estimées jusqu'à récemment. Il existe plusieurs possibilités de réduire considérablement les émissions de GES des STEP sans entrer en conflit d'objectifs avec l'épuration des eaux usées. Dans le cas de la régulation dynamique des STEP, il existe même des synergies entre la protection des eaux et la protection du climat.

Avec l'aide des subventions actuellement disponibles, les réductions d'émissions sont en outre généralement rentables. Les programmes d'aide sont assurés de durer jusqu'en 2030. Cela vaut la peine d'aborder dès maintenant le thème de la réduction des GES dans les STEP.

EINLEITUNG

Die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) aus den rund 800 zentralen Kläranlagen in der Schweiz machen zwischen 1 und 3% der nationalen THG-Emissionen in der Schweiz aus [1]. Lange wurde der Anteil der Kläranlagen an den Lachgasemissionen stark unterschätzt. Forschende der Eawag und ETH konnten zeigen, dass rund ein Fünftel aller Lachgasemissionen in der Schweiz aus Kläranlagen stammen [2]. Lachgas (N_2O) ist nach Kohlendioxid und Methan das dritt wichtigste Treibhausgas. Aufgrund seines hohen Treibhausgaspotenzials, das über 100 Jahre betrachtet 265-mal höher ist als jenes von CO_2 [3], hat die Lachgasreduktion eine grosse Hebelwirkung. Neben N_2O emittieren ARA zwei weitere Treibhausgase: Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4). Das Treibhausgaspotenzial von CH_4 ist fast 30-mal höher als jenes von CO_2 [3].

Kläranlagen spielen vor diesem Hintergrund eine zunehmend wichtige Rolle für den Umwelt- und Klimaschutz. Untersuchungen zeigen, dass diese Emissionen massiv reduziert werden können, ohne dass dadurch die Qualität des gereinigten Abwassers leidet. Je nach Ausgangslage ist eine andere Methode zur Emissionsreduktion geeignet (siehe auch Abschnitt «Eignung und Potenzial»). Der hier vorliegende Artikel fokussiert im Rahmen von Praxisbeispielen insbesondere auf drei verschiedene Verfahren zur Lachgasreduktion, namentlich

die chemische Faulwasserbehandlung (Stripping), die dynamische Regelung mit Off-Gas-Messungen (DynARA) sowie die regenerativ-thermische Oxidation (RTO).

Zurzeit laufen Förderprogramme, welche die Emissionsreduktion finanziell unterstützen (siehe *Box 1* und *2*). Voraussichtlich werden diese 2030 auslaufen und mögliche gesetzliche Verschärfungen könnten die ARA-Betreiber zu einem vorzeitigen Handeln zwingen. Eine Anpassung der Gewässerschutzverordnung mit einem gesetzlichen Grenzwert für Nitrit ist z. B. in Vorbereitung. In der EU müssen Kläranlagen laut einem Bericht der europäischen Umweltagentur EEA mindestens 75% ihres Stickstoffs eliminieren. Vor diesem Hintergrund lohnt es sich, die möglichen Optionen zu kennen und allfällige Emissionsreduktionsmassnahmen zur richtigen Zeit umzusetzen.

THG-ENTSTEHUNG IN ARA

Wie *Figur 1* zu entnehmen ist, können THG-Emissionen entlang mehrerer Prozessstufen entstehen. In der biologischen Abwasserreinigung kann N_2O sowohl während der Nitrifikation (Oxidation von Ammonium zu Nitrat) wie auch durch die

