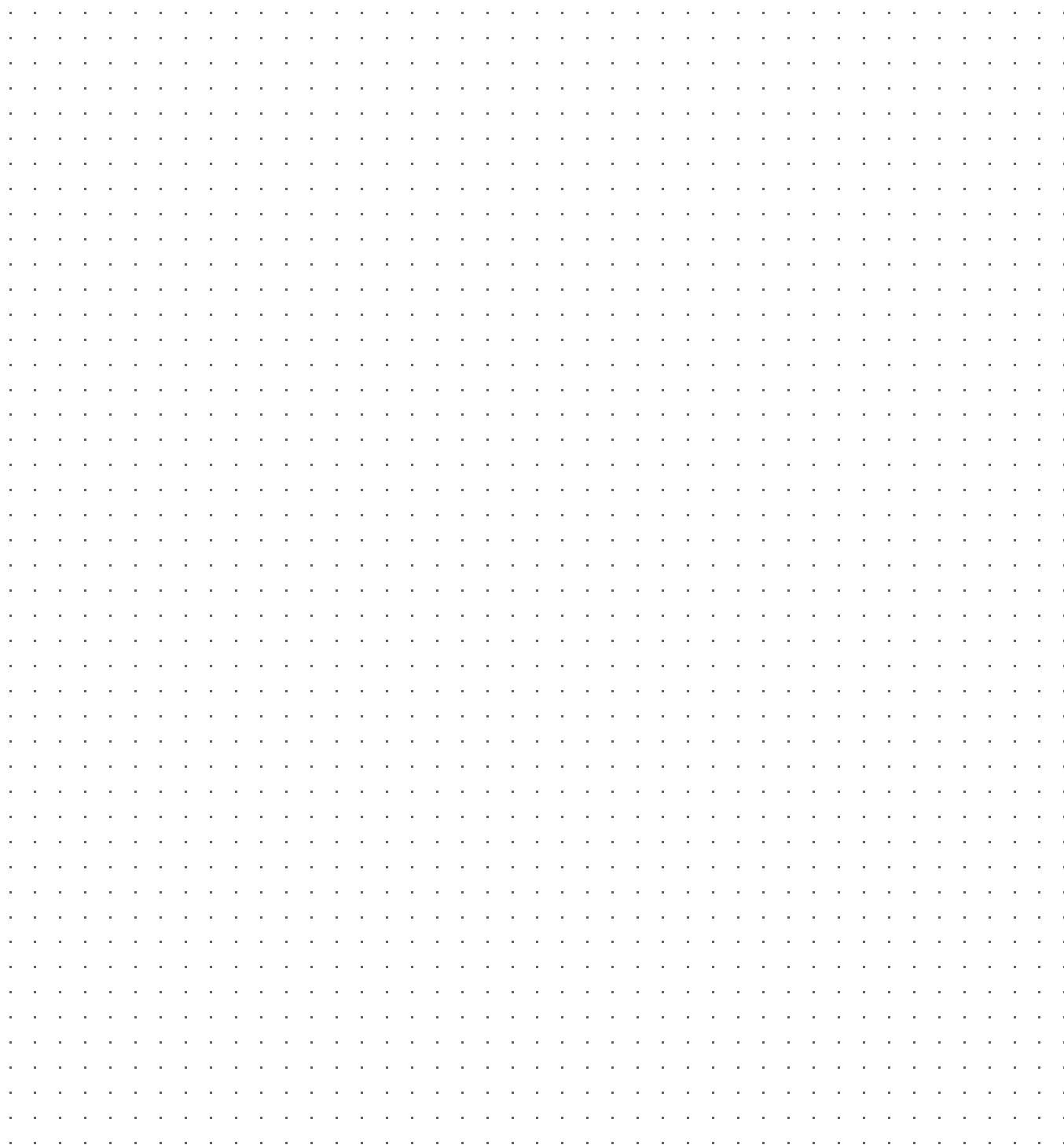


# Ressourceneffiziente ARA

Analyse von Potenzialen und Rahmenbedingungen  
zur Steigerung der Ressourcennutzung



