

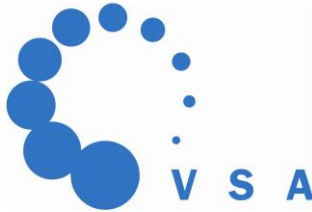
STICKSTOFF-RÜCKGEWINNUNG AUS DEM ABWASSER

STANDORTBESTIMMUNG



Zürich, August 2025

Eine Studie im Auftrag des Verbands Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Europastrasse 3, 8152 Glattbrugg



Autorenschaft:

Cristina Fritzsche (Holinger AG)

Marlène Fretz (Holinger AG)

Selina Jörg (Holinger AG)

Manuel Bussmann (Holinger AG)

Review:

Pascal Wunderlin (Leitung; VSA)

Damian Dominguez (BAFU)

Adriano Joss (EAWAG)

Reto Manser (VSA)

Fachliche Inputs:

Christoph Egli (AV Altenrhein)

Stefan Binggeli (InfraConcept)

Christoph Bonvin (Membrattec SA)

Markus Grömping (FH Aachen)

Martin Häberli

Lutz Merbold und Frank Liebisch (Agroscope)

Marc Böhler (EAWAG)

Michael Kasper (ARA Kloten/Opfikon)

Frédéric Gindroz (ALPHA WasserTechnik AG)

Marcel Pürro, Julien Ming (STEP Yverdon-les-Bains)

Josef Langhansl und Martin Bergner (Klärwerk Straubing; DE)

Quellen Bilder Titelbild:

https://www.membrattec.ch/data/images/accroches/Actualites/202109_News_ProductionEngraisParStrip-pingMembranaire.jpg

Luftstrippung mit vorgeschalteter CO₂-Strippung, Kläranlage Kloten/Opfikon, Foto M. Böhler, Eawag 2011.

<https://www.schweizerbauer.ch/pflanzen/ackerbau/250-fr-pro-hektare-sparen/>

INHALTSVERZEICHNIS

STICKSTOFF-RÜCKGEWINNUNG AUS DEM ABWASSER	2
STANDORTBESTIMMUNG	2
1 AUSGANGSLAGE	2
2 STICKSTOFF-DÜNGER	4
2.1 N-DÜNGER HERKUNFT UND FORM	4
2.2 MARKTENTWICKLUNG	5
2.3 N-DÜNGER AUS ARA	5
2.3.1 Potenziell verfügbare Düngermengen	5
2.3.2 Anforderungen an den N-Dünger	5
2.3.3 Produzierter ARA-Dünger und seine Anwendung	6
2.3.4 Voraussetzungen für den Verkauf von ARA-Dünger	7
2.3.5 Vor- und Nachteile des ARA-Düngers	8
2.3.6 Alternative Verwertungswege	8
3 N-RÜCKGEWINNUNG AUF ARA: VERFAHRENSÜBERSICHT	9
3.1 LUFTSTRIPPUNG	9
3.2 MEMBRANSTRIPPUNG	9
3.3 WEITERE VERFAHREN ZUR N-RÜCKGEWINNUNG	9
3.3.1 Ammoniak mittels Vakuum-Membranen extrahieren	10
3.3.2 Schlammtrocknung und N-Rückgewinnung aus der Abluft	10
3.3.3 N-Rückgewinnung aus der Urinbehandlung	10
3.3.4 Struvit-Fällung aus Faulwasser oder Faulschlamm	10
4 FOKUS LUFT- UND MEMBRANSTRIPPUNG	12
4.1 ERSTE (BETRIEBS-)ERFAHRUNGEN	12
4.1.1 Chancen	12
4.1.2 Herausforderungen	13
4.2 ENTWICKLUNGS- UND OPTIMIERUNGSPOTENTIALE	14
4.2.1 Luftstrippung	14
4.2.2 Membranstrippung	14
4.2.3 Faulwasser-Vorbehandlung	15
4.2.4 Möglichst hohe N-Konzentration im Faulwasser	16
4.2.5 Kostenentwicklung	16
4.3 SYNERGIEN MIT ANDEREN BEREICHEN	16
4.3.1 Phosphor-Rückgewinnung	16
4.3.2 Klärgasproduktion	16
4.3.3 Separate Urinbehandlung	16
4.3.4 Abluftbehandlung	16

5	KOSTEN UND TREIBHAUSGASEMISSIONEN IM VERGLEICH	18
5.1	KOSTENVERGLEICH	19
5.1.1	Spezifische Betriebskosten	19
5.1.2	Spezifische Investitionskosten	20
5.1.3	Spezifische Jahreskosten	21
5.2	TREIBHAUSGASEMISSIONEN	22
5.2.1	Gewählte Systemgrenzen und betrachtete Emissionen	22
5.2.2	Treibhausgasemissionen bei der Strippung im Vergleich zur industriellen Düngerproduktion	24
5.2.3	Treibhausgasemissionen der Strippung im Vergleich zu biologischen Prozessen zur N-Elimination (ARA-Hauptstufe, Anammox-Prozess)	25
6	QUALITATIVER VERFAHRENSVERGLEICH ZWISCHEN STRIPPUNG UND ANAMMOX	27
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	30
8	LITERATURVERZEICHNIS	32

DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE

Die Stickstoff-Rückgewinnung aus dem Abwasser...

- ...ist mittels Luft- und Membranstrippung technisch und betrieblich machbar, was rund 10 Anlagen im DACH-Raum (DACH = Deutschland, Österreich, Schweiz) zeigen.
- ...könnte 5% bis 10% des importierten N-Mineraldüngers der Schweiz ersetzen und lokal im Kreislauf halten. Dieser Anteil würde zunehmen, wenn die Düngereffizienz in der Schweiz erhöht würde.
- ...ist als Verfahren zur Düngerproduktion in wirtschaftlicher Hinsicht dem industriellen Produktionsprozess zurzeit unterlegen. Zur Deckung der Jahreskosten sind ARA auf Kompensationsgelder der Stiftung KliK¹ angewiesen².
- ... ist aktuell je nach Verfahren mit der industriellen Stickstoff-Produktion bezüglich Klimaauswirkungen vergleichbar (Luftstrippung) oder schlechter (Membranstrippung). Massgebend bei der Strippung ist der Chemikalienverbrauch.
- ...ist eine noch «junge» Technologie, mit Potential an weiteren Optimierungen, insbesondere um den Chemikalienverbrauch zu senken.
- ...ist eine interessante Alternative, wo einerseits eine Faulwasserbehandlung notwendig ist, aber biologische Entstickungsverfahren nicht machbar sind, oder wo andererseits eine lokale Rückgewinnung aus politischer Sicht erwünscht ist. Das Verfahren eignet sich vor allem auch für grosse ARA, die viel Fremdschlamm und/oder Stickstoff-haltige Co-Substrate annehmen.

Die Datengrundlage ist mit 4 Strippungsanlagen und 3 Anammox-Anlagen sehr begrenzt. Zudem ist die Membranstrippung eine «junge» Technologie mit Optimierungspotential. Es wird daher empfohlen, diese Studie zu wiederholen, wenn mehr Daten und Betriebserfahrungen vorliegen.

¹ Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation. Siehe hier: <https://www.klik.ch/> (Stand: 9.5.2025).

² Die Kompensationsgelder erfolgen für Minderemissionen an Lachgas aus der biologischen Reinigungsstufe, und dienen als finanzieller Beitrag an die getroffenen Massnahmen, in diesem Fall eine N-Rückgewinnungsanlage. Voraussetzung für die Deckung der Jahreskosten durch KliK ist eine substanzielle Einsparung von Lachgas und ein optimaler Betrieb der Strippungsanlage: Tiefer Laugenverbrauch und hohe Auslastung der Strippungsanlage.

1 AUSGANGSLAGE

Stickstoff (N) lässt sich mittels Luft- oder Membranstrippungsanlagen aus dem Abwasser zurückgewinnen, was im DACH-Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz) bereits rund 10 Kläranlagen (ARA) grosstechnisch umsetzen. Aus dem Schweizer Abwasser liessen sich auf diese Weise jährlich rund 2'500 bis 5'000 Tonnen Stickstoff gewinnen. Aktuell wenden in der Schweiz zwei ARA dieses Verfahren an und gewinnen zusammen jährlich rund 80 Tonnen Stickstoff zurück, in Form von Ammoniumsulfat Dünger. Eine weitere ARA hat während rund 10 Jahren eine solche Anlage betrieben.

Stickstoff ist, anders als Phosphor, unendlich als Luftstickstoff verfügbar. Jährlich gelangen rund 40'000 Tonnen Stickstoff in die Schweizer ARA. Davon verlassen rund 20'000 Tonnen die ARA über das gereinigte Abwasser und rund 4'000 Tonnen über den Klärschlamm. Der restliche Stickstoff gelangt mehrheitlich als Luftstickstoff (N₂) in die Atmosphäre [1]. Die N-Konzentration im kommunalen Abwasser ist für die N-Rückgewinnung zu tief und daher gegenwärtig technisch nicht machbar. Im Faulwasser und im Faulschlamm sind die Konzentrationen deutlich höher. Im Faulwasser befinden sich rund 10% bis 15% des Stickstoffs, der mit dem häuslichen Abwasser auf die ARA gelangt.

Seit dem 1.1.2025 fordert Art. 30d des revidierten Umweltschutzgesetzes (USG) eine N-Rückgewinnung aus dem Abwasser unter der Voraussetzung, dass diese Massnahme wirtschaftlich tragbar, technisch umsetzbar und ökologisch nicht nachteilig ist. Auf ARA übertragen bedeutet dies, dass die N-Rückgewinnung auf ARA der herkömmlichen industriellen N-Produktion³ wirtschaftlich und ökologisch gegenüberzustellen ist.

Die vorliegende Studie stellt eine Standortbestimmung dieser noch «jungen» Technologien dar und adressiert ARA-Betreiber/-innen, die künftig ein solches Verfahren betreiben wollen, Behörden und weitere Interessierte. Die Studie fokussiert auf die N-Rückgewinnung aus dem Faulwasser⁴ und zeigt erste Umsetzungs- und Betriebserfahrungen, sowie das künftige Potential auf. Zudem vergleicht sie die Verfahren, sowohl mit der industriellen N-Düngerproduktion als auch mit biologischen Verfahren zur N-Elimination im Faulwasser. Der Vergleich mit der industriellen N-Düngerproduktion ist wichtig, weil im Umweltschutzgesetz darauf Bezug genommen wird. Der Vergleich mit biologischen Verfahren zur N-Elimination im Faulwasser soll ARA-Betreiber/-innen, die eine Faulwasserbehandlung bauen wollen, bei der Verfahrenswahl unterstützen.

Für die N-Entfernung aus dem Faulwasser werden in dieser Studie folgende Möglichkeiten betrachtet:

- Rückführung in die Biologie und Elimination mittels Nitrifikation und Denitrifikation.
- Behandlung mittels Anammox⁵ im Nebenstrom.
- Behandlung in einer Stickstoffrückgewinnungsanlage.

Zusätzlich gäbe es auch noch die Möglichkeit, das Faulwasser in einer Nitrifikation/Denitrifikationsstufe im Nebenstrom zu behandeln. Dieses Verfahren wird hier aber nicht berücksichtigt, weil es nachteilig ist gegenüber dem Anammox-Prozess.

³ N-Produktion meint Stickstoff in nutzbarer Form, hauptsächlich als Ammoniumsulfat oder Ammoniumnitrat.

⁴ Der Begriff «Faulwasser» meint den zu behandelnden Rücklauf aus der Faulschlammbehandlung. Synonyme sind «Zentrat» oder «Prozesswasser». Häufig ist auch das sogenannte Brüdenkondensat, welche in der Schlammabtrennung anfällt, im Faulwasser enthalten. Bei der biologischen Faulwasserbehandlung müssen Brüdenkondensate zum Teil separat entsorgt werden, aufgrund von toxischen Effekten auf nitrifizierende Bakterien.

⁵ Anammox bedeutet Anaerobe Ammoniumoxidation und ist ein biologisches Verfahren zur N-Elimination. Synonyme sind Deammonifikation oder «Partielle Nitrifikation und anaerobe Ammoniumoxidation» (PNAA).

In diese Studie eingeflossen sind ergänzend zur Literatur auch die Erfahrungen und das Wissen von nachfolgenden Expert/-innen:

- ARA-Betreiber mit einer N-Rückgewinnungsanlage (Kloten/Opfikon, Yverdon-les-Bains, Altenrhein, Straubing)
- Fachleute aus der Forschung (Eawag, FHNW, FH Aachen, Agroscope)
- Planer- und Ausrüster-Firmen
- Behörden (BLW)
- Düngervertreiber

2 STICKSTOFF-DÜNGER

2.1 N-DÜNGER HERKUNFT UND FORM

Stickstoff ist ein Schlüsselement für das Pflanzenwachstum. Landwirtschaftlich intensiv genutzte Böden benötigen N-Dünger. Ein N-Mangel würde das Pflanzenwachstum limitieren. Eine Überdüngung der Böden führt einerseits zu erhöhten N-Einträgen in die Gewässer, was die Wasserqualität und folglich die Wasserökosysteme beeinträchtigt. Andererseits bildet sich in den Böden mehr Lachgas (N_2O), ein starkes Treibhausgas. Dieses gelangt in die Atmosphäre und belastet das Klima. Pro Jahr gelangen in der Schweiz rund 36'000 Tonnen Stickstoff aus der Landwirtschaft in die Gewässer, was rund 80% der importierten Düngermenge entspricht. N-Dünger sollte deshalb möglichst effizient und bedarfsgerecht angewendet werden.

Die Schweizer Landwirtschaft und der Pflanzenbau benötigt jährlich knapp 200'000 Tonnen Stickstoff. Rund 77% davon stammt aus organischem Dünger. Dazu zählen Hofdünger/Weidegang (rund 40%), natürliche Stickstoffflüsse der Umwelt (z.B. N-Fixierung; rund 30%) und die Abfallwirtschaft (sogenannter Recyclingdünger, Gärgut/Kompost; rund 4%). Die restlichen rund 23% des Stickstoffes stammen aus importiertem Mineraldünger (siehe Tabelle 1).

Stickstoffeintrag Landwirtschaft und Pflanzenbau	
	t N/a
Hofdünger / Weidegang	85'900
N-Fixierung / Deposition	59'300
Gärgut / Kompost	7'400
Mineraldünger	45'700
Total	198'300

Tabelle 1 Stickstoffbedarf in der Schweiz durch die Landwirtschaft und den Pflanzenbau (Daten infras: [1]). Hofdünger/Weidegang, N-Fixierung/Deposition und Gärgut/Kompost zählen zum organischen Dünger und decken rund 77% des Bedarfs. Die restlichen 23% deckt importierter, mineralischer Dünger.