heterotrophe Denitrifikation (Reduktion von Nitrat zu Luftstickstoff) gebildet werden [4]. Die genaue Bildung von N_2O in der Nitrifikation und Denitrifikation in ARA ist jedoch komplex. Für weiterführende Informationen zu Lachgas aus ARA sei auf Artikel im *Aqua & Gas* verwiesen (*A&G 1/2022, S.24*, und *A&G 3/2023, S. 50*). Die simultane Aktivität mehrerer Bildungswege erschwert eine eindeutige Identifizierung der dominanten biochemischen Bildungsmechanismen [4]. Die N_2O -Reduktion durch denitrifizierende Bakterien ist die einzige bekannte Möglichkeit, N_2O biologisch abzubauen [5]. Die grössten N_2O -Emissionen treten während der Belüftung in der biologischen Reinigung auf (vgl. *Fig. 1*). Geringere Emissionen entstehen in unbelüfteten Zonen der biologischen Reinigung sowie in der Nachklärung. Die Verbrennung von Klärschlamm kann bei nicht optimiertem Betrieb ebenfalls hohe Emissionen verursachen [6].

Methan (CH_4) ist das Produkt der anaeroben Vergärung von organischem Material. Es wird unter anaeroben Prozessbedingungen im Kanalnetz und zu einem grösseren Anteil in der anaeroben Schlammbehandlung gebildet und emittiert [6]. Massnahmen zur Reduktion von

METHANREDUKTION IN ARA

Zur Reduktion der Methanemissionen werden am Programm teilnehmende Kläranlagen mit einer gasdichten Abdeckung für relevante Prozessschritte ausgerüstet. Dank der Abdeckung können die Abluftströme gefasst und genutzt oder gegebenenfalls in einem Verbrennungsprozess zerstört werden.

Die Stiftung *Kliik* kauft die aus dem Programm resultierenden Bescheinigungen. Um eine möglichst breite Umsetzung zu ermöglichen, ist die Stiftung *Kliik* bereit, kleineren Kläranlagen einen erhöhten Preis pro reduzierte Tonne CO_2 zu bezahlen. Ohne das Programm hätten die Kläranlagen keinen Anreiz, ihre methanhaltigen Abluftströme zu nutzen oder zu zerstören.

Programmaktivität: Zerstörung oder Nutzung von Methan in Abluftströmen von kommunalen Kläranlagen

Programmeigner: *South Pole Suisse*

Programmnummer BAFU: 0089

Box 1

CH_4 sind nicht Teil des vorliegenden Artikels, wurden aber im Artikel «Methanschlupfreduktion» (*A&G 6/2021, S. 80*) bereits ausführlich behandelt.