## Impressum

### **Auftraggeber**

Verband der Schweizer Abwasser-  
und Gewässerschutzfachleute VSA  
in Zusammenarbeit mit dem  
Bundesamt für Umwelt BAFU

### **Auftragnehmer**

Ernst Basler + Partner AG  
Zollikerstrasse 65  
8702 Zollikon  
Telefon +41 44 395 11 11  
[www.ebp.ch](http://www.ebp.ch)

### **Projektteam**

Andy Spörri  
Reto Bühler  
Ivo Fölmlí

### **Begleitgruppe**

Christian Abegglen, ERZ/VSA  
Hélène Blény, BAFU  
Christoph Hugi, FHNW  
Anders Nättorp, FHNW  
Michael Schärer, BAFU  
Christoph Streun, ARA Worblental  
Jan Suter, AWA Bern  
Thomas Wintgens, FHNW  
Pascal Wunderlin, Eawag

### **Gestaltung**

Ernst Basler + Partner AG  
Kommunikation  
[www.ebp-kommunikation.ch](http://www.ebp-kommunikation.ch)

# Inhalt

<b>01</b>	<b>EINLEITUNG</b>	
	Ausgangslage	5
	Zielsetzung	5
<b>02</b>	<b>METHODIK</b>	
	Untersuchungsrahmen	7
	Vorgehensweise	8
<b>03</b>	<b>POTENZIALE UND RAHMENBEDINGUNGEN</b>	
	Kapitelaufbau	11
	Ressourcennutzung ARA/Infografik	12
	Rahmenbedingungen	14
	<b>ENERGIE</b>	
E01	Stromeffizienz	16
	Teilsynthese Stromeffizienz	18
E02	Wärmerückgewinnung ARA	20
	Teilsynthese Wärmerückgewinnung ARA	22
E03	Klärschlamm-Desintegration	24
E04	Vergärung Co-Substrate	26
E05	Nachfaulung	28
E06	Verstromung Faulgas im BHKW	30
E07	Faulgasaufbereitung zu Erdgas	32
E08	Wärmenutzung Zulauf	34
E09	Wärmenutzung Ablauf	36
E10	Kleinwasserkraft Zu- und Ablauf	38
E11	Photovoltaik	40
	Teilsynthese Energieproduktion	42
	<b>STICKSTOFF</b>	
N01	N-Stripping	44
	Teilsynthese Stickstoff	46
	<b>PHOSPHOR</b>	
P01	Nasschemische Phosphor-Rückgewinnung aus Faulwasser	48
P02	Nasschemische Phosphor-Rückgewinnung aus Faulschlamm	50
P03	Nasschemische Phosphor-Rückgewinnung aus Asche	52
P04	Thermochemische Phosphor-Rückgewinnung aus Asche	54
	Teilsynthese Phosphor	56
	Heutige Nutzung und Potenzial im Überblick	58
	Abhängigkeiten zwischen den Technologien	60
<b>04</b>	<b>POLITISCHER HANDLUNGSBEDARF</b>	62
<b>05</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	64
	Literaturverzeichnis	66

# 01

## EINLEITUNG

## Ausgangslage

Mit dem im Jahr 2013 vom Bundesrat verabschiedeten Aktionsplan Grüne Wirtschaft wurden die Stossrichtungen für die Entwicklung einer übergreifenden, ressourceneffizienten Schweizer Rohstoffwirtschaft geschaffen. Schädliche Emissionen sollen über den ganzen Lebensweg von Produkten minimiert und die Verfügbarkeit von Rohstoffen für zukünftige Generationen sichergestellt werden. Die Erreichung dieses ambitionierten Ziels beruht auf 27 Massnahmen in vier Umsetzungsschwerpunkten. Diese beinhalten beispielsweise die Steigerung der Ressourceneffizienz in der Industrie, die ressourcenschonende Ernährung, konsequente Produktumweltinformationen für Konsumenten, die Sicherstellung der Versorgung mit kritischen Materialien bis zur konsequenten Schliessung von Stoffkreisläufen. Der Nutzung nicht ausgeschöpfter Ressourcenpotenziale kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu.