Mineraldünger wird rund um die Welt produziert. Dabei wandelt meistens der sogenannte Haber-Bosch Prozess Luftstickstoff (N_2) in Ammoniak um. Dieser Prozess benötigt grosse Mengen an Energie sowie Methan. Aus Methan bildet sich in diesem Prozess Wasserstoff (H_2), welcher zusammen mit N_2 zu Ammoniak reagiert. Entsprechend befinden sich die wichtigsten Hersteller von N-Dünger in Ländern, die auch über grosse Vorkommen an fossilen Brennstoffen verfügen. Das auf diese Weise synthetisierte Ammoniak lässt sich zu Harnstoff, Ammoniumnitrat, Ammoniumsulfat und Ammoniumphosphat verarbeiten [4]. Neben dem Haber-Bosch Prozess gibt es andere industrielle Prozesse, mit welchen Dünger hergestellt werden kann. Als Beispiele sind zu nennen: Ammonium-Sulfat als Nebenprodukt in der Abluftreinigung oder bei der Produktion von Vitaminen (Mitteilung Düngelieferant, 21.6.24).

Recyclingdünger besteht hauptsächlich aus flüssigem und festem Gärgut und aus Kompost [3]. Momentan wird nur etwa 4% des gesamten Düngerbedarfs der Schweiz über Recyclingdünger abgedeckt (siehe Tabelle 1).

Bis zum Jahr 2018 produzierte in der Schweiz die Lonza N-Dünger [2]. Seither verfügt die Schweiz über keine N-Dünger Inlandproduktion mehr. Sämtlichen mineralischen N-Dünger muss die Schweiz importieren. Das sind – gemäss einer N-Stoffflussanalyse aus dem Jahr 2018 – jährlich rund 45'700 t N als Mineraldünger [1]. Diese Importe stammen hauptsächlich aus Deutschland, Frankreich, den Niederlanden und Belgien. Mengenmässig wichtigster Handelspartner der Schweiz sind die Niederlande [4].

2.2 MARKTENTWICKLUNG

Die in die Schweiz importierte Menge N-Dünger blieb in den letzten 10 Jahren konstant [4]. Demgegenüber hat der weltweite N-Düngerbedarf in den vergangenen Jahren stetig zugenommen. Es ist zu erwarten, dass die weltweite Nachfrage auch künftig weiter ansteigen wird [3].

Die Dynamik der N-Düngerpreise hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie beispielsweise von den Energiepreisen, den Logistikketten und der allgemeinen Marktsituation. Die Weltmarktpreise für Dünger befanden sich anfangs 2020, nach einem langfristigen, abnehmenden Trend, auf einem tiefen Niveau (25 Euro pro Tonne Ammoniumsulfat; bei 8.5 Gewichtsprozenten Stickstoff). Dies änderte sich mit der Corona-Pandemie und dem Krieg in der Ukraine: Steigende Gas- und Energiekosten führten dazu, dass weniger Dünger produziert wurde. Durch diese Angebotsverknappung stieg der Preis deutlich an (maximaler Preis für Ammoniumsulfat bei rund 170 Euro pro Tonne). Seit anfangs 2023 sind die Düngerpreise wieder gefallen (Preis für Ammoniumsulfat lag im Sommer 2024 bei rund 30 Euro pro Tonne) (Mitteilung Düngelieferant, 21.6.2024).

Rund die Hälfte der N-Mineraldüngerimporte gelangt mit dem Schiff über den Rhein in die Schweiz. Es ist gut möglich, dass in Zukunft während längeren Perioden mit tiefen Wasserpegeln vermehrt auf die Strasse ausgewichen werden muss, was zu höheren Preisen führt [4] und die Umwelt stärker belastet.

2.3 N-DÜNGER AUS ARA

2.3.1 Potenziell verfügbare Düngermengen

Schweizer ARA könnten heute theoretisch rund 5'000 Tonnen N-Dünger pro Jahr produzieren. Dies unter der Annahme, dass im Faulwasser rund 15% des Stickstoffs aus dem Abwasser enthalten ist und, dass die Strippung 85% dieses Stickstoffs als Dünger zurückgewinnt.

Wird aufgrund des Betriebsaufwands davon ausgegangen, dass dies für kleine ARA unverhältnismässig ist, halbiert sich die realistische Düngermenge. D.h. die potenzielle Düngermenge aus Schweizer ARA mit mehr als 50'000 Einwohnerwerten (EW), liegt bei rund 2'500 Tonnen Stickstoff pro Jahr. Diese Abschätzung deckt sich mit den Literatur-Angaben [6].

Um diesen Anteil weiter zu erhöhen, könnte der Stickstoff aus dem Faulwasser von kleineren ARA zentralisiert auf grossen ARA rückgewonnen werden. Dagegen spricht jedoch, dass das Faulwasser während des Transports abkühlt und dadurch zu unerwünschten Ausfällungen führt. Zudem würde sich Wärmebedarf für den Prozess insgesamt erhöhen.

Durch den zurückgewonnenen Stickstoff aus ARA könnte die importierte Mineraldüngermenge um 5% bis 10% reduziert werden (Menge importierter Mineraldünger: 45'700 t/a [1]; siehe weiter oben). Dieser Anteil würde zunehmen, wenn sich die Düngereffizienz verbessern liesse.

2.3.2 Anforderungen an den N-Dünger

Der aus Abwasser zurückgewonnene N-Dünger fällt gemäss Dünger-Verordnung unter die Kategorie mineralische Recyclingdünger und muss daher die Grenzwerte für Recyclingdünger einhalten.

Derzeit findet eine Totalrevision der Düngerverordnungen statt. Diese hat zum Ziel, die neue Düngerverordnung der EU (Verordnung (EU) 2019/1009) möglichst weitgehend zu übernehmen.

men. Dünger, die aus dem Recycling von Stickstoff aus Abwasser oder Klärschlamm stammen, würden dann weiterhin als Recyclingdünger gelten. Die aktuell geltenden Grenzwerte würden dann nicht angepasst und würden weiterhin gelten. Auch wären beim Zulassungsprozess keine Änderungen vorgesehen. N-Dünger, aus «rezykliertem» Stickstoff, wären weiterhin bewilligungspflichtig (siehe Kapitel 2.3.4). Das Beurteilungsverfahren bliebe gleich.

Der ARA-Dünger kann gegenwärtig nicht als Bio-Dünger verkauft werden, weil die eingesetzten Chemikalien nicht den «Bio Suisse»-Vorgaben entsprechen. Im Dezember 2022 wurde im Schweizer Parlament eine Interpellation an den Bundesrat eingereicht, welche den Bundesrat beauftragt, diesen Entscheid zu hinterfragen. Die Interpellation hatte aber keinen Erfolg [13].

2.3.3 Produzierter ARA-Dünger und seine Anwendung

Die im Rahmen dieser Studie betrachteten Schweizer N-Rückgewinnungsanlagen geben das produzierte flüssige Ammoniumsulfat als Dünger in die Landwirtschaft ab (jährlich rund 80 Tonnen Stickstoff in Form von Ammoniumsulfat aus zwei Anlagen). Zum Vergleich: 2021 wurden rund 5'000 Tonnen Stickstoff als Ammoniumsulfat importiert.

Alternativ zu Ammoniumsulfat wäre auch die Produktion von Ammoniumphosphat möglich. Die dafür benötigte Phosphorsäure ist jedoch im Einkauf einiges teurer als Schwefelsäure. Ob dies durch den erhöhten Verkaufswert kompensiert würde, ist nicht bekannt. Daneben wäre es auch denkbar Ammoniumnitrat herzustellen. Dazu fehlen aber noch Erfahrungen.

Ammoniumsulfat kann auf zwei Arten auf den Feldern ausgebracht werden: (i) «konventionell», d.h. der Gülle beigemischt, (ii) mittels des sogenannten CULTAN-Verfahrens (siehe Box 1).

Box 1: Weitere Informationen zum CULTAN-Verfahren (Auszug aus [27])

«Beim CULTAN-Verfahren wird Stickstoff (N) in Form einer hochkonzentrierten Ammoniumdüngerlösung mit niedrigem pH-Wert bei Vegetationsbeginn in den Wurzelbereich der Pflanzen gespritzt und bildet dort ein sogenanntes Depot. Ammonium (NH_4^+) wird im Gegensatz zu Nitrat, das bei der herkömmlichen Düngung dominiert, weniger ausgewaschen.

Die hohe Ammoniumkonzentration und der niedrige pH-Wert im CULTAN-Depot sollen zu einer fortschreitenden Nitrifikation des Depots und damit zu einer besseren Synchronisation zwischen N-Bedarf der Pflanzen und der N-Verfügbarkeit im Boden führen.

Ausserdem ist die Ammoniumernährung von Pflanzen oft physiologisch vorteilhafter, was sich in besserer N-Aufnahme und erhöhter Standfestigkeit der Pflanzen zeigt. Das Verfahren soll somit die Effizienz der Nutzung von Dünger-N erhöhen und die häufig einhergehenden N-Verluste reduzieren, während das Ertragsniveau erhalten bleibt oder sogar leicht gesteigert werden kann.

Vorteile/Synergien

- *Tendenziell höhere N-Effizienz und geringere N-Auswaschung mit gleichem oder leicht höherem Ertragsniveau.*
- *Bei Mehrfachdüngung kann in der Regel mindestens eine N-Gabe pro Kultur eingespart werden (Arbeits- und Kostenersparnis) und potenziell die N-Gesamtdüngung reduziert werden.*
- *Die CULTAN-Lösung kann aus recyceltem Ammonium aus Kläranlagen, aus Gülle*

oder Gärresten hergestellt werden.

Nachteile/Limitierungen/Zielkonflikte

- *Die Ausbringung erfordert Anpassungen im Bereich der Logistik: Injektionsausrüstung, LKW-Transport von grossen Mengen an Düngerlösungen und ggf. temporäre Lagerung vor Ort.*
- *Die Düngung muss entweder durch einen Dienstleister durchgeführt werden oder benötigt die Investition in Applikationstechnik.*
- *CULTAN könnte auch andere N-Verlustflüsse, einschliesslich N_2O und N_2 , beeinflussen. Dies ist aber noch wenig erforscht.»*

Grundsätzlich weisen Injektionsverfahren (wie das CULTAN-Verfahren) verglichen mit anderen Düngungsverfahren weniger atmosphärischen Stickstoff-Verlust auf. Das Ausmass dieser reduzierten Verluste ist aber nicht bekannt. Zudem ist das Ausmass abhängig von der Dünger-Art mit der man das CULTAN-Verfahren vergleicht (Tel. Agroscope, 23. Mai 2025).

Das CULTAN-Verfahren ist nicht auf ARA-Dünger beschränkt, es kann beispielsweise auch industriell hergestelltes Ammoniumsulfat verwendet werden.

Gegenwärtig werden in der Schweiz etwa 420 ha mit CULTAN gedüngt [27]. Verglichen mit der gesamten, schweizerischen Ackerland-Fläche von knapp 400'000 ha ist das ein sehr geringer Anteil [28].

2.3.4 Voraussetzungen für den Verkauf von ARA-Dünger

Folgende Voraussetzungen müssen in der Schweiz für den Verkauf von Dünger erfüllt sein:

- Für den Dünger muss eine Bewilligung des Bundesamts für Landwirtschaft (BLW) vorliegen. Diese Bewilligung ist in der Regel für 10 Jahre gültig. Die drei Schweizer ARA mit einer N-Rückgewinnung konnten ihren N-Dünger ohne zusätzliche Aufbereitung des Düngers bewilligen lassen.
- Bei gewissen Dünger-Abnehmern muss der Dünger mindestens 8% Ammonium aufweisen. Diese Vorgabe kann bei einer Membranstrippung dazu führen, dass zusätzlich eine Membrandestillation notwendig ist, um den Ammonium-Gehalt zu erhöhen.
- Damit die ARA ihren produzierten Dünger vertreiben kann, benötigt sie eine entsprechende Zulassung. Die ARA kann diese Zulassung selbst beantragen. Es dauert erfahrungsgemäss mehrere Monate, bis sie vorliegt. In diesem Fall darf die ARA ihren Dünger direkt an Landwirtschaftsbetriebe verkaufen. Alternativ kann die ARA ihren N-Dünger an einen Dünger-Vertreiber verkaufen. Der Dünger-Vertreiber verfügt bereits über eine solche Zulassung.
- Die ARA muss für ihren N-Dünger eine/-n Abnehmer/-in finden. Da die Nachfrage nach N-Dünger aus ARA aus der Landwirtschaft hoch ist, stellt dies kein Hindernis dar. Die angefragten ARA haben mit der/n Abnehmer/-innen langfristige Verträge abgeschlossen.
- Die ARA benötigt einen Tank, in welchem sie den produzierten N-Dünger zwischenlagern kann, weil der/die Abnehmer/-in den Dünger periodisch abholt. Wird der Dünger direkt an einen Landwirtschaftsbetrieb abgegeben, muss die Abnahmeperiode (v.a. zwischen März und Juni) berücksichtigt werden, was einen grösseren Tank zur Folge haben kann, als wenn der Dünger an einen Düngertreiber abgegeben wird.

2.3.5 Vor- und Nachteile des ARA-Düngers

Die Vor- und Nachteile des Düngers, wenn er mittels CULTAN-Verfahren ausgebracht wird, sind in Box 1 im Kapitel 2.3.3 beschrieben. Weitere Vor- und Nachteile des ARA-Düngers sind (nicht abschliessend):

Vorteile:

- ARA-Dünger hält Stickstoff lokal im Kreislauf. Dadurch muss insgesamt weniger Stickstoff in die Schweiz eingeführt werden.
- Die Nachfrage nach N-Dünger aus ARA durch die Landwirtschaft ist hoch.

Nachteile:

- ARA brauchen eine Strippungsanlage, um N-Dünger aus ihrem Faulwasser zu produzieren.
- Der Betrieb einer Strippungsanlage ist anspruchsvoll, erhöht den Betriebsaufwand und benötigt ein entsprechendes Prozessverständnis.

2.3.6 Alternative Verwertungswege

Eine ARA in Deutschland verkauft ihr produziertes Ammoniumsulfat als sogenannten Reststoff an die Industrie. Die ARA verhandelt den Preis mit dem Abnehmer jährlich neu.

Es gibt einige Industriezweige, die Ammoniumsulfat einsetzen. Beispiele sind die Lebensmittelindustrie, die Spanplattenindustrie, aber auch die Trinkwasseraufbereitung. Ob das Ammoniumsulfat aus ARA den jeweiligen Anforderungen entspricht, muss geprüft werden. Würde der zurück gewonnene Stickstoff als reines Ammoniak vorliegen, wäre eine Verwendung in der Brennstoffzellenindustrie oder in der Rauchgasreinigung möglich.

3 N-RÜCKGEWINNUNG AUF ARA: VERFAHRENSÜBERSICHT

3.1 LUFTSTRIPPUNG

Die Luftstrippung ist im DACH-Raum das am weitesten verbreitete Verfahren zur N-Rückgewinnung. Es wurden bis jetzt etwa 8 Anlagen gebaut. Auf der ARA Kloten/Opfikon wurde von 2010 bis 2020 die einzige Luftstrippung mit CO₂-Strippung (eine optimierte Verfahrensführung; siehe weiter unten) der Schweiz betrieben.