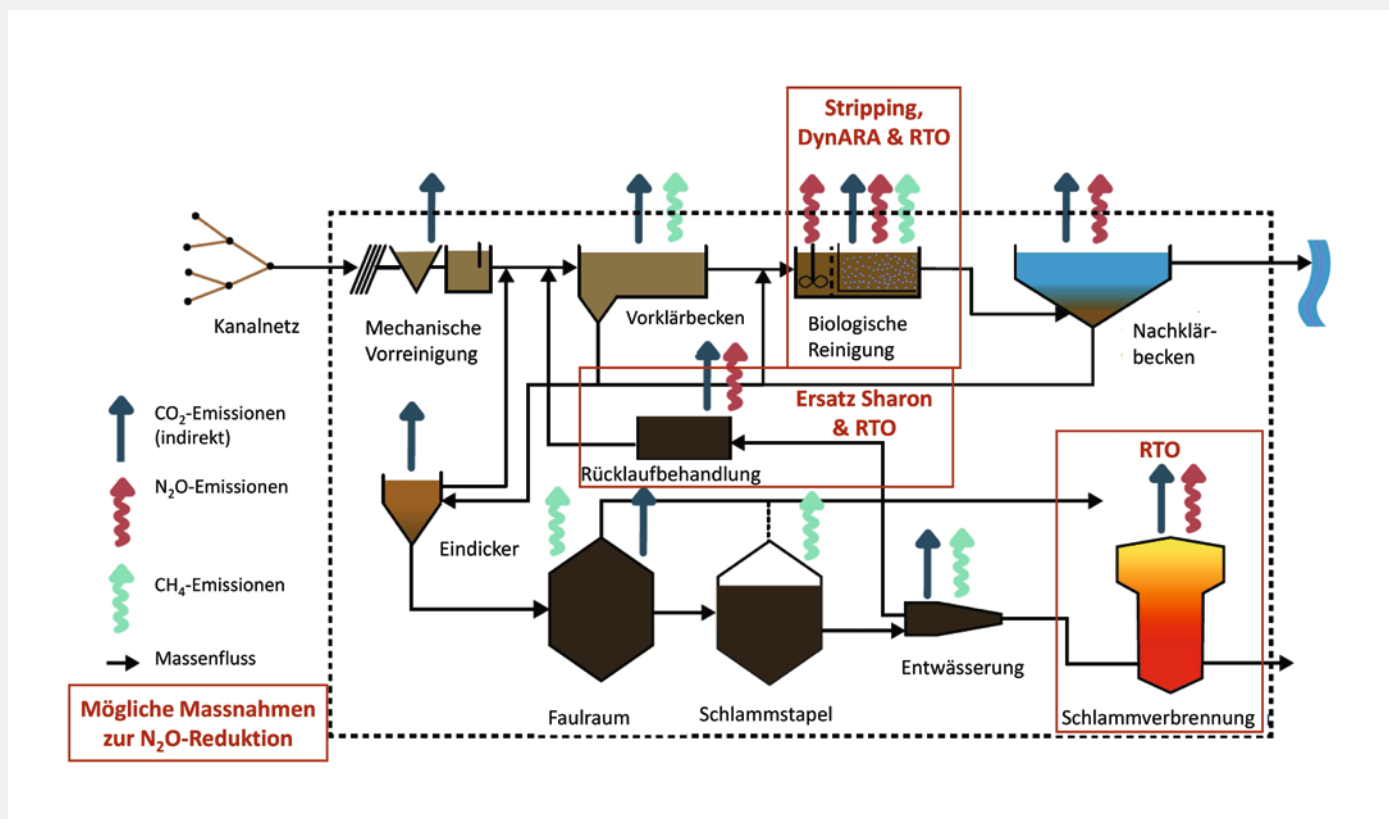


Fig. 1 Treibhausgasemissionen auf einer typischen Schweizer ARA gemäss Gruber [1]. In roter Farbe in den roten Kästen werden mögliche Massnahmen zur N_2O -Reduktion aufgeführt (siehe Praxisbeispiele).

Kohlendioxid (CO₂) entsteht einerseits als indirekte Emission, verursacht durch den Stromverbrauch, und andererseits als direkte Emission beim Kohlenstoffabbau. Die direkten Kohlendioxidemissionen sind klimaneutral, zumal die organischen Bestandteile im Abwasser überwiegend aus biologischen Quellen stammen [6].

Unter Berücksichtigung des Treibhausgaspotenzials sind die N₂O-Emissionen aus ARA am relevantesten, gefolgt von den Methanemissionen. Die indirekten CO₂-Emissionen spielen eine vergleichsweise untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund ist z. B. eine alleinige Optimierung des Stromverbrauchs zur Verbesserung der THG-Bilanz einer ARA nicht zweckmässig.

PRAXISBEISPIELE

Figur 1 deutet bereits (in roter Farbe) auf die verschiedenen möglichen Massnahmen zur N₂O-Reduktion hin. Auf die Massnahme «Ersatz SHARON» wird im vorliegenden Bericht nicht vertieft eingegangen. Im Wesentlichen geht es bei

der Massnahme um einen Ersatz des bestehenden SHARON-Reaktors (*Single reactor system for High activity Ammonium Removal Over Nitrite*) durch eine Anammox-Anlage. In der Faulwasserbehandlung kann der Stickstoff u. a. mit Nitrifikation/Denitrifikation oder anaerober Ammonium-Oxidation (Anammox) entfernt werden [7]. Die Anammox-Behandlung ist besonders attraktiv, weil sie wenig Energie für die Belüftung benötigt und gleichzeitig eine hohe Entstickungsleistung bietet [7]. Die Anammox-Reaktion benötigt Nitrit (NO₂-), das zunächst durch Belüftung aus Ammonium hergestellt wird (partielle Nitrifikation), bevor es unter anaeroben Bedingungen zu elementarem Stickstoff reduziert wird [7].