Mit der Energiewende soll der schrittweise Ausstieg aus der atomaren Energieproduktion mit anschliessendem Umstieg auf eine vollkommen erneuerbare Energieversorgung mit dem Ziel der Schaffung einer zuverlässigen, wettbewerbsfähigen, unabhängigen und umweltfreundlichen Energieversorgung umgesetzt werden. Sie beruht auf einem Bündel an Massnahmen, die das Zusammenspiel von Energieproduktion, -speicherung, -netzen und -verbrauch optimieren.

## Zielsetzung

Im Hintergrund der vorangehend skizzierten Ausgangslage geht das vorliegende Projekt der übergeordneten Frage des potenziellen Beitrags der Schweizer Abwasserreinigung zu einer nachhaltigen Schweizer Energieversorgung und Ressourcenwirtschaft nach. Es werden politische Entscheidungsgrundlagen erarbeitet, um die Ressourceneffizienz der Schweizer Abwasserreinigung gezielt zu fördern und einen Beitrag zur Grünen Wirtschaft zu leisten.

Die erfolgreiche Umsetzung dieser beiden übergeordneten Bestrebungen erfordert eine koordinierte Planung und Realisierung von Massnahmen in den verschiedensten Branchen und Infrastruktursystemen (z.B. Industrie, Entsorgungssysteme) zur Förderung der Ressourceneffizienz wie auch der Energieeffizienz und erneuerbaren Energieproduktion.

Dabei spielt auch die Schweizer Abwasserreinigung eine nicht unbedeutende Rolle. Die gegen 900 ARA in der Schweiz bergen einerseits ein offen stehendes Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz und der erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion. Andererseits gelangen über das Rohabwasser grosse Mengen an Nährstoffen (v.a. Phosphor, Stickstoff) in die ARA, deren Nutzbarmachung ein umfangreiches Ressourceneffizienzpotenzial beinhaltet. Eine gesamtheitliche Auslegeordnung zu Potenzialen, deren Realisierbarkeit und diese beeinflussenden Rahmenbedingungen ist eine notwendige Voraussetzung, um die erweiterte Ressourcennutzung im Abwasser über regulatorische Massnahmen gezielt und im Rahmen des technisch/wirtschaftlich mach- bzw. gesellschaftlich akzeptierbaren zu fördern.

### **Dabei werden die folgenden, spezifischen Zielsetzungen angegangen:**

- Überblick über die heutige Ressourcennutzung und kurz- bis mittelfristig realisierbare Verbesserungspotenziale.
- Beurteilung von Ansätzen zur gesteigerten Ressourcennutzung hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit (technisch, wirtschaftlich, ARA-Betrieb).
- Überblick über bestehende regulatorische Rahmenbedingungen der Ressourcennutzung und Identifikation von Bereichen mit politischen Handlungs- bzw. Regulierungsbedarf.
- Entwicklung von Vorschlägen für regulatorische Anpassungen in der Gewässerschutzgesetzgebung zur Förderung der Potenzialrealisierung.

# 02

## METHODIK

# Untersuchungsrahmen

Für die Beantwortung der eingangs formulierten Fragestellungen sind unterschiedliche Abgrenzungen des Untersuchungsgegenstands denkbar. Im Folgenden werden die verschiedenen Aspekte des im vorliegenden Projekt abgesteckten Untersuchungsrahmens beschrieben.