Bei der Luftstrippung wird das Faulwasser zuerst erwärmt, von etwa 25 bis 35°C auf maximal 65°C. Danach erfolgt eine pH-Erhöhung mittels Zugabe von Lauge. Das Faulwasser wird über eine im Gegenstrom belüftete Kolonne mit Füllerelementen geführt. Durch die pH-Erhöhung dissoziiert das gelöste Ammonium zu Ammoniak und geht in die Gasphase über. Mittels saurer Wäsche wird das mit Ammoniak beladene Prozessgas in einer zweiten Kolonne, welche ebenfalls Füllerelemente enthält, mit Schwefelsäure gebunden. Ammoniak bildet zusammen mit der Schwefelsäure Ammoniumsulfat.

Eine optimierte Verfahrensführung enthält zusätzlich eine vorgeschaltete Kolonne. In dieser wird das im Faulwasser enthaltene CO₂ ausgegast. Der pH steigt dadurch an. Mit dieser Verfahrensführung lässt sich bis zu 50% der Natronlauge einsparen [5].

3.2 MEMBRANSTRIPPUNG

Die membranbasierte N-Rückgewinnung ist eine noch eher «junge» Technologie in der Optimierungsphase, mit bisher erst wenigen Praxiserfahrungen. Die Technologie wurde in der Schweiz entwickelt. Seit 2016 betreibt die ARA in Yverdon-les-Bains die erste grosstechnische Anlage in Europa. Seit 2021 ist auch auf der ARA Altenrhein eine solche Anlage in Betrieb.

Bei der Membranstrippung wird das Faulwasser zuerst erwärmt, von etwa 25 bis 35°C auf maximal 45°C. Danach folgt eine mehrstufige Vorbehandlung, bestehend aus CO₂-Strippung, Koagulation und Flockung mit anschliessendem Lamellenabscheider, sowie mehreren hintereinander geschalteten Filtern. Das vorbehandelte Faulwasser wird dann nochmals erwärmt und – wie im Falle der ARA Yverdon-les-Bains – nochmals filtriert, bevor es schliesslich über die Membran geführt wird. Die eingesetzten Membranen sind gaspermeabel, d.h. sie sind durchlässig für Ammoniak. Die Membran besteht aus Hohlfasern, wobei das Faulwasser außerhalb zirkuliert, und der Flüssigdünger innerhalb. Auf der Membran laufen die nachfolgenden Prozesse ab:

- Auf der Membranzustrom-Seite erhöht die zugegebene Lauge den pH, wodurch das gelöste Ammonium zu gasförmigem Ammoniak übergeht.
- Ammoniak – und auch Wasserdampf – diffundieren durch die hydrophobe Membran (die Membran ist nur bezogen auf die Flüssigphase des Wassers hydrophob).
- Auf der Filtrat-Seite bindet die zugegebene Schwefelsäure das Ammoniak. Es entsteht Ammoniumsulfat [7].

3.3 WEITERE VERFAHREN ZUR N-RÜCKGEWINNUNG

Neben der Luft- und Membranstrippung existieren weitere Verfahren zur N-Rückgewinnung aus dem Abwasser. Diese sind in der Schweiz für diesen Anwendungsbereich jedoch wenig bekannt, oder wenig vielversprechend. Weitere Rückgewinnungsmöglichkeiten werden nachfolgend kurz erläutert. Diese Verfahren haben in einer Vergleichsstudie [8] positiv abge-

schnitten in Bezug auf folgende Kriterien: (i) Rückgewinnungsgrad (Nachhaltigkeit), (ii) Anwendbarkeit des produzierten Düngers, (iii) Referenzanlagen und (iv) optimaler Konzentrationsbereich (in Bezug auf die Weiterverarbeitung).

Die vielversprechendsten Verfahren sind:

- Ammoniak mittels Vakuum-Membranen extrahieren
- Schlamm Trocknung und N-Rückgewinnung aus der Abluft
- N-Rückgewinnung aus der Urinbehandlung
- Struvit-Fällung aus Faulwasser oder Faulschlamm

3.3.1 Ammoniak mittels Vakuum-Membranen extrahieren

Auch diese Verfahrensführung bedingt eine pH-Erhöhung im Faulwasser beziehungsweise im Faulschlamm. In der darüber liegenden Gasphase fördert ein angelegtes Vakuum oder ein sogenannter Dampfdruckgradient, dass sich das gasförmige Ammoniak dort ansammelt. Danach trennt eine Membran das Ammoniak von der Gasphase ab. Der Vorteil dieser Verfahrensführung ist, dass die Membranen nicht in direktem Kontakt mit dem Faulwasser oder dem Faulschlamm stehen und dadurch weniger Membran-Fouling zu erwarten ist. Der resultierende N-Dünger weist einen höheren N-Gehalt auf als bei der Membranstrippung. Dieses Verfahren ist als potenziell vielversprechend einzustufen, mit ersten Erfahrungen im Pilotmassstab. Grosstechnische Anlagen sind nicht bekannt.

3.3.2 Schlamm Trocknung und N-Rückgewinnung aus der Abluft

Die Trocknung von entwässertem Klärschlamm (bei 100-160°C) setzt Ammoniak frei. Das enthaltene Ammoniak in dieser Abluft kann zurückgewonnen werden, entweder mittels saurer Wäsche oder mittels einer sogenannten fraktionierten Rektifikation.

In Deutschland und den Niederlanden kommt dieses Verfahren – also eine Schlamm Trocknung mit einer N-Rückgewinnung aus der Abluft – zur Anwendung. In der Schweiz existieren nur wenige Schlamm Trocknungsanlagen. Viele wurden in den letzten Jahren zurückgebaut. Dieser Trend dürfte sich durch die Pflicht zur P-Rückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm verstärken. Denn derzeit existieren keine Verfahren zur P-Rückgewinnung aus dem Faulwasser, sowie aus dem entwässerten und getrockneten Klärschlamm. Zudem dürfte die Klärschlamm entsorgung über die Zementindustrie (mit vorgängiger Trocknung) weiter abnehmen. Das Potential dieser Technologie wird insgesamt als gering eingeschätzt.

3.3.3 N-Rückgewinnung aus der Urinbehandlung

Bezogen auf die zurückgewonnene Stickstoff-Menge ist die separate Urinbehandlung am effizientesten. Vor der Anwendung als Dünger muss Urin vorbehandelt werden. Das heutige Siedlungsentwässerungssystem ist nicht auf eine separate Urinbehandlung ausgelegt. Deshalb wird eine separate Urinbehandlung als Ergänzung des bestehenden Systems beziehungsweise als Speziallösung eingestuft.

3.3.4 Struvit-Fällung aus Faulwasser oder Faulschlamm

Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) wird als Struvit bezeichnet und kann sowohl aus dem Faulwasser wie auch aus dem Faulschlamm gewonnen werden. Beim Faulwasser muss zusätzlich Magnesium beigegeben und der pH angehoben werden. Auch lässt sich Struvit im Faulschlamm (vor der Entwässerung) ausfällen, beispielsweise mittels sogenanntem AirPrex® Verfahren.

Eine solche Struvit-Fällung eignet sich vor allem für ARA, welche Phosphor biologisch entfernen (sogenannten «Bio-P»-Anlagen). Für ARA mit chemischer P-Elimination müsste mittels vorgängiger Ansäuerung der im Eisenphosphat gebundene P zuerst zugänglich gemacht werden (sogenanntes Stuttgarter Verfahren).

Das N:P-Verhältnis in Struvit beträgt 1:1, im Faulwasser liegt es typischerweise bei rund 100:1. Das bedeutet, dass dem Faulwasser zusätzlich Phosphor beigegeben werden müsste, um einen hohen Anteil an Stickstoff zurückzugewinnen [6]. Die Struvit-Fällung ist somit als zu wenig effizient bezogen auf die N-Rückgewinnung einzustufen.

Aufgrund der vorangehenden Ausführungen stellen die Luft- und Membranstrippung die aktuell besten Lösungen dar, um Stickstoff aus dem Abwasser zurückzugewinnen. Im nächsten Kapitel wird daher auf diese beiden Verfahren vertieft eingegangen.

4 FOKUS LUFT- UND MEMBRANSTRIPPUNG

Im DACH-Raum betreiben rund 10 ARA eine Strippung, um Stickstoff aus dem Faulwasser zurückzugewinnen. Die Mehrheit der 10 Anlagen sind Luftstrippungen. Im Vergleich dazu: Ebenfalls im DACH-Raum führen rund 60 ARA eine separate Faulwasserbehandlung durch, in den meisten Fällen mit biologischen Verfahren (z.B. mittels Anammox-Prozess) [9].

Neben dem DACH-Raum sind auch Länder in Nordeuropa und die USA führend in der Entwicklung und Anwendung von Rücklaufbehandlungsanlagen (Strippung und biologische Verfahren). Auf die Erfahrungen aus diesen Ländern geht der vorliegende Bericht nicht ein. Es empfiehlt sich, in einem nächsten Schritt, den Erfahrungsaustausch zwischen den Betreibern solcher Anlagen anzustossen.

Dieses Kapitel geht auf die Erfahrungen der ersten Strippungsanlagen ein. Es fokussiert auf die Chancen und Herausforderungen und zeigt mögliche Entwicklungs- und Optimierungspotentiale auf. Denn es ist wichtig, von diesen ersten Anlagen zu lernen und diese Erfahrungen an andere ARA weiterzugeben. Dadurch reduzieren sich die Risiken für Entscheidungsträger, was die weitere Umsetzung unterstützt.

4.1 ERSTE (BETRIEBS-)ERFAHRUNGEN

4.1.1 Chancen

Die interviewten Betreiber/-innen solcher Strippungsanlagen haben sich aus nachfolgenden Gründen für die N-Rückgewinnung aus dem Faulwasser entschieden:

- Hohe Rücklaufbelastung und zu kleine Biologie.
- Geringer Platzbedarf des Verfahrens.
- Nutzung von bestehendem Gebäude möglich.
- Wahl eines Verfahrens, welches unabhängig von Biomasse funktioniert und über die pH-Anpassung eine einfache Stellschraube zur Prozesssteuerung hat.
- Hohe Ammonium-Konzentrationen im Faulwasser und dadurch Betriebsprobleme bei der biologischen Behandlung (Anammox-Prozess⁶).

Die Betreiber sehen zudem über ihre ARA hinaus folgende Chancen:

- Lokale Kreislaufwirtschaft stärken.
- Lokaler Düngermarkt statt internationaler Abhängigkeiten⁷.
- Keine Bildung von N₂O (im Gegensatz zu den biologischen N-Eliminationsverfahren)⁸.

⁶ Diese Aussage bezieht sich auf eine 1-stufig betriebene Anammox-Anlage. Pilotversuche deuten darauf hin, dass eine 2-stufige Anlage besser mit hohen Ammoniumkonzentrationen umgehen kann. Der Nachweis dafür steht im Vollmasstab aber noch aus.

⁷ Bezogen auf den Dünger wird die Schweiz tatsächlich unabhängiger. Die Säure und Lauge für die Düngerproduktion kommen aber auch aus dem Ausland.

⁸ Dieses Argument gilt nur, wenn die Anammox-Anlage ohne RTO betrieben wird. Mit RTO sind die beiden Varianten bezüglich N₂O vergleichbar (siehe weiter unten in diesem Bericht).

4.1.2 Herausforderungen

Betriebsaufwand

Von allen Betreiber/-innen, die im Rahmen dieser Studie befragt wurden, wird der Betriebsaufwand der Strippung als Herausforderung betrachtet. Folgender Betriebsaufwand fällt regelmässig an:

- Lauge- und Schwefelsäureverbrauch: Konstanter Verbrauch, Zugabe läuft automatisiert.
- Luftstrippung: Säuerung der Kolonnen gegen Ablagerungen (z.B. mit Salzsäure): Mindestens einmal pro Woche, abhängig von der Zusammensetzung des Faulwassers, läuft i.d.R. automatisiert.
- Membranstrippung: Intensive chemische, händische Reinigung der Membrananlage: Rund alle 3 Monate.
- Ersatz der Strippungs-Ausrüstung:
 - o Kolonnen: Bis zu alle 2 Jahre, abhängig von der Beanspruchung durch Säuerung.
 - o Membranen: Wenige Erfahrungswerte, erwartet alle 4 Jahre.
- Kalibrierung der pH-Sonden.

Für jene Schweizer ARA, die ihre Luftstrippungsanlage nicht mehr betreibt, war der Betriebsaufwand massgebend für diese Entscheidung: Einerseits war die Anlage wegen der hohen Betriebsmittelkosten nicht wirtschaftlich und andererseits wurde die ARA ausgebaut, was zusätzliche personelle Ressourcen band. Mit der ausgebauten Biologie besteht, aufgrund der zusätzlichen Kapazität, nicht mehr die Notwendigkeit einer Rücklaufbehandlung.

Abhängigkeit Chemikalienpreise

Einen grossen Teil der Betriebskosten machen die Kosten für die Chemikalien aus. Ändern sich die Chemikalienpreise beeinflusst dies die Wirtschaftlichkeit der N-Rückgewinnung stark. Im Jahr 2022/23 sind die Chemikalien-Preise stark angestiegen. Zwischen 2021 und 2023 ist der Preis für Ammoniumsulfat um das 4-5fache gestiegen. 2024 war er wieder auf dem Niveau von 2021 (Informationen zur Preisentwicklung basieren auf dem Gespräch mit einem Düngelieferanten, 21.6.2024). Aufgrund von langjährigen Abnahmeverträgen passen ARA momentan den Preis ihres Düngers nicht an die Marktpreise an. Eine Weltmarktpreisbindung des eigenen Düngers würde diese Preisentwicklungen berücksichtigen.

Um von den Entwicklungen der (kurzfristigen) Chemikalien-Preise unabhängiger zu werden, könnten beispielsweise alternative Chemikalien genutzt werden (z.B. Kalkwasser statt Lauge; es ist bekannt, dass es in den USA einige Anlagen gibt, die so betrieben werden).

Aufwand für die Produktabnahme

Die beiden Schweizer ARA mit einer Strippungsanlage geben ihr produziertes Ammoniumsulfat an die Landwirtschaft ab. Dies ist mit einem gewissen Mehraufwand verbunden (siehe Kapitel 2.3.4), der von einigen ARA-Betreibern als Herausforderung betrachtet wird. Die interviewte Anlage in Deutschland gibt ihr Ammoniumsulfat in die Reststoffverwertung ab. Das heisst, in diesem Fall wird das Ammoniumsulfat industriell weiterverwertet und nicht als Dünger abgegeben.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit war für keine der befragten ARA, welche eine N-Rückgewinnungsanlage betreibt, ein Grund sich für die Strippung zu entscheiden. Gemäss der aktuell zur Verfügung stehenden Daten führt der zusätzliche Betriebsaufwand dazu, dass die Strippung ohne

Fördermittel oder Kompensationszahlung heute nicht wirtschaftlich ist (siehe auch Kapitel 5.1).