ABWASSERVERBAND ALTENRHEIN: CHEMISCHE FAULWASSERBEHANDLUNG

Der Abwasserverband Altenrhein (AVA) betreibt als dritte ARA in der Schweiz eine Anlage zur chemischen Faulwasserbehandlung. Für dieses sogenannte Stripping musste eine zusätzliche Reinigungsstufe eingebaut werden. Herzstück der Anlage ist eine Membrananlage,

REDUKTION VON N₂O-EMISSIONEN AUF ARA

Auf kommunalen Kläranlagen mit Verfahren zur Nitrifikation bzw. Nitritation von Ammonium-Stickstoff oder zum Verbrennen von Klärschlamm können bedeutende Lachgasemissionen entstehen. Diese sind u. a. abhängig von der Stickstofffracht, der Auslegung der Nitrifikation, dem Wirkungsgrad der Denitrifikation, den Prozessbedingungen (anoxische/aerobe Phasen/Abwassertemperatur) und der Verbrennungstemperatur. Die Stiftung KLIK unterstützt das Programm und kauft die Bescheinigungen aus den erzielten Emissionsreduktionen ab. Dies ermöglicht den Anlagen, die getätigten Investitionen zu amortisieren und die Betriebskosten zu decken.

Für die Reduktion der Lachgasemissionen gibt es aktuell vier Ansätze:

- Faulwasser-Stripping (Produktion von Ammoniumsulfatdünger)
- Dynamische Regelung (DynARA)
- Ersatz emissionsintensiver Nitrifikationsverfahren (SHARON; *Single reactor system for High activity Ammonium Removal Over Nitrite*)
- Abluftbehandlung mittels RTO (regenerativ-thermische Oxidation)

Programmeigner: *INFRAconcept*
 Programmnummer BAFU: 0174

Box 2

die u. a. aus mehreren Kolonnen besteht, welche wiederum Kapillaren aus Membranen enthalten (siehe Fig. 2). Die Stripping-Methode ermöglicht es, den im Faulwasser vorhandenen Stickstoff als Ammoniak auszublasen und mittels Schwefelsäure zu binden. Das Produkt (Ammoniumsulfat) kann als hochwertiger Dünger in der Landwirtschaft verwendet werden. Dies ermöglicht - neben der Schliessung des Stickstoffkreislaufs - eine genaue Dosierung des Stickstoffs im Boden ohne Auswaschung, was letztendlich zu einer Verringerung des Nitratreintrags in das Grundwasser führt. Mit einer «dynamischen Regelung» können die Parameter einer ARA den Optimierungszielen laufend nachgefahren werden, sodass diese alle gleichzeitig erreicht werden. Dabei spielt insbesondere die Belüftung eine zentrale Rolle [8]. Neben der N₂O-Reduktion (-50-60%)



Fig. 2 Die Membrananlage ist das zentrale Element der chemischen Faulwasserbehandlung. Die Membranen selbst befinden sich in geschlossenen, zylinderförmigen Behältern (Foto rechts oben). Das Stripping erfolgt entlang von kapillarförmigen Membranen (Foto rechts unten).