## RAUMBEZUG

Das Projekt verfolgt eine gesamtschweizerische Perspektive, das heisst die Beurteilung der Potenziale zur Steigerung der Ressourcennutzung berücksichtigt die Prozesse und Ressourcenflüsse, welche mit der Reinigung des Rohabwassers in der Schweiz (knapp 1.5 Mio. m<sup>3</sup>) in Verbindung stehen.

## ZEITHORIZONT

Die Auslegeordnung zum möglichen Beitrag der Abwasserreinigung zu einer Grünen Wirtschaft orientiert sich an einem mittelfristigen Zeithorizont. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde dafür das Jahr 2030 festgelegt. Dies hat Implikationen auf die Abgrenzung des Abwassersystems und die berücksichtigten Technologien, welche zur Steigerung der Ressourcennutzung in Frage kommen (vgl. unten).

## ABWASSERSYSTEM

Das Projekt berücksichtigt alle Prozesse auf der ARA, auf welchen die Reinigung des Rohabwassers sowie die Behandlung der dabei entstehenden Schlämme beruhen. Die Betrachtung geht jedoch über die ARA hinaus und berücksichtigt auch Optionen zur Steigerung der Ressourcennutzung im vor- bzw. nachgelagerten Zu- bzw. Abfluss sowie die weitere Behandlung von Klärschlämmen in der Abfallwirtschaft. Dezentrale Ansätze an der Abwasserquelle (sprich in den Haushalten vor der Einleitung in die Kanalisation) wie beispielsweise die Trennung von Braun- und Gelbwasser oder die Ausscheidung von Fremdwasser mit entsprechenden Anpassungen der Kanalisation und ARA-Kapazitäten werden nicht betrachtet, da deren Realisierung eine fundamentale Umgestaltung des Systems erfordert und innerhalb des mittelfristigen Zeithorizonts (2030) nicht realisierbar erscheint.

## RESSOURCEN

Berücksichtigt werden die Ressourcen «Energie» (Strom, Wärme, Brennstoffe) sowie die im Abwasser enthaltenen Hauptnährstoffe (Phosphor, Stickstoff). Die effizientere Nutzung der Ressource «Wasser» ist nicht Gegenstand der Analyse, da dieser Aspekt in der Schweiz im Vergleich zu anderen Ländern von eher untergeordneter Bedeutung ist.

## TECHNOLOGIEN

Grundlage für die Auswahl der zu berücksichtigenden Technologien war die Vorarbeit der FHNW (2014), welche eine Zusammenstellung von Ansätzen zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf ARA erstellte. In der vorliegenden Studie wurden in einem aufbauenden, vertiefenden Schritt dieselben Technologien weiter analysiert, mit Ausnahme derjenigen, welche:

- Ausschliesslich auf die Verbesserung der Schadstoffelimination abzielen, ohne einen Beitrag zur Steigerung der Ressourcennutzung zu leisten (z.B. Aktivkohlefiltration oder Ozonierung zur Elimination von Mikroverunreinigungen).
- Aufgrund ihres ungenügenden, technologischen Reifegrads (Entwicklungsstand) innerhalb des betrachteten Zeithorizonts nicht breit implementierbar erscheinen.

Die Technologien zur Steigerung der Ressourceneffizienz gliedern sich grundlegend in folgende Bereiche:

- Energieeffizienz
- Energieproduktion
- Nährstoffrückgewinnung auf ARA (N, P)
- Nährstoffrückgewinnung in der Abfallwirtschaft (P)

Eine Übersicht über das analysierte Abwassersystem und die berücksichtigten Technologien ist der Infografik auf den [Seiten 12/13](#) zu entnehmen.