Aktuell ist es möglich, Kompensationsgelder der Stiftung KliK zu erhalten für Minderemissionen an Lachgas aus der biologischen Stufe durch den Einbau einer Strippung im Faulwasser [26]. Dabei liegt der Preis pro eingesparter Tonne CO₂-Äquivalent bei 145 CHF bis die Investitionskosten amortisiert sind und danach bei 100 CHF / tCO₂-Äquivalent. Eine der betrachteten ARA ist bei diesem KliK-Programm angemeldet. Eine Voraussetzung für das Programm ist der messtechnische Nachweis der geringeren N₂O-Emissionen aus der biologischen Reinigungsstufe, welche aufgrund der geringeren N-Fracht resultieren. Die Höhe der Kompensationsgelder hängt davon ab, in welchem Umfang die N₂O-Emissionen aus der biologischen Stufe zurückgehen, was wiederum unterschiedlich ist von ARA zu ARA. Mittels der Kompensationsgelder ist es möglich, die Jahreskosten für die Strippung zu decken, wenn die Lachgasreduktion in der Biologie substanziell ist und der Betrieb der Strippung optimal läuft (d.h. hohe Auslastung der Strippungsanlage und tiefer Chemikalienverbrauch) [26]. Das KliK-Programm läuft noch bis 2030. Werden ARA künftig verpflichtet, mehr Stickstoff zu eliminieren, ist fraglich, ob ARA betreffend Lachgasemissionen weiterhin unter die KliK-Kriterien fallen für Kompensationszahlungen.

4.2 ENTWICKLUNGS- UND OPTIMIERUNGSPOTENTIALE

4.2.1 Luftstrippung

Bei der Luftstrippung ist der Entwicklungsbedarf als gering einzustufen. Folgende Optimierungsmöglichkeiten sind bekannt:

- Eine vorgeschaltete CO₂-Strippung entfernt CO₂ aus dem Faulwasser und erhöht dadurch den pH. Es braucht dadurch weniger Lauge.
- Je höher die Betriebstemperatur, desto effizienter der Übergang von Ammonium zu Ammoniak und desto tiefer der Chemikalienverbrauch. Dies ist von Bedeutung, da der Verbrauch der Natronlauge einen grossen Einfluss auf die Klimarelevanz des Verfahrens hat. Steht auf einer ARA sehr viel Wärme zur Verfügung, die nicht anderweitig verwendet werden kann, kann der Prozess theoretisch mit einer höheren Betriebstemperatur optimiert werden. Dabei ist aber die Temperaturverträglichkeit der Materialien zu beachten. Das Material, welches für die Kolonnen der Luftstrippung standardmässig eingesetzt wird, ist für maximal 60 bis 65°C ausgelegt. Hitzeresistentere Materialien sind in der Anschaffung wesentlich teurer.

4.2.2 Membranstrippung

Die oben genannten Optimierungen gelten auch für die Membranstrippung. Zusätzliche Aspekte für die Membranstrippung sind:

- Die Stickstoffkonzentration im Dünger ist abhängig von der Temperatur und der NH₄⁺-Konzentration im Faulwasser. Mittels nachgeschalteter Membrandestillation kann das Ammoniumsulfat aus der Membranstrippung aufkonzentriert werden. Mit diesem Schritt lassen sich die Ammoniumkonzentrationen im produzierten Dünger verdoppeln. Es fällt kein zusätzlicher Laugenbedarf an, da für die Destillation die bereits verbrauchte Lauge wiederverwendet wird. Die ARA Yverdon-les-Bains konzentriert ihren Dünger seit 2022 mittels Membrandestillation auf 9% auf.
- Momentan werden die Membranen auf 45°C betrieben. Aktuell wird an temperaturresistenteren Membranen geforscht, die Betriebstemperaturen von bis zu 60°C ermöglichen.

Dadurch wäre eine substanzielle Laugen-Einsparung möglich. Da durch die höhere Betriebstemperatur auch mehr Wasserdampf entsteht und den Dünger verdünnt, ist eine nachgeschaltete Membrandestillation bei höherer Betriebstemperatur zwingend.

- Die eingesetzten Membranen sind hydrophob (bezogen auf die Flüssigphase). Dies trägt zur Effizienz der Membranstrippung bei. Die heute eingesetzten Membranen erreichen, ohne nachgeschaltete Membrandestillation, im produzierten Ammoniumsulfat eine N-Konzentration von etwa 5%. Dieser Wert ist tiefer als bei der Luftstrippung, welche eine N-Konzentration von 7% bis 8% erreicht. Die Membranen können bei unsachgemässer Behandlung ihre hydrophobe Eigenschaft verlieren, zum Beispiel wenn sich zu viel ölhaltiges Polymer aus der Faulschlammmentwässerung im Faulwasser befindet. Das hat zur Folge, dass auch flüssiges Wasser durch die Membranen gelangt und das Ammoniumsulfat verdünnt. Die Membranen können dann vor Ort oder im Werk regeneriert werden. Dabei wird die Membran chemisch gereinigt. Zielführender ist es, solche Störstoffe bereits in der Faulwasser-Vorbehandlung zu entfernen oder ölfreie Polymere zu verwenden. Derzeit wird auf der ARA Altenrhein ein verbessertes Verfahren zur Entfernung von Öl getestet und eingesetzt.
- Es ist zu beachten, dass bei der Vorbehandlung 5% bis 10% des Stickstoffs aus dem Faulwasser entweichen kann. Daher sollte beispielsweise der Reaktor für die Vorbehandlung luftdicht abgeschlossen sein. Bei den Membranstrippungsanlagen laufen diesbezüglich Optimierungen.

4.2.3 Faulwasser-Vorbehandlung

Sowohl für die Luftstrippung als auch für die Membranstrippung sollte der Feststoffanteil im Faulwasser möglichst gering sein. Das verhindert Ablagerungen und Verstopfungen in den Leitungen, den Wärmetauschern, den Vorfiltern und auf den Kolonnen (Luftstrippung) beziehungsweise auf den Membranen (Membranstrippung). Das hilft, den Betriebsaufwand und die Kosten zu minimieren. Es ist daher wichtig, die vorgelagerte Schlammmentwässerung so zu betreiben, dass das Faulwasser möglichst wenig Feststoffe enthält. Dem läuft entgegen, dass für die ARA ein möglichst hoher Entwässerungsgrad zentral ist, weil dies die Entsorgungskosten reduziert. Das Faulwasser ist dadurch aber tendenziell stärker mit Feststoffen belastet.

Lässt sich die Entwässerung hinsichtlich eines möglichst feststoffarmen Faulwassers nicht weiter optimieren, ist eine zusätzliche Vorbehandlung notwendig. Das gilt insbesondere für die Membranstrippung. Aber auch bei der Luftstrippung kann der Feststoffgehalt im Faulwasser beispielsweise mittels sogenannten Schrägklärern oder Filtern weiter reduziert werden. Ein Online-Monitoring der manchmal stark schwankenden Qualität des Faulwassers (insbesondere die Zugabe von Polymeren) würde es zudem ermöglichen, die Vorbehandlung anzupassen.

Einen weiteren wichtigen Punkt stellen Ausfällungen dar: Die Anhebung des pH-Werts führt zu Ausfällungen im Faulwasser. Solche Ausfällungen sollten möglichst vor den Membranen und vor der Füllkörperkolonne der Luftstrippung erfolgen. Ansonsten tritt an den Membranoberflächen ein starkes sogenanntes Scaling auf und die Kolonnen bei der Luftstrippung verblocken. Dies zieht einen entsprechenden Reinigungsaufwand und Säureverbrauch mit sich. Um den Betrieb zu vereinfachen, wird bei den Anlagen in Yverdon und Altenrhein aktuell ein neues Vorbehandlungsverfahren eingesetzt. Diese optimierte Vorbehandlung minimiert die Kalkbildung und verringert die Notwendigkeit einer automatischen und manuellen Wartung durch das Personal.

4.2.4 Möglichst hohe N-Konzentration im Faulwasser

Höhere N-Konzentrationen im Faulwasser machen die Strippung effizienter. Mittels sogenannter Desintegration oder seriellen Betrieb von mehreren Faultürmen lässt sich der Abbau in der Faulung erhöhen, was höhere N-Konzentrationen zur Folge hat. Als Nebeneffekt könnten sich aber auch die Konzentrationen an gelöstem organischem Kohlenstoff im Faulwasser stark erhöhen. Ob sich dies negativ auf die Strippung auswirkt, wurde im Rahmen dieser Studie nicht abgeklärt.

4.2.5 Kostenentwicklung

Die interviewten Expert/-innen sehen sowohl bei den Betriebs- als auch bei den Investitionskosten der Luft- und Membranstrippung keine massgebenden Kostenentwicklungen, welche die beiden Verfahren wesentlich günstiger oder teurer machen würden. Selbst wenn die Membranen günstiger würden, hätte dies auf die gesamten Kosten des Verfahrens keinen signifikanten Einfluss. Die Abhängigkeit von den Chemikalienpreisen bleibt bestehen.

4.3 SYNERGIEN MIT ANDEREN BEREICHEN

4.3.1 Phosphor-Rückgewinnung

Die Phosphor (P)-Rückgewinnung kann an verschiedenen Stellen der ARA erfolgen: (i) im ausgefaulten Klärschlamm, (ii) im entwässerten Klärschlamm, (iii) im Faulwasser oder (iv) in der Klärschlammasche. Der grösste Teil des P befindet sich in der festen Phase. Das bedeutet, dass die P-Rückgewinnung aus der festen Phase am effizientesten ist. Wie weiter oben erwähnt, kommt für Stickstoff lediglich die Rückgewinnung aus dem Faulwasser in Frage. Die P- und N-Rückgewinnung tangieren sich nicht.

Es ist aber denkbar, dass zukünftig – je nach Wirtschaftlichkeit – unterschiedliche Verfahrenskombinationen umgesetzt werden. So könnte der Faulschlamm beispielsweise zuerst einer Struvitfällung unterzogen und anschliessend entwässert werden. Das anfallende Faulwasser könnte anschliessend gestrippt werden. Dies würde die Strippung selbst zwar weniger effizient machen (weil die N-Konzentration im Faulwasser tiefer wäre), insgesamt liessen sich aber mehr Nährstoffe direkt auf der ARA zurückgewinnen.

4.3.2 Klärgasproduktion

Ein höherer Abbau in der Faulung führt nicht nur zu höheren N-Konzentrationen im Faulwasser (und das wiederum zu einer effizienteren Strippung), sondern auch zu einer höheren Klärgasproduktion.

4.3.3 Separate Urinbehandlung

Wird in Teilen des ARA-Einzugsgebiets der Urin separat gesammelt, kann dieser auf der ARA nach einer entsprechenden Vorbehandlung der Strippung zugegeben werden. Dadurch erhöht sich die Effizienz der N-Rückgewinnung gegenüber der herkömmlichen Ableitung des Urins über die Kanalisation. Auf der ARA Kloten/Opfikon wurden mit dieser Urin-Mitbehandlung gute Erfahrungen gemacht [5].

4.3.4 Abluftbehandlung

Wenn auf der ARA bereits eine Abluftbehandlung mittels chemischer Wäscher betrieben wird, ist der Umgang mit Laugen und Säuren dem ARA-Betriebspersonal bekannt. Allenfalls

kann die bestehende Lagerungsinfrastruktur (für die chemische Abluftwäsche) für die Strip-pung mitgenutzt werden.

5 KOSTEN UND TREIBHAUSGASEMISSIONEN IM VERGLEICH

Die vorangehenden Kapitel zeigten auf, dass eine N-Rückgewinnung aus dem Faulwasser mittels Luft- oder Membranstrippung technisch umsetzbar ist. Dieses Kapitel geht darauf ein, wie die Strippung hinsichtlich Kosten (Investitions-, Betriebskosten und Jahreskosten) und hinsichtlich Treibhausgasemissionen zu beurteilen ist. Es werden zwei Fälle mit unterschiedlichen Systemgrenzen betrachtet:

- N-Produktion mittels Strippung im Vergleich zur industriellen N-Produktion (z.B. mittels Haber-Bosch Prozess), weil gemäss revidiertem USG dieser Vergleich relevant ist.
- Faulwasserbehandlung mittels Strippung im Vergleich zur biologischen Faulwasserbehandlung, weil für gewisse ARA eine separate Faulwasserbehandlung eine Möglichkeit darstellt, um ihre N-Elimination zu erhöhen. Das wird im Zuge der Umsetzung der Motion 20.4261 (Reduktion von Stickstoffeinträgen aus ARA) gefordert. Aus Vergleichbarkeitsgründen wurde die industrielle N-Dünger-Produktion bei der biologischen Faulwasserbehandlung miteingerechnet.

Es wird die Option mitbetrachtet, dass im Anammox-Verfahren die Abluft mittels regenerativ-thermischer Oxidation (RTO) behandelt werden kann. Dafür wird die Abluft auf mindestens 980°C erhöht und N₂O zu rund 90% eliminiert. Diese Temperaturerhöhung lässt sich entweder mit Hilfe von aufbereitetem Biogas oder mittels elektrisch erzeugter Wärme erreichen. Nicht aufbereitetes Klärgas eignet sich nicht, wegen des tiefen Brennwertes. Ebenfalls nicht geeignet ist die Abwärme aus dem Blockheizkraftwerk (BHKW), da die Temperatur zu tief ist und die Verfügbarkeit (vielmals sogenannter «Ein/Aus-Betrieb») nicht zum Betrieb der RTO passt (läuft im Dauerbetrieb).

Die Grundlagen, für die in diesem Kapitel diskutierten Kosten und Treibhausgasemissionen stammen aus Literaturwerten sowie von Beispielanlagen für Strippungsverfahren (drei Anlagen aus der Schweiz und eine aus Deutschland) und drei Anammox-Beispielanlagen (für eine Anammox-Anlage standen nur die Investitionskosten zur Verfügung). Zusätzlich flossen Kosten aus Richtofferten ein, sowie eine Studie für den Ausbau einer Faulwasserbehandlung auf einer Schweizer ARA (im Folgenden "ARA-Studie" genannt).

Eine der beiden betrachteten Membran-Beispielanlagen befand sich noch in der Optimierungsphase. Die zweite Membran-Beispielanlage lief in der betrachteten Zeitspanne weit unter dem Dimensionierungsdurchsatz, weil Umbaumaassnahmen und Betriebsprobleme in anderen Verfahrensstufen sich negativ auf die Strippung auswirkten.

Die Datengrundlage ist somit begrenzt und vergleicht Technologien, die nicht denselben Reifegrad haben.

5.1 KOSTENVERGLEICH

Für den Kostenvergleich werden spezifische Kosten verwendet. D.h. die Kosten sind bezogen auf die eliminierten Kilogramm Stickstoff pro Jahr in der entsprechenden Anlage. Damit wird der Skaleneffekt sichtbar. Für die Betriebs- und Jahreskosten ergibt sich folgende Einheit: $[\text{CHF/a}] / [\text{kgN/a}] = [\text{CHF/kgN}]$. Für die Investitionskosten ergibt sich folgende Einheit: $[\text{CHF}/(\text{kgN/a})]$.