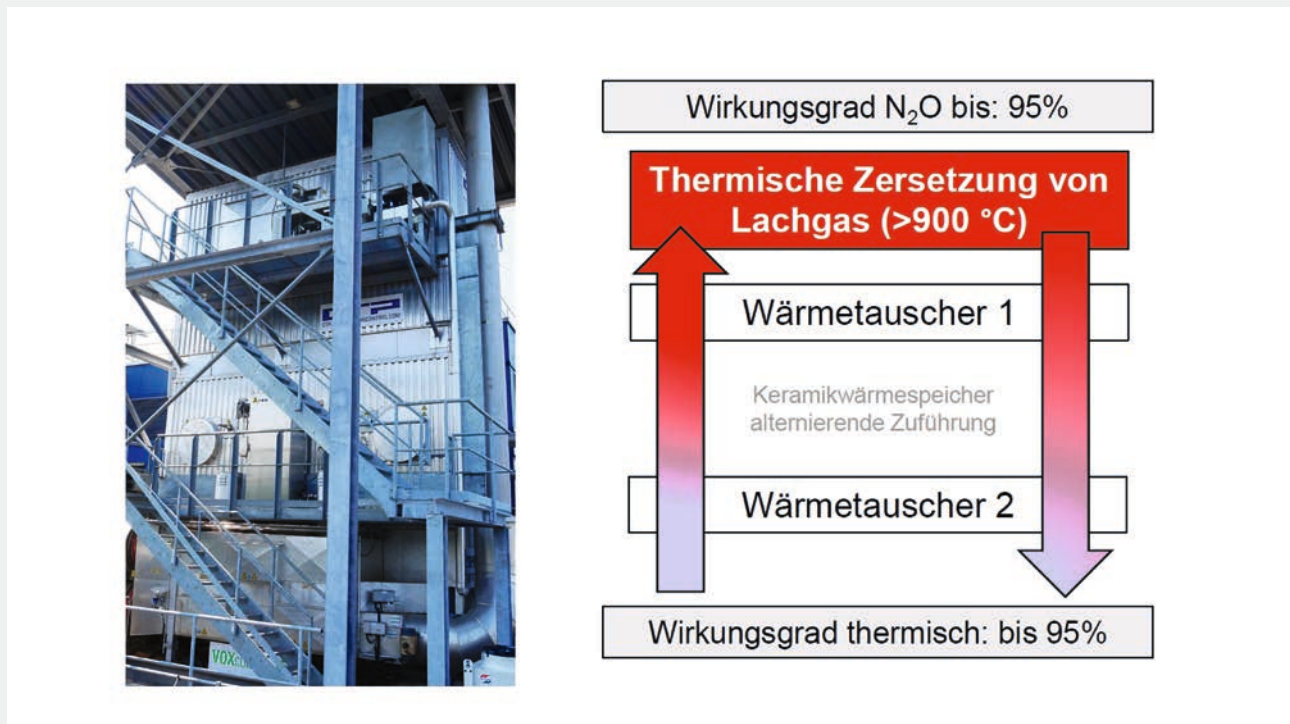


Fig. 3. RTO-Anlage auf der ARA Buholz (Foto links) und Verfahrensschema mit möglichen Wirkungsgraden (rechts).

(Quelle des Schemas: INFRAconcept)

und der erwähnten Schliessung des Stickstoffkreislaufs bietet dieses chemische Verfahren noch weitere Vorteile:

- Die Biologie der Anlage wird entlastet (weniger Stickstoff).
- Die Stripping-Anlage kann relativ schnell hoch- und runtergefahren werden (Stichwort: On-off-Verfahren).
- Mögliche Vorwegnahme einer gesetzlichen Verschärfung (bezüglich Lachgas oder Erhöhung der Stickstoffelimination).

Allerdings ist der Aufwand der Installation resp. des Betriebs nicht zu unterschätzen und die Wirtschaftlichkeit ist aktuell nur mit einer finanziellen Förderung gegeben.

ARA HOFEN: DYNAMISCHE REGELUNG

Die dynamische Regelung der ARA Hofen ermöglichte systematische Pilotversuche mit unterschiedlichen Belüftungsstrategien. Mithilfe eines Sensornetzwerks der ETH Zürich konnte gezeigt werden, dass mit der dynamischen Regelung nicht nur signifikante Einsparungen bei der Belüftungsenergie erzielt werden, sondern auch die Lachgasemissionen dank der lastangepassten Belüftung und Faulwasserdosierung minimiert werden können. Ein ausführlicher Beitrag zur dynamischen Regelung der ARA Hofen ist im *Aqua & Gas 1/2022* (S. 26–31) zu finden.

Die Resultate nach der zweijährigen Pilotphase lassen sich sehen:

- Die mittlere Denitrifikationsrate konnte durch die neue Belüftungsstrategie von 30 auf 70% erhöht werden.
- Der Energiebedarf zur Belüftung liegt mit 11,4 kWh/(a*EW) deutlich unter dem «optimalen» Wert des Handbuchs «Energie in ARA» [9].
- Der Eigendeckungsgrad (Strom) wurde von 75 auf 130% gesteigert (u. a. durch ein neues, effizientes Blockheizkraftwerk, neue Turboverdichter und die dynamische Regelung).
- Der Emissionsfaktor für Lachgas liegt bei 0,2% (der Referenzwert für diese Anlage ohne Optimierung beträgt 1,8%).

Die Resultate der Optimierung sind sehr vielversprechend. Mit geringen Investitionen kann die Leistungsfähigkeit der Anlage deutlich gesteigert werden. Die verbesserte Ablaufqualität hat quasi als Nebeneffekt geringere N_2O -Emissionen und einen geringeren elektrischen Energiebedarf zur Folge.

ARA BUHOLZ (REAL): REGENERATIV-THERMISCHE OXIDATION

REAL betreibt auf dem Gelände der ARA Buholz eine Schlammverbrennungsanlage (SVA). Bei der Schlammverbrennung entsteht Lachgas, das mittels regenerativ-thermischer Oxidation (RTO) redu-

ziert werden kann (vergleiche auch mit Fig. 1). Dank der seit 2016 betriebenen RTO-Anlage können auf der ARA Buholz in Emmen jährlich rund 5000 t CO_2 -eq eingespart werden.

Das RTO-Verfahren ist eine etablierte Anwendung, bei dem die Temperatur der Abluft auf über 900 °C erhitzt wird. Bei diesen Temperaturen kann N_2O in seine Bestandteile (in molekularen Stickstoff und Sauerstoff) zersetzt und dadurch entfernt werden. Über keramische Wärmetauscher lässt sich die benötigte thermische Energie wiedergewinnen, indem Zu- und Abluft abwechselnd über die Keramikwärmespeicher geführt werden. Sowohl der N_2O -Abscheidegrad als auch der thermische Wirkungsgrad können über 90% erreichen (Fig. 3). Neben einer Anwendung auf Verbrennungsanlagen konnte gezeigt werden, dass mit dem RTO-Verfahren auch belastete Abluft aus ARA behandelt werden kann. Dazu führte INFRAconcept zusammen mit der Eawag auf der ARA Bern Pilotexperimente durch und zeigte, dass mit dem Verfahren Lachgas aus der Faulwasserbehandlung als auch aus der biologischen Reinigungsstufe effizient entfernt werden kann [10]. Das RTO-Verfahren ist eine End-of-Pipeline-Lösung, die sich grundsätzlich breit einsetzen lässt. Im Rahmen der Arbeiten konnte INFRAconcept die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Abluft-

behandlung mittels RTO-Verfahren auch für ARA bestätigen.