Der nachfolgende Kostenvergleich berücksichtigt keine allfälligen KliK-Kompensationsgelder. Wie sich solche Gelder finanziell auf die Strippung auswirken würden, wird am Ende des Kapitels 0 aufgezeigt.

5.1.1 Spezifische Betriebskosten

Die spezifischen Betriebskosten (ohne Erlös aus dem Düngerverkauf) sind in Abbildung 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Betriebskosten für die einzelnen Strippungsanlagen stark unterscheiden. Einerseits spielt der Skaleneffekt eine Rolle. Andererseits benötigen die Verfahren unterschiedliche Mengen an Chemikalien (u.a. abhängig von der Betriebstemperatur) und diese Chemikalien dominieren die Betriebskosten mit einem Anteil von 50% bis 70% der gesamten Betriebskosten.

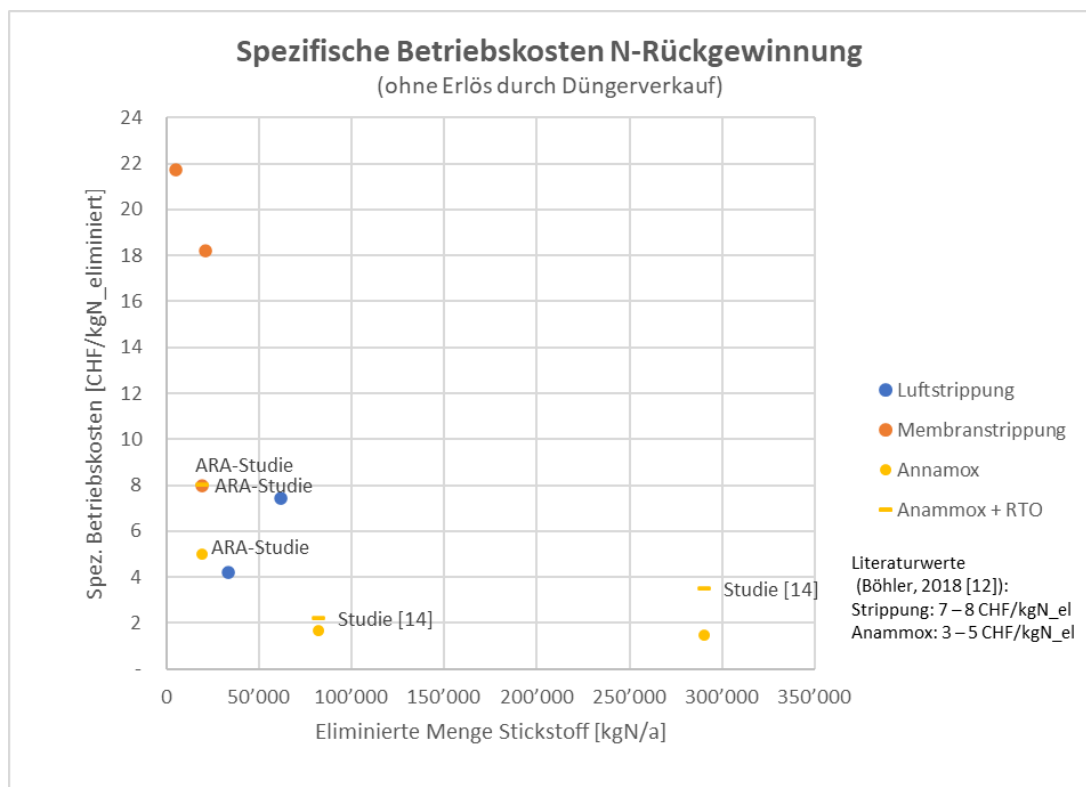


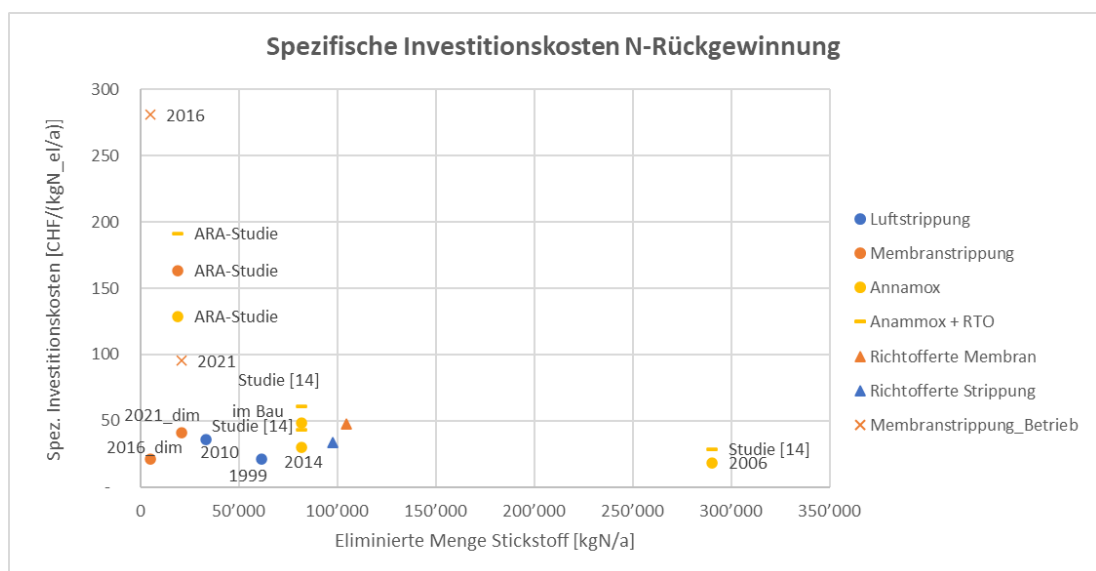
Abbildung 2: Die dargestellten spezifischen Betriebskosten sind in CHF pro eliminiertem Kilogramm N angegeben. Die Abbildung zeigt die spezifischen Betriebskosten (ohne Erlös aus dem Düngerverkauf) für sechs Beispielanlagen aus der Schweiz und aus Deutschland, sowie für eine Studie einer Schweizer Anlage (siehe «ARA-Studie») und weiterer Literatur [12]. Der Erlös für den Dünger lag für die betrachteten Anlagen im Bereich von 0.5 bis 1 CHF/kgN. Die Angaben zur RTO basieren auf einer Studie der ARA Bern [14]. Allfällige Kompensationszahlungen durch KliK wurden nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 4.1.2 für weitere Informationen).

Die erhobenen Betriebskosten für die Membranstrippung sind tendenziell höher als die erhobenen Betriebskosten für Anammox-Anlagen. Dies gilt sowohl für Anammox-Anlagen mit und

ohne RTO-Abluftbehandlung. Der Skaleneffekt muss jedoch mitgedacht werden: Das bedeutet, dass für grössere Anlagen die Betriebskosten tiefer sind als für kleine Anlagen. Bei den dargestellten Daten ist es aber unklar, zu welchem Anteil die Kostenunterschiede auf den Skaleneffekt zurückzuführen sind. Die Betriebskosten für die Membrananlage der ARA-Studie (in der Grafik als "ARA-Studie" bezeichnet) liegen viel tiefer als bei den Anlagen in Betrieb. Dies hat damit zu tun, dass die Studie auf Herstellerangaben beruht und die beiden Membranbeispielanlagen, wie weiter oben erwähnt, mit gewissen Einschränkungen betrieben wurden.

5.1.2 Spezifische Investitionskosten

Die spezifischen Investitionskosten sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Investitionskosten hängen davon ab, wann die Anlage gebaut wurde, wie gross sie ist und wie sie in die bestehende ARA integriert wurde (z.B. Nutzung von bestehenden Gebäuden). Die Investitionskosten für die verschiedenen Verfahren liegen zwischen 20 und 280 CHF/(kgN/Jahr). Kein Verfahren ist wesentlich teurer oder günstiger als die anderen. Wie der Vergleich auf einer spezifischen Anlage ausfällt, muss jedoch im Einzelfall betrachtet werden.



(siehe oben). Aus dem Grund wurden die spezifischen Investitionskosten neben dem tatsächlichen Durchsatz (oranger Punkt in Abbildung 3) auch bezogen auf den Dimensionierungsdurchsatz berechnet (oranges Kreuz in Abbildung 3). Da selbst bei optimalem Betrieb nicht der Dimensionierungsdurchsatz anfallen wird, werden die spezifischen Investitionskosten mittelfristig zwischen diesen beiden Datenpunkten liegen.

5.1.3 Spezifische Jahreskosten

Die spezifischen Jahreskosten sind in Abbildung 4 dargestellt. Sie wurden aus den oben dargestellten spezifischen Betriebs- und Investitionskosten ermittelt, mit einem Zinssatz von 2% und nachfolgenden Abschreibedauern (gemäss der VSA-Empfehlung 2018; [23]): 50 Jahre für Bau, 15 Jahre für elektromechanische Ausrüstung und 10 Jahre für EMSRT.

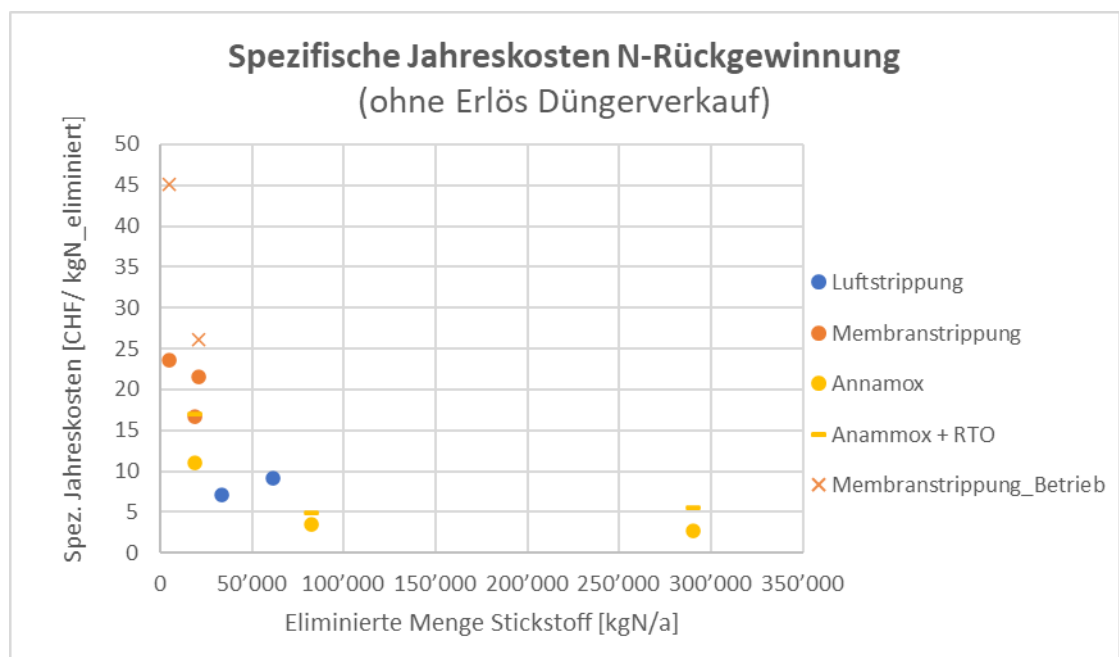


Abbildung 4: Die dargestellten spezifischen Jahreskosten sind in CHF pro eliminiertem Kilogramm N angegeben. Die Abbildung zeigt die spezifischen Jahreskosten (ohne Erlös aus dem Düngerverkauf) für sechs Beispielanlagen aus der Schweiz und aus Deutschland, sowie aus einer Studie für eine Schweizer Anlage. »). Der Erlös für den Dünger lag für die betrachteten Anlagen im Bereich von 0.5 bis 1 CHF/kgN. Die Angaben zur RTO basieren auf einer Studie der ARA Bern [14]. Weil die beiden Membranbeispielanlagen sich im betrachteten Zeitraum in der Optimierungsphase befanden, resp. Betriebsprobleme hatten, wurden zwei spezifische Kosten berechnet: Einerseits bezogen auf die dimensionierte Menge (siehe Datenpunktsymbol: Kreis) und andererseits für die aktuell eliminierte Menge (siehe Datenpunktsymbol: Kreuz). Allfällige Kompensationszahlungen durch KliK wurden nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 4.1.2 für weitere Informationen).

Die ermittelten spezifischen Jahreskosten sind stark abhängig von der eliminierten Menge Stickstoff, und liegen rund zwischen 3 und 45 CHF pro Kilogramm N eliminiert bzw. pro Kilogramm N-Dünger produziert. Die spezifischen Jahreskosten für die Membrananlage liegen tendenziell höher als für die anderen betrachteten Verfahren. Es gibt aber auch einen Datenpunkt, wo die Membrananlage vergleichbar ist mit einer Anammox-Anlage mit RTO.

Im Vergleich zum Düngerpreis zeigt sich folgendes Bild:

Der aktuelle Verkaufspreis für Ammoniumsulfat – bei direkter Abgabe an die Landwirtschaft – liegt bei rund 1 CHF pro Kilogramm Stickstoff.

Der Einkaufspreis von industriell hergestelltem Ammoniumsulfat liegt für Düngelieferanten aktuell bei rund 0.35 CHF pro Kilogramm N-Dünger.

Die Differenz zwischen Einkaufspreis (0.35 CHF pro Kilogramm N-Dünger) und Verkaufspreis an die Landwirtschaft (1 CHF pro Kilogramm N-Dünger) ergibt sich durch den Aufwand für Transport und Lagerung (der Dünger wird hauptsächlich zwischen Frühling und Sommer ausgebracht) und einer Marge (Telefongespräch Düngelieferant, 21.6.24).

ARA mit N-Rückgewinnungsanlagen haben in den vergangenen Jahren für ihren Dünger einen Preis zwischen 0.5 bis 1 CHF pro Kilogramm N erhalten.

Im Vergleich zu den Jahreskosten zeigt sich folgendes Bild: Die Jahreskosten liegen zwischen 3 bis 45 CHF pro Kilogramm N-Dünger produziert. Die Düngerpreise decken somit die Jahreskosten nicht. Für eine kostendeckende Produktion müsste die ARA einen Preis erhalten, der 3- bis 100-mal höher ist als der heutige Preis.

Weitere Betriebsoptimierungen würden die Betriebskosten senken (z.B. über einen geringeren Laugenverbrauch). Aktuell ist es schwer abschätzbar, ob künftige Betriebsoptimierungen zu einer kostendeckenden Produktion führen werden. Zur Deckung der Jahreskosten sind die ARA heute auf KLiK-Kompensationszahlungen angewiesen (siehe Kapitel 4.1.2).