EIGNUNG UND POTENZIAL

Im Rahmen des durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) durchgeführten «Programms zur Emissionsverminderung in der Schweiz» definierte *INFRAconcept* (Programmeigner von «Reduktion von N₂O-Emissionen auf ARA»; siehe *Box 2*) die Eignung von Massnahmen für verschiedene ARA-Typen und schätzte deren THG-Einsparungspotenzial ab:

- Die chemische Faulwasserbehandlung und die dynamische Regelung von ARA eignen sich v. a. für Anlagen ohne ganzjährige Denitrifikation (< 65%) oder mit gemessenen, hohen Lachgasemissionen. Das Einsparungspotenzial beträgt 1000 bis 4000 tCO₂-eq/a.
- Der Ersatz des SHARON-Verfahrens ist eine spezifische Massnahme für Anlagen mit diesem Verfahrenstyp. Das Potenzial ist unterschiedlich.
- Das RTO-Verfahren eignet sich für zweistufige Anammox-Anlagen (Potenzial 500 bis 2000 tCO₂-eq/a) sowie für Festbetтанlagen, abgedeckte Belebtschlammanlagen und Schlammverbrennungsanlagen (Potenzial 2000 bis 10 000 tCO₂-eq/a).

Das Preismodell für den Vorhabentyp «Ersatz des SHARON-Verfahrens» be-

läuft sich auf 50 Franken pro Tonne – bis die Investitionen amortisiert sind. Danach sind 10 Franken pro Tonne zur Deckung der Betriebskosten (1,5% Teuerung berücksichtigt) vorgesehen. Für die übrigen Vorhabentypen (chemische Faulwasserbehandlung, *DynARA* und RTO) sieht das Preismodell 145 Franken pro Tonne vor – ebenfalls bis die Investitionen amortisiert sind. Danach sind es 100 Franken pro Tonne zur Deckung der Betriebskosten (1,5% Teuerung berücksichtigt).

FAZIT

Die rund 800 ARA in der Schweiz sind für 1 bis 3% der nationalen THG-Emissionen verantwortlich. Insbesondere die Lachgasemissionen wurden bis vor Kurzem deutlich unterschätzt. Aufgrund des hohen Treibhausgaspotenzials von Methan und insbesondere von Lachgas ist die Hebelwirkung bei deren Eliminierung gross resp. sehr gross. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die THG-Emissionen aus ARA wesentlich zu reduzieren, ohne dabei mit der Abwasserreinigung in einen Zielkonflikt zu gelangen. Mithilfe der aktuell verfügbaren Fördergelder sind die Emissionsminderungen zudem meist wirtschaftlich. Aufgrund der bereits bestehenden Förderprogramme (vgl. *Box 1* und *2*) ist der administrative Zusatzaufwand minimal. Die Förderprogramme

sind bis Ende 2030 gesichert. Es lohnt sich, das Thema der THG-Reduktion in ARA jetzt anzugehen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gruber, W. (2021): *Long-term N₂O emission monitoring in biological wastewater treatment: methods, applications and relevance*. DISS. ETH NO. 27650
- [2] Gruber, W. et al. (2021): *Estimation of countrywide N₂O emissions from wastewater treatment in Switzerland using long-term monitoring data*. *Wat. Res.* X. 13: 100122
- [3] IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte, V. et al.
- [4] Wunderlin, P. (2013): *Mechanisms of N₂O Production In Biological Wastewater Treatment From Pathway Identification To Process Control*. DISS. ETH NO. 21375
- [5] Conthe, M. et al. (2018): *Denitrification as an N₂O sink*. *Water Research*. 151: 381–387
- [6] Gruber, W. et al. (2021): *Lachgasemissionen aus ARA*. *Aqua & Gas* 1/2021: 14–22
- [7] Joss, A. et al. (2023): *Modifiziertes Anammox-Verfahren*. *Aqua & Gas* 1/2023: 24–29
- [8] Braun, D. et al. (2022): *Dynamische Regelung der ARA Hofen*. *Aqua & Gas* 1/2022: 26–31
- [9] Müller, E.A. et al. (2010): *VSA-Handbuch: Energie in ARA*. VSA, Glattbrugg
- [10] Kobler, B.; Gruber, W. (2022): *Technischer Bericht – Pilotexperiment RTO*. *Technischer Bericht ara bern ag*, 23 S.