5.2 TREIBHAUSGASEMISSIONEN

5.2.1 Gewählte Systemgrenzen und betrachtete Emissionen

Der in diesem Kapitel gezeigte Vergleich der Treibhausgasemissionen bezieht sich nur auf die Betriebsphase. Das heisst, die Herstellung der Betriebsmittel ist darin berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wurde hingegen der Bau und die Entsorgung der Anlage, sowie die Transporte. Es wird angenommen, dass diese vergleichbar sind für die betrachteten Varianten.

Beim Strom und bei der Wärme ist der ganze Lebenszyklus berücksichtigt, d.h. die Produktionsart wird miteinbezogen. Die direkten CO₂-Emissionen aus den biologischen Prozessen der ARA (Anammox, Biologie usw.) wurden nicht berücksichtigt. Denn es wird angenommen: Die CO₂-Emissionen aus der biologischen Reinigungsstufe sind vergleichbar und die direkten CO₂-Emissionen aus den Faulwasserbehandlungen sind nicht signifikant.

Folgende Emissionen wurden berücksichtigt:

- **Lachgas:** Die Lachgas-Emissionen beruhen auf Kennzahlen, da erst sehr wenige Messwerte vorliegen (siehe Box 2). Im direkten Vergleich zwischen der Strippung und der industriellen Düngerproduktion wurden keine Lachgasemissionen berücksichtigt. Im Vergleich zwischen der Strippung und den biologischen Verfahren wurden aber die Lachgasemissionen berücksichtigt. Es wurde jeweils ein Szenario mit tiefen und eines mit hohen Emissionen betrachtet:
 - Lachgas aus der Biologie: 3% bzw. 0.5% bezogen auf den Stickstoff im ARA-Zulauf, gemäss [11]. Dabei wurden nicht die gesamten Emissionen aus der Biologie miteinbezogen, sondern nur jene Emissionen, die durch die Dosierung von Faulwasser in die Biologie entstehen⁹.
 - Lachgas aus der Anammox-Anlage: 4% bzw. 0.5% bezogen auf die behandelte Stickstofffracht im Faulwasser, gemäss [10].

⁹ Konkret: Wenn 1000 kg N aus dem Faulwasser in die Biologie zurückgebracht werden, entstehen je nach Szenario 30 bzw. 5 kg N₂O-N. Wenn eine Strippung implementiert wird, gehen nur 150 kg N zurück in die Biologie (85% N-Elimination in der Strippung), d.h. es entstehen nur 5 bzw. 0,75 kg N₂O-N. Dies ist eine vereinfachte Betrachtung der Lachgasproduktion, wird aber für den vorliegenden Bereich als zweckdienlich beurteilt.

Für die Faulwasserbehandlung wurde eine N-Eliminationsrate von 85% angenommen (Angaben Beispielanlagen). Die N_2O -N-Eliminationsrate in der RTO-Anlage wurde auf 90% festgesetzt [14].

- **N-Produktion:** Das auf der ARA produzierte Ammoniumsulfat wird meist als Dünger eingesetzt und deshalb mit den folgenden drei industriell hergestellten Stickstoff-Verbindungen verglichen:
 - o **Ammoniak** ist das Produkt aus dem Haber-Bosch Verfahren, dem am weitesten verbreiteten industriellen N-Produktionsverfahren. Für die Nutzung als Dünger wäre eine weitere Aufbereitung erforderlich.
 - o **Ammoniumnitrat** ist der in der Schweiz am häufigsten angewendete mineralische Flüssigdünger.
 - o **Ammoniumsulfat** kann anstatt auf der ARA auch industriell hergestellt werden.

Die Emissionsfaktoren für die industriell hergestellten Stickstoffverbindungen stammen aus der Ecoinvent 3.10 Datenbank [15]. Es wurde das sogenannte cut-off Systemmodell, die IPCC-Methode für die Ermittlung des Treibhausgaspotentials und als Herstellungsregion Europa verwendet.

- **Strom:** Für die Berechnung der Emissionen bei der Herstellung des benötigten Stroms wurde der Strommix-Rechner von Treeze eingesetzt [16]. Berücksichtigt wurden drei verschiedene Strommixe (CH-Verbrauchermix 2018, 100% Photovoltaik, 100% Biogas). Für den Strombedarf der konventionellen Biologie wurden Kennzahlen verwendet [18]. Für den spezifischen Strombedarf in der ARA-Hauptstufe (bezogen auf kg N eliminiert) wurde von einer durchschnittlichen N-Elimination auf Schweizer ARA von 50% ausgegangen (gemäss dem VSA-Webinar vom 28.8.23).
- **Wärme:** Die Strippungs- und RTO-Anlagen benötigen zusätzliche Wärme. Für die Strippungsanlagen wurde angenommen, dass der Wärmebedarf vollständig durch die Abwärme aus den BHKW gedeckt werden kann. Die Treibhausgasemissionen dafür sind sehr gering und wurden mit dem Treeze Rechner berechnet [17]. Für die RTO-Anlage ist das benötigte Temperaturniveau viel höher als für die Strippungsanlagen (980°C vs. 45-60°C). Diese Wärme kann durch das Verbrennen von aufbereitetem Klärgas oder durch Erdgas gedeckt werden. Gemäss [26] wurde angenommen, dass der Wärmebedarf durch das Verbrennen von Erdgas gedeckt wird. Damit wird berücksichtigt, dass selbst wenn aufbereitetes Biogas verwendet wird, dieses im Gasnetz fehlt und durch Erdgas ersetzt werden muss (sogenannte Leakage-Emissionen).
- **Betriebsstoffe:** Die Emissionsfaktoren der Herstellung der Betriebsstoffe (Natronlauge, Schwefelsäure, Zitronensäure, Salzsäure) stammen ebenfalls aus der Ecoinvent 3.10 Datenbank [15]. Es wurde auch hier das cut-off Systemmodell, die IPCC-Methode für die Ermittlung des Treibhausgaspotentials und als Herstellungsregion Europa verwendet.

Box 2: Lachgas (N₂O) dominiert die Treibhausgasbilanz der ARA

N₂O ist ein rund 273mal stärkeres Treibhausgas als CO₂ und ist zudem am Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beteiligt [24]. Am gesamten Schweizweiten N₂O-Ausstoss machen die ARA rund 20% aus. Das sind gut 1% der gesamten Schweizer Treibhausgas-Emissionen [11]. Wieviel N₂O eine ARA bildet, hängt stark davon ab, wie gut sie den Stickstoff aus dem Abwasser eliminiert. Das bedeutet: Die N₂O-Emissionen sind gering, wenn die ARA gleichzeitig viel Stickstoff eliminiert und möglichst wenig Nitrit im gereinigten Abwasser enthält. Wenn ARA nun ihre N-Elimination erhöhen, führt das automatisch dazu, dass auch deren N₂O-Ausstoss deutlich abnimmt.

Die Faulwasserbehandlung in der biologischen Hauptstufe der ARA kann sich bedeutend auf die N₂O-Emissionen auswirken. Messungen deuten darauf hin, dass u.a. die ARA-Auslastung und die Dosierung von Faulwasser in die ARA-Hauptstufe während dem Nachtminimum die Lachgasemissionen erhöhen [11]. Weniger stark steigen die N₂O-Emissionen an, wenn die ARA über ausreichend Kapazitätsreserven verfügt oder wenn die Faulwasser-Dosierung auf die Kohlenstoffverfügbarkeit abgestimmt ist. Eine separate Faulwasserbehandlung (sowohl durch eine Strippung als auch mittels Anammox-Prozesses) würde die N₂O-Emissionen aus der ARA-Hauptstufe senken [9].

5.2.2 Treibhausgasemissionen bei der Strippung im Vergleich zur industriellen Düngerproduktion

Der nachfolgende Vergleich stellt die Strippungsverfahren und die industrielle Düngerproduktion einander gegenüber. Es geht dabei nur um die Produktion von Stickstoffdünger. Die Reduktion der N-Fracht im Zulauf der ARA, die mittels Strippung erzielt wird, wurde nicht berücksichtigt.

Gemäss Abbildung 5 dominieren bei der Strippung die Treibhausgasemissionen aus der Betriebsmittelherstellung. Insbesondere fällt die Natronlauge stark ins Gewicht. Bei der Membranstrippung sind die berechneten Emissionen tendenziell höher als bei der Luftstrippung, weil die Membranstrippung bei tieferen Temperaturen erfolgt und deshalb mehr Lauge benötigt.

Die Treibhausgasemissionen der Membranstrippung liegen über derjenigen, die aus der N-Düngerproduktion mittels industrieller Prozesse anfallen. Die N-Strippung wäre gemäss der aktuellen Datenlage der industriellen Produktion bezogen auf den CO₂-Äquivalent-Ausstoss unterlegen. Für die Luftstrippung sind die Emissionen ähnlich wie bei der industriellen Düngerproduktion. Wird der Vergleich mit industriell hergestelltem Ammoniumsulfat gemacht, hat eine der beiden untersuchten Luftstrippungs-Anlagen einen tieferen Ausstoss an CO₂-Äquivalenten.

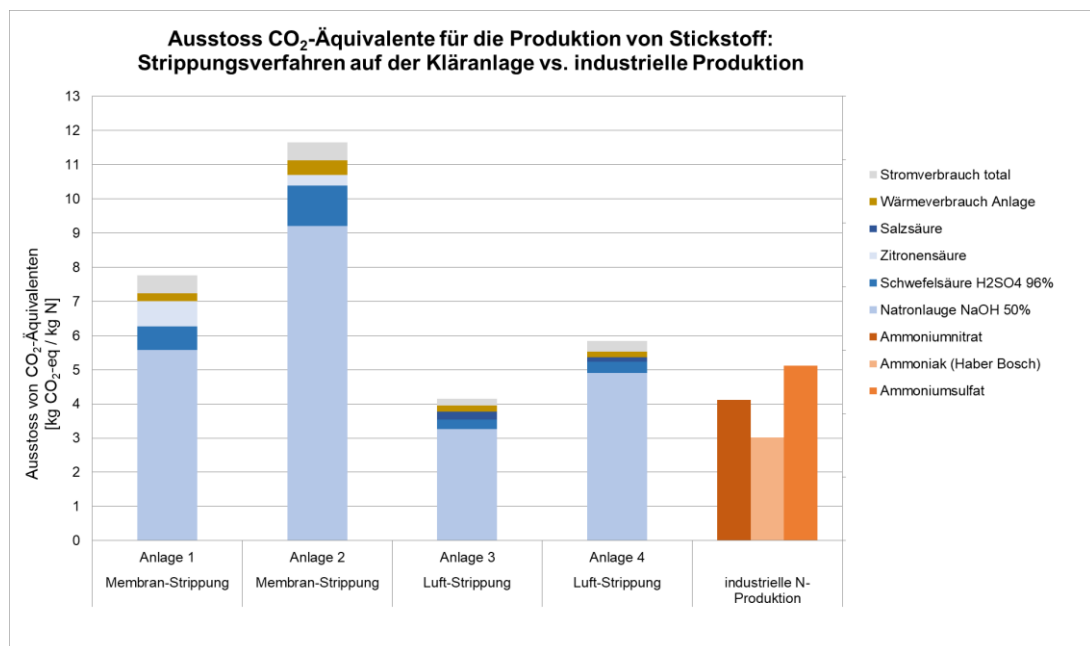


Abbildung 5: Treibhausgasemissionen der vier betrachteten Beispiel-Membran- und Luftstrippungsanlagen. Zum Vergleich sind die Treibhausgasemissionen der N-Produktion mittels industrieller Prozesse dargestellt.

Anmerkung zu den Emissionsfaktoren

Die hier verwendeten Emissionsfaktoren stammen, wie weiter oben erwähnt, aus der Ecoinvent 3.10 Datenbank [15]. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Emissionsfaktoren variieren können. Sie sind abhängig vom Produktionsort, der verwendeten Technologie, der Systemgrenze aber auch abhängig von der angewandten Ökobilanzierungsmethode. Zum Beispiel variieren die Treibhausgasemissionen für die Natronlauge-Herstellung in Abhängigkeit der Herstellung in folgendem Bereich:

- 0.09 kg CO₂-eq/kg NaOH 50% [20]
- 0.34 kg CO₂-eq/kg NaOH 50% (Produktion ausschliesslich mit Wasserstrom in Kanada) [22]
- bis 1.12 kg CO₂-eq/kg NaOH 50% [21]

Der in dieser Studie verwendete Wert von 0.89 kg CO₂-eq/kg NaOH 50% stammt aus der Ecoinvent 3.10 Datenbank und basiert auf einer EU-Studie [15]. Diese Studie berücksichtigte 68 Produktionsanlagen in Europa, welche zusammen rund 96% der in Europa produzierten Natronlauge-Menge herstellen. Dieser Wert wird somit als sehr robust und belastbar eingestuft.

Falls angenommen wird, dass zukünftig mehr nachhaltige Energie für die Produktion von Chemikalien zur Verfügung steht, hat dies einen Einfluss auf die Emissionsfaktoren. Der hier durchgeführte Vergleich müsste somit in einigen Jahren für alle verwendeten Chemikalien und Düngerarten wiederholt werden, um diese neue Ausgangslage zu berücksichtigen.

5.2.3 Treibhausgasemissionen der Strippung im Vergleich zu biologischen Prozessen zur N-Elimination (ARA-Hauptstufe, Anammox-Prozess)

Bei den biologischen N-Eliminationsverfahren (ARA-Hauptstufe, Anammox-Prozess) stellen die N₂O-Emissionen die massgebenden Treibhausgasemissionen dar (siehe Box 2).

Die N₂O-Emissionen bei Anammox-Anlagen liegen im Bereich von 0.5% bis 4% bezogen auf den eliminierten Stickstoff. Das zeigte eine Studie, welche die N₂O-Emissionen von 12

Anammox-Anlagen in der Schweiz mittels Stichproben untersuchte [10]. Die N_2O -Emissionen aus Anammox-Anlagen lassen sich mittels RTO zu rund 90% senken. Die Abluftbehandlung mittels RTO wurde auf einer Schweizer ARA untersucht [14]. Diese Daten sind in die vorliegende Studie eingeflossen.

Die Höhe der N_2O -Emissionen aus den biologischen Behandlungsverfahren wirken sich stark aus auf den Vergleich mit der Strippung. Daher enthält der Vergleich ein Szenario mit hohen N_2O -Emissionen (ARA-Hauptstufe 3%; Anammox-Verfahren 4%) und eines mit geringen N_2O -Emissionen (ARA-Hauptstufe 0.5%; Anammox-Verfahren 0.5%).

Die zweite dominierende Treibhausgasquelle bei den biologischen Verfahren ist die N-Düngerproduktion mittels industriellen Prozesses. Diese wurde für den Vergleich mit der Strippung zu den biologischen Verfahren dazugerechnet.

Der Vergleich der Treibhausgasemissionen zwischen der Strippung und den biologischen N-Eliminationsverfahren zeigt folgendes Bild:

- Hohe N_2O -Emissionen (3% bzw. 4%) der biologischen N-Eliminationsverfahren führen dazu, dass diese Verfahren höhere Treibhausgasemissionen aufweisen als die Strippungsanlagen (siehe Abbildung 6). Wird davon ausgegangen, dass eine RTO installiert ist, wird der Chemikalienverbrauch der Strippung entscheidend: Da dieser in der Luftstrippung tiefer ist als in der Membranstrippung, liegt die Membranstrippung tendenziell höher als das Anammox-Verfahren, die Luftstrippung liegt tendenziell tiefer.
- Tiefe N_2O -Emissionen (0.5%) der biologischen N-Eliminationsverfahren senken deren Treibhausgasemissionen deutlich (siehe Abbildung 7). Das Anammox-Verfahren mit RTO und die Luftstrippung stossen am Wenigsten Treibhausgase aus. Die Membranstrippung führt je nach Chemikalienverbrauch zu etwa gleichviel oder etwas höheren Emissionen wie die Rückführung in die Biologie.

Es wird angenommen, dass die N_2O -Emissionen mittelfristig dem tiefen Szenario entsprechen, weil ARA im Zuge der Umsetzung der Motion 20.4261 (Reduktion von Stickstoffeinträgen aus ARA) ihre N-Elimination erhöhen müssen. Das führt dazu, dass auch die N_2O -Emissionen deutlich zurückgehen. Bei gewissen ARA erfolgt dies anhand einer separaten Faulwasserbehandlung (z.B. Strippung, Anammox-Verfahren). Es ist zudem davon auszugehen, dass künftig mehr Anammox-Anlagen über eine Abluftbehandlung verfügen, um ihre N_2O -Emissionen zu senken.

Die durch die Herstellung von Strom und Wärme verursachten Treibhausgasemissionen spielen eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die totalen Treibhausgasemissionen. Es wurde mit einem typischen Schweizer Strommix gerechnet. Die Herkunft des Stroms hat in der Schweiz keinen signifikanten Einfluss auf den Vergleich, weil bereits ein hoher Strom-Anteil aus erneuerbarer und CO_2 -armer Produktion enthalten ist.

Vergleich zu anderen Studien

Die Fachhochschule Aachen hat für die Kläranlage Straubing eine vergleichende Lebenszyklusanalyse von Strippung und Deammonifikation durchgeführt [19]. Die dort berechneten CO_2 -Äquivalente für die Luftstrippung liegen mit etwa 11 kgCO_2 -Äquivalente pro Kilogramm eliminiertem Stickstoff wesentlich höher als in der hier vorliegenden Studie. Dies liegt zum grössten Teil daran, dass andere Annahmen getroffen wurden, bezogen auf den Ausstoss von CO_2 -Äquivalenten für die Natronlauge-Produktion. Der hier verwendete Faktor basiert – wie oben erwähnt – auf einer Studie zu 68 Produktionsanlagen in Europa und wird deshalb als belastbar bewertet. Neben dem Emissionsfaktor ergeben sich weitere Unterschiede, weil die Stromproduktion in der Schweiz zu einem tieferen Ausstoss an CO_2 -Äquivalenten führt.

Die Fachhochschule Nordwestschweiz im Rahmen des NextGen-Projekts u.a. den Ausstoss

an CO₂-Äquivalenten für die ARA Altenrhein untersucht [25]. Ein direkter Vergleich zu den hier vorliegenden Resultaten ist aufgrund folgender unterschiedlicher Rahmenbedingungen nicht möglich:

- Im NextGen-Projekt wurde die Betrachtung über die gesamte ARA gemacht. Das heisst, es wurden beispielsweise die N₂O-Emissionen der gesamten Biologie betrachtet und nicht wie in der vorliegenden Studie, nur jene N₂O-Emissionen, die anteilmässig auf das Faulwasser zurückzuführen sind (siehe Kapitel 5.2.1).
- Im NextGen-Projekt basierten die N₂O-Emissionen auf Messwerten. Für die vorliegende Studie wurden für alle betrachteten Anlagen die gleichen Annahmen bezüglich der N₂O-Emissionen getroffen (siehe weiter oben in diesem Kapitel).
- Es ist im Bericht nicht dokumentiert, welche Emissionsfaktoren (bspw. für die Natronlauge) das NextGen Projekt verwendete.

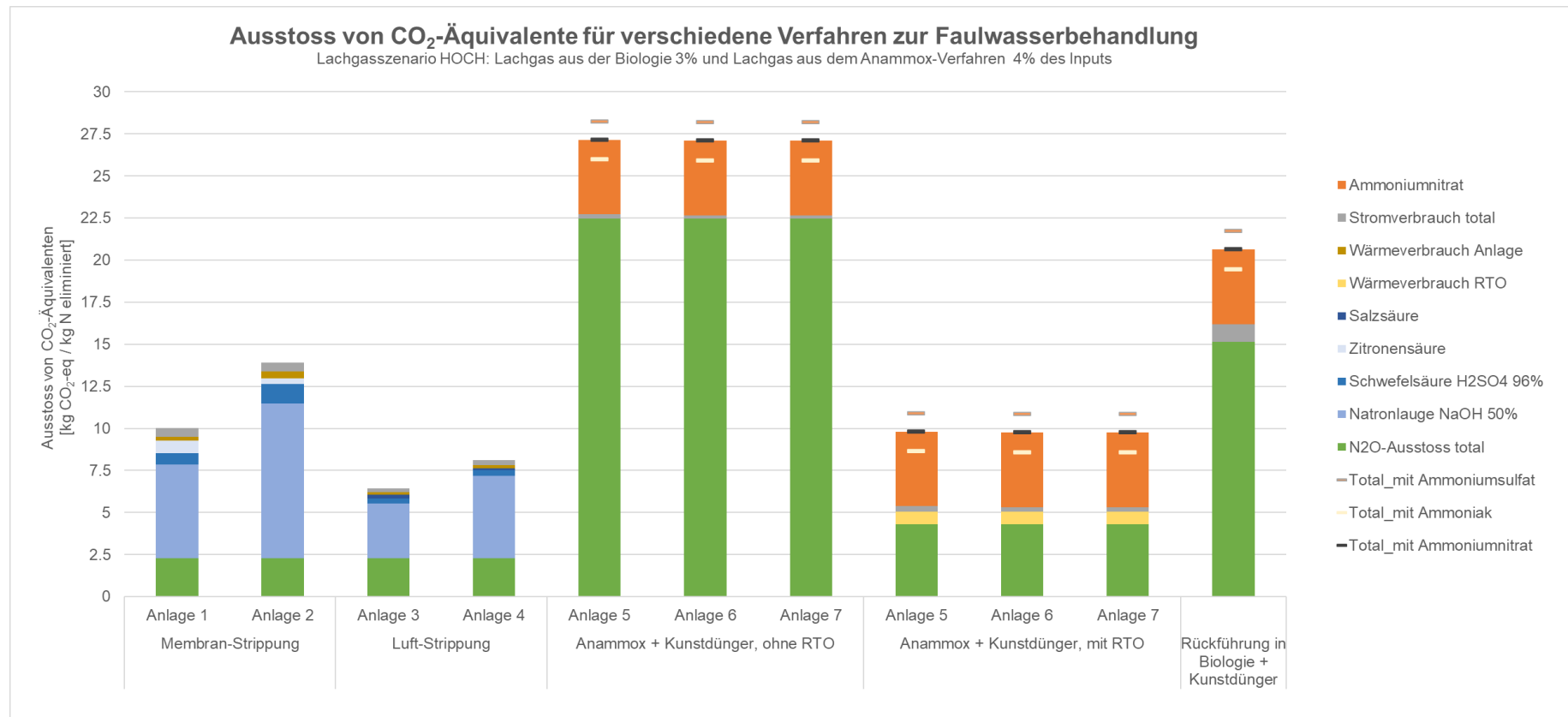


Abbildung 6: Treibhausgasemissionen (als CO₂-Äquivalente pro eliminiertem N) der vier betrachteten Beispiel-Membran- und Luftstrippungsanlagen, der drei Anammox-Beispielanlagen und der ARA-Hauptstufe. Für die biologischen N-Eliminationsverfahren (ARA-Hauptstufe, Anammox) wurden hohe N₂O-Emissionen (3% bzw. 4%) angenommen. Für die Anammox-Anlagen wurde ein Szenario betrachtet, indem eine RTO deren N₂O-Emissionen um 90% senkt («mit RTO»). Für die industrielle N-Produktion wurden 3 Varianten angeschaut: Ammoniumsulfat (analog zum ARA-Dünger), Ammoniumnitrat (häufigster mineralischer Flüssigdünger der Schweiz) und Ammoniak (Produkt aus dem Haber-Bosch Verfahren, nicht direkt als Dünger anwendbar).

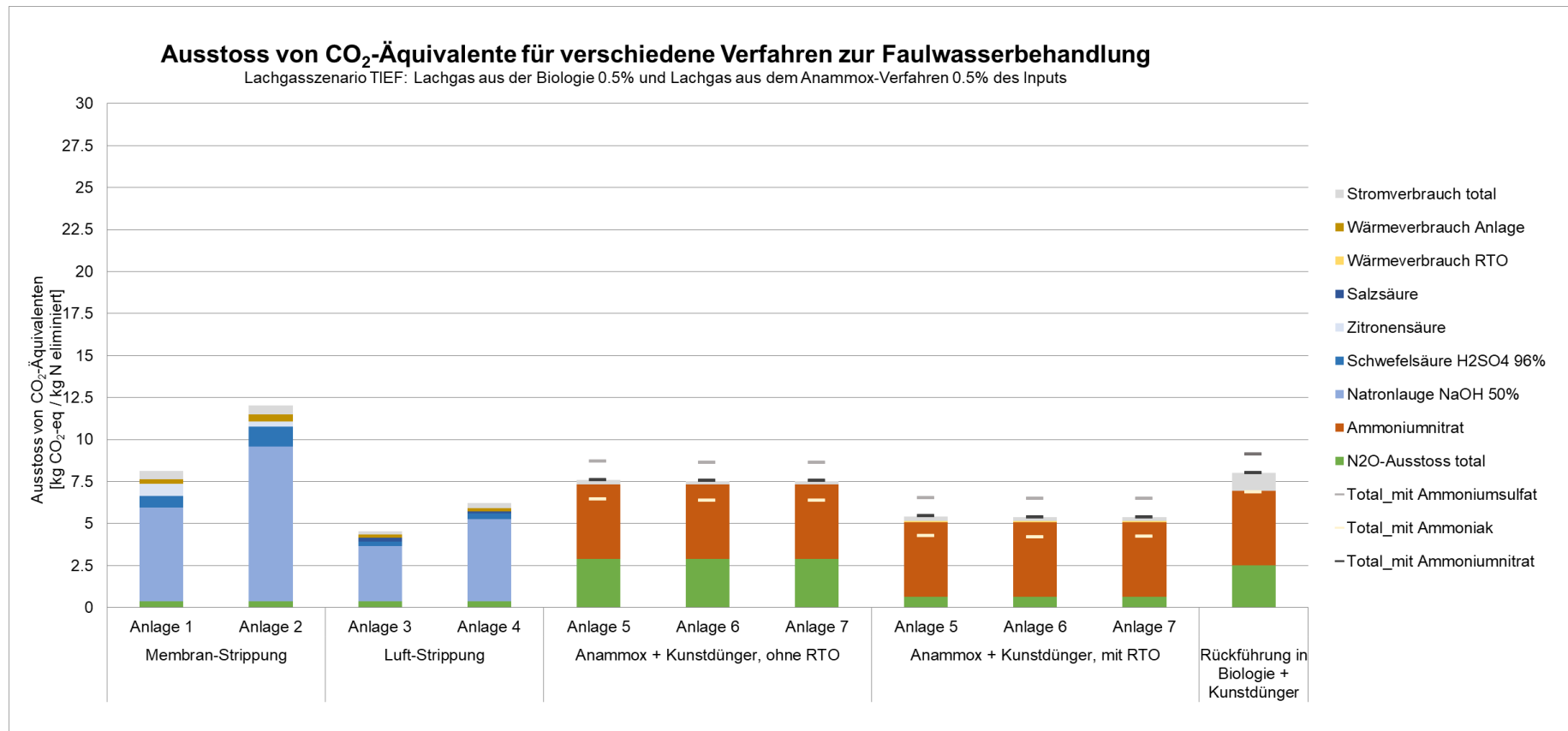


Abbildung 7: Treibhausgasemissionen (als CO₂-Äquivalente pro eliminiertem N) der vier betrachteten Beispiel-Membran- und Luftstrippungsanlagen, der drei Anammox-Beispielanlagen und der ARA-Hauptstufe. Für die biologischen N-Eliminationsverfahren (ARA-Hauptstufe, Anammox) wurden tiefe N₂O-Emissionen (0.5%) angenommen. Für die Anammox-Anlagen wurde ein Szenario betrachtet, indem eine RTO deren N₂O-Emissionen um 90% senkt («mit RTO»). Für die industrielle N-Produktion wurden 3 Varianten angeschaut: Ammoniumsulfat (analog zum ARA-Dünger), Ammoniumnitrat (häufigster mineralischer Flüssigdünger der Schweiz) und Ammoniak (Produkt aus dem Haber-Bosch Verfahren, nicht direkt als Dünger anwendbar).

6 QUALITATIVER VERFAHRENSVERGLEICH ZWISCHEN STRIPPUNG UND ANAMMOX

Für ARA, die künftig eine separate Faulwasserbehandlung realisieren, bietet sich ein Vergleich zwischen Strippung und Anammox an. Dieses Kapitel fasst die wichtigsten Aspekte zusammen. Gewisse Unsicherheiten bestehen aktuell noch bei den nachfolgenden Punkten:

- Die Membranstrippung ist ein «junges» Verfahren, welches sich noch in der Optimierungsphase befindet. Liesse sich der Natronlaugenverbrauch weiter senken (beispielsweise durch alternative Betriebsmittel), gingen auch die Treibhausgasemissionen dieses Verfahrens deutlich zurück.
- Zu den Standzeiten der Membranen gibt es noch wenige Erfahrungswerte. Es ist jedoch bekannt, dass die ARA Yverdon-les-Bains seit der Inbetriebnahme der Membranstrippung im Jahr 2018 immer noch die gleichen Membranen verwendet.
- Wie stark sich die Faulwasserbehandlung in der ARA-Hauptstufe auf deren N_2O -Emissionen auswirkt, muss im Einzelfall gemessen werden.
- Es liegen erst wenige Betriebserfahrungen vor mit dem zweistufigen Anammox-Prozess. Ebenfalls braucht es weitere grosstechnische Umsetzungen und entsprechende Erfahrungswerte mit der RTO-Abluftbehandlung.

Die nachfolgende, quantitative Bewertung beruht auf folgenden Symbolen:

- +** Vorteil gegenüber dem anderen Verfahren
- Nachteil gegenüber dem anderen Verfahren
- 0** Verfahren sind gleichwertig

Es gibt Kriterien, bei denen beide Verfahren Vor- und Nachteile haben. Diese Kriterien wurden mit +/- bewertet.

	N-Rückgewinnung mittels Luft-/Membranstrippung		Anammox-Prozess	
	Beschrieb	Bewertung	Beschrieb	Bewertung
Betriebsstabilität	Nach anfänglichen Optimierungen/Anpassungen beim Anfahren (Umgang mit der Beanspruchung des Materials), kann das Verfahren stabil betrieben werden. Die Prozesssteuerung funktioniert über den pH-Wert. Das heisst: Mit der pH-Kontrolle/Anpassung steht eine einfache Stellschraube mit sofortiger	0	Ein Verfahren mit biologischem Prozess. Dadurch sind die Möglichkeiten zur betrieblichen Einflussnahme wegen gegenseitiger Abhängigkeiten weniger spezifisch und die Steuerung anspruchsvoller. Beim Verlust der Biomasse kann der erneute Biomasseaufwuchs lange dauern oder muss durch	0

	N-Rückgewinnung mittels Luft-/Membranstrippung		Anammox-Prozess	
	Beschrieb	Bewertung	Beschrieb	Bewertung
	betrieblicher Wirkung zur Verfügung. Somit kann das Verfahren einfach zu- oder abgeschaltet werden. Die Standzeiten der Membranen/Kolonnen sind abhängig von der Beanspruchung (Membran-Fouling, Ablagerungen). Es braucht weitere gross-technische Betriebserfahrungen.		Lieferung von Schlamm aus anderen Anlagen ergänzt werden. Durch Umstellung des Verfahrens von einem 1-stufigen auf einen 2-stufigen Prozess (Nitritation und Anammox räumlich getrennt), ist das Verfahren wesentlich stabiler geworden [14]. Es braucht weitere gross-technische Betriebserfahrungen.	
Effizienz / Leistungsfähigkeit	Bei stabilem Betrieb sind beide Verfahren leistungsfähig. Die Verfahren erreichen Eliminationsraten von 70% bis 90% (abhängig u.a. von der Konzentration der Ausgangslösung, Zustand der Membranen/Kolonnen, Chemikalieneinsatz, Feststoffe in der Ausgangslösung, Anammox-Aktivität, Auslegung der Anlage).			
Jahreskosten	<p>Die Jahreskosten für die Strippung liegen tendenziell höher als für das Anammoxverfahren. Wird die Anammoxanlage mit einer RTO betrieben sind die Kosten vergleichbar.</p> <p>Zur Deckung der Jahreskosten können unterschiedliche Finanzierungsquellen genutzt werden: Neben dem Verkauf des Düngers können auch KliK-Kompensationsgelder beantragt werden. Diese können die Jahreskosten unter optimalen Betriebsbedingungen decken (hohe Auslastung der Anlage, tiefer Laugenverbrauch).</p> <p>Auch für die RTO gibt es KliK-Kompensationsgelder. Diese decken die Jahreskosten der RTO selbst, nicht aber des gesamten Anammox-Verfahrens.</p>			
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf für die Strippung ist tendenziell kleiner als für ein Anammox-Verfahren. Die Kolonnen und Membranen können in die Höhe gebaut werden. Der Flächenbedarf ist aber stark davon abhängig, wie die Strippungsanlage in die bestehende ARA integriert wird.	+ / 0	Der Flächenbedarf für eine Anammox-Anlage ist tendenziell grösser als für eine Strippungsanlage. Es hat sich gezeigt, dass ein zweistufiger Anammox-Betrieb stabiler ist [14], was mindestens zwei Reaktoren benötigt.	- / 0

	N-Rückgewinnung mittels Luft-/Membranstrippung		Anammox-Prozess	
	Beschrieb	Bewertung	Beschrieb	Bewertung
Referenzen	Für den Betrieb von Strippungsanlagen gibt es im DACH-Raum weniger Referenzen als für Anammox-Anlagen. Es handelt sich um noch «junge» Technologien.	-	Für Anammox-Anlagen gibt es im DACH-Raum mehr Referenzen als für Strippungsanlagen.	+
Treibhausgasemissionen	Grundsätzlich können beide Verfahren dazu führen, dass weniger CO ₂ -Äquivalente ausgestossen werden, als wenn das Faulwasser in den Hauptstrom der Biologie zurückgebracht wird. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Biologie aus- respektive überlastet ist und folglich die N ₂ O-Emissionen hoch sind.			
	Die massgeblichen Treibhausgasemissionen bei der Strippung stammen von der Chemikalienproduktion (insbesondere Natronlauge). Kann der Natronlaugen-Verbrauch reduziert werden (z.B. durch eine höhere Betriebstemperatur) sinken die Treibhausgasemissionen. Die Membranstrippungsanlagen weisen höhere Treibhausgas-Emissionen auf als die Luftstrippung, wegen dem höheren Chemikalienverbrauch.	0	Die massgeblichen Treibhausgasemissionen beim Anammox-Verfahren stammen von den N ₂ O-Emissionen. Wird die Anammox-Anlage mit einer RTO-Abluftbehandlung betrieben, sinken die Treibhausgasemissionen stark. Wenn die Anammox-Anlage mit einer RTO betrieben wird, sind die Treibhausgas-Emissionen mit der Luftstrippung vergleichbar.	0
Kreislaufwirtschaft	Die Strippung produziert N-Dünger. Stickstoff wird dadurch lokal im Kreislauf gehalten. Folglich muss weniger Stickstoff in die Schweiz importiert werden.	+	Der Anammox-Prozess eliminiert Stickstoff aus dem Faulwasser. Dieser Stickstoff gelangt als elementarer Stickstoff (N ₂) und N ₂ O in die Atmosphäre.	-

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Aus der vorliegenden Studie lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die N-Rückgewinnung aus dem Faulwasser ist technisch und betrieblich machbar und im DACH-Raum auf rund 10 ARA, zwei davon auf Schweizer ARA, im Einsatz. Sie erfolgt mittels Luft- oder Membranstrippung. Alternative Verfahren sind entweder weniger effizient oder weniger wirtschaftlich, oder wurden erst im Pilotmassstab getestet.
- Strippungsanlagen benötigen wenig Platz und lassen sich über den pH-Wert einfach steuern. Dafür steigt der Personalaufwand für die ARA (z.B. für die periodische Anlagen-Reinigung), der Chemikalienverbrauch ist hoch (insbesondere Natronlauge).
- Das Rückgewinnungspotential aus Abwasser liegt für die Schweiz bei rund 2'500 bis 5'000 Tonnen N pro Jahr. Das entspricht rund 5% bis 10% des importierten Mineraldüngers. Stickstoff ist, anders als Phosphor, keine endliche Ressource.
- Die Betriebskosten werden dominiert durch die benötigten Chemikalien (insbesondere Natronlauge). Die erhobenen Daten zeigen, dass die Betriebskosten der Membranstrippung höher liegen, weil sie mehr Natronlauge benötigt als die Luftstrippung. Der Verkauf dieses ARA-Düngers deckt die Betriebskosten nicht. Für eine kostendeckende Produktion auf ARA müsste der Verkaufspreis – je nach Anlagengrösse – rund 3 bis 100mal höher liegen als der aktuell bezahlte Preis. Das heisst, in wirtschaftlicher Hinsicht ist die N-Rückgewinnung dem industriellen Produktionsprozess zurzeit unterlegen. Zur Deckung der Jahreskosten sind ARA auf Kompensationsgelder der Stiftung KliK angewiesen¹⁰.
- Aus Sicht des Klimaschutzes ist die N-Rückgewinnung aus dem Abwasser aktuell je nach Verfahren mit der industriellen Düngerproduktion vergleichbar (Luftstrippung) oder ihr unterlegen (Membranstrippung). Massgebend bei der Strippung ist der Natronlaugenverbrauch.
- Der Betrieb einer Strippungsanlage ist eine interessante Alternative, wo einerseits eine Faulwasserbehandlung notwendig ist, aber biologische Entstickungsverfahren nicht machbar sind, oder wo andererseits eine lokale Rückgewinnung aus politischer Sicht erwünscht ist. Das Verfahren eignet sich vor allem für grosse ARA, die viel Fremdschlamm und/oder Stickstoff-haltige Co-Substrate annehmen.
- Ein Vergleich zwischen der Strippung und dem Anammox-Verfahren zeigt, dass die Jahreskosten der Strippung tendenziell höher liegen als für eine Anammox-Anlage. Wenn die Anammox-Anlage mit einer RTO betrieben wird, sind die Treibhausgas-Emissionen mit der Luftstrippung vergleichbar. Die Treibhausgasemissionen der Membranstrippung liegen höher, bedingt durch den höheren Chemikalienverbrauch.
- Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren weitere Strippungsanlagen und zweistufige Anammox-Anlagen mit RTO-Abluftbehandlung dazukommen. Somit werden auch die Betriebserfahrungen zunehmen und die Datenlage wird breiter. Der Erfahrungsaustausch unter den Betreiber/-innen solcher Anlagen sollte – beispielsweise durch den VSA – gefördert werden, um die Verfahrenswahl bei weiteren Umsetzungen zu unterstützen. Es empfiehlt sich, die vorliegende Analyse zu wiederholen, wenn mehr Daten und Betriebserfahrungen vorliegen.

¹⁰ Voraussetzung für die Deckung der Jahreskosten durch KliK ist eine substantielle Einsparung von Lachgas und ein optimaler Betrieb der Strippungsanlage: Tiefer Laugenverbrauch und hohe Auslastung der Strippungsanlage.

Zürich, August 2025

Cristina Fritzsche
Projektleiterin
cristina.fritzsche@holinger.com
+41 44 288 81 16

Marlène Fretz
Stv. Projektleiterin
marlene.fretz@holinger.com
+41 41 368 99 31

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bundesamt für Landwirtschaft (Zürich, 28.02.2022): Aktualisierung Stoffflussanalyse Stickstoff für das Jahr 2018 – Bericht.
- [2] Fenaco-LANDI (2023): Aus Agroline wird Landor. Ein Interview mit Jürg Friedli. [<https://www.ufarevue.ch/fenaco-landi/aus-agroline-wird-landor>], Seite besucht am 04.01.2023.
- [3] Schweizer Bauernverband (2022): Agristat Aktuell 06-22: Hof- und Recyclingdünger im HODUFLU: Anteile, Entwicklungen und Relationen.
- [4] Schweizer Bauernverband (2022): Agristat Aktuell 07-22: Dünger: Preis- und Importentwicklung in Zeiten der Unruhe.
- [5] Böhler (2012): Dünger aus Abwasser: Ammoniakstrippung mittels Luft zur Behandlung von Faulwasser und Urin auf der Kläranlage Kloten/Opfikon. Aqua & Gas N°1 2012
- [6] Ernst Basler + Partner (2015): Ressourceneffiziente ARA – Analyse von Potenzialen und Rahmenbedingungen zur Steigerung der Ressourcennutzung.
- [7] Abwasserverband Altenrhein (2022) Geschäftsbericht 2021
- [8] Van der Hoek et al. (2018): Nitrogen Recovery from Wastewater: Possibilities, Competition with Other Resources, and Adaptation Pathways, Sustainability (MDPI), 2018, 10, 4605
- [9] Böhler et al. (2022) Andere Entstickungsverfahren: Membranstripping, Kolonnen-Stripping. Fortbildungskurs Emmetten: Fokus Stickstoff, Treibhausgase und Energie. 21.- 22.6.2022, Kandersteg.
- [10] Dieziger et al. (2023) Lachgasemissionen aus Faulwasserbehandlungen. Beprobung und Einordnung 12 Schweizer Anlagen. Aqua & Gas N°3 2023
- [11] Gruber et al. (2022) Lachgasemissionen aus ARA – Reduktionsmassnahmen zeichnen sich ab. Aqua&Gas N°1, 2022
- [12] Böhler (2018) Rückgewinnung und Wiederverwendung von Stickstoff aus Abwasser. Eawag-Infotag, 11. September 2018
- [13] Das Schweizer Parlament (2025) 22.4436 | Bio-Ammoniak. Nichts wäre natürlicher | Geschäft | Das Schweizer Parlament. <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20224436>
- [14] Kobler (2023) N₂O-Emissionen auf ARA: Abluftbehandlung mit Regenerativ-thermischer Oxidation. Präsentation im Rahmen des Infrawatt-Webinars vom 11.Mai 2023
- [15] Ecoinvent v3.10 Datenbank. <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-10/>
- [16] Treeze, electricity calculator, Version 2022.1, basierend auf den KBOB-Ökobilanzdatenbestand 2009/1:2022, verfügbar unter: https://rechner.umweltchemie.ch/HTMLStrommix_22_de_v7/Oekobilanzrechner_Strommix_2022_deutsch_v7_UVEK2022.htm, abgerufen im Januar 2024.
- [17] Treeze, district heat calculator, basierend auf den KBOB-Ökobilanzdatenbestand 2009/1:2022, verfügbar unter: https://rechner.umweltchemie.ch/HTMLFernwaerme22_de_v4/Oekobilanzrechner_Fernwaerme_2022_deutsch_v4_UVEK2022.htm, abgerufen im Januar 2024.
- [18] BFE (2010) Energie in ARA. Leitfaden zur Energieoptimierung auf Abwasserreinigungsanlagen.

- [19] Ziegner et al (2024) Vergleichende Lebenszyklusanalyse von Strippung und Deammonifikation zur Prozesswasserbehandlung auf der Kläranlage Straubing. 11. Tagung zur Stickstoffrückbelastung Leibzig.
- [20] EPD International AB, Environmental Product Declaration for caustic soda lye 50%, verfügbar unter <https://www.environdec.com/library/epd12050> , abgerufen im April 2024
- [21] City of Winnipeg, Emission Factors, https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_appendix_h-wstp_south_end_plant_process_selection_report/appendix%207.pdf , abgerufen im April 2024
- [22] Brinkmann T, Giner Santonja G, Schorcht F, Roudier S, Delgado Sancho L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). EUR 26844. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2014. JRC91156, verfügbar unter: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91156>
- [23] VSA (2018) Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA. Empfehlung.
- [24] IPCC (2023) Sixth Assessment Report AR6, Global Warming Potential values, 2023, verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- [25] Remy et al (2022) Environmental Life Cycle Assessment and risk analysis of NextGen demo case solutions. Deliverable D2.1. EU-Projekt, innovation program under grant agreement N°776541
- [26] Binggeli et al (2019) Reduktion von Lachgas-Emissionen in der biologischen Abwasserreinigung. Programm zur Emissionsverminderung in der Schweiz. Publikation des BAFU. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/klima-kop-bis-2016/0151%20Programm%20zur%20Reduktion%20von%20Lachgas-Emissionen%20in%20der%20Schweizer%20Landwirtschaft.pdf.download.pdf/0151_Programmbeschreibung_publik_170206.pdf
- [27] Liebisch et al. (2023) Stickstoff-Injektionsdüngung mit CULTAN. Agroscope Merkblatt Nr. 190 / 2023. Grundlagen zur Optimierung der N- und P-Kreisläufe.
- [28] BLW (2024) Agrarbericht 2024 – Flächennutzung. <https://www.agrarbericht.ch/de/produktion/pflanzliche-produktion/flaechennutzung>