# Vorgehensweise

## ÜBERSICHT ÜBER DIE DREI PROJEKTMODULE

MODUL	ARBEITSSCHRITTE	HAUPTERKENNTNIS
1. Analyse Ressourcenpotenziale	1.1 Analyse Status Quo 1.2 Potenzialanalyse 1.3 Beurteilung Realisierbarkeit	Hinsichtlich Realisierbarkeit beurteilte Ressourcenpotenziale für alle Technologien, Analyse von Abhängigkeiten und Zielkonflikten
2. Wirkung von Rahmenbedingungen	2.1 Identifikation Einflussfaktoren 2.2 Wirkungsanalyse	Regulierungslücken bzw. Fehlanreize, welche die Ausschöpfung der Ressourcenpotenziale behindern.
3. Politischer Handlungsbedarf	3.1 Beurteilung Regelungsbedarf 3.2 Rechtliche Anpassungen	Regulatorische Anpassungsvorschläge, um Ausschöpfung der Ressourcenpotenziale zu fördern.

### 1. Analyse Ressourcenpotenziale

Die Projektbearbeitung gliedert sich in drei aufeinander aufbauende Module. Die entsprechenden Arbeitsschritte und gewonnenen Haupterkenntnisse zur Beantwortung der Hauptfragestellung sind in der Tabelle zusammengefasst.

Das erste Modul verfolgte zwei Teilzielsetzungen. Erstens soll für alle berücksichtigten Technologien zur Steigerung der Ressourcennutzung in der Abwasserreinigung die heutige Nutzung (1.1) sowie das mittelfristig, theoretisch noch realisierbare, d.h. offenstehende Potenzial (1.2) abgeschätzt werden. Diese beiden Schritte erfolgten auf Grundlage bestehender Literatur/Studien zu den unterschiedlichen Technologien, den Faktenblättern der FHNW, und dem bedarfsabhängigen Austausch mit ausgewählten Fachleuten (Begleitgruppe, weitere). Die Abschätzung der Potenziale bezog sich – falls möglich aufgrund der Verfügbarkeit von Informationen – auf das noch offenstehende Potenzial, d. h. den unter gegebenen technischen Restriktionen nutzbaren Anteil des theoretischen Potenzials (vgl. dazu BFE, 2007), welcher heute noch nicht ausgeschöpft ist. Weitere Aspekte, welche das tatsächlich ausschöpfbare Potenzial mitbestimmen (z. B. Wirtschaftlichkeit, Einfluss auf ARA-Betrieb, gesamtökologischer Sinn), blieben in diesem Schritt unberücksichtigt.

Ergänzend dazu sollen die mit den analysierten Technologien verbundenen Ressourcenpotenziale hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit beurteilt werden (1.3). Die Beurteilung erfolgte auf Grundlage von drei vorgegebenen

Beurteilungskriterien, die unterschiedliche, die Umsetzung bestimmende Aspekte abdecken. Für die Beurteilung der drei Kriterien wurde eine 3er-Ordinalskala beigezogen (falls keine eindeutige Zuordnung möglich war, wurden bei der Beurteilung zwei Zwischenstufen berücksichtigt). Da die Realisierbarkeit stark von der ARA-Grösse abhängt, wurde diesem Aspekt in der Beurteilung Rechnung getragen.

#### TECHNISCHE MACHBARKEIT

Entwicklungsstand (Reifegrad) des technologischen Verfahrens. Die Beurteilung erfolgte bezugnehmend auf die Skalen des «technology readiness level», bezog aber zusätzlich den Aspekt des noch offenen Entwicklungspotenzials mit ein (technological learning):



Grosstechnische Prototypen/Versuchsanlagen (auch im Ausland) im Einsatz; mittelfristiges Entwicklungspotenzial aufgrund ersten Erfahrungswerten relativ gering.



Qualifizierte Technologie mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes ohne bedeutende Schwierigkeiten, mittelfristiges Entwicklungspotenzial zur Marktreife vorhanden.



Bewährte, mehrjährig betriebene, zuverlässige Technologie.



## WIRTSCHAFTLICHKEIT

Wirtschaftlichkeit der Technologie in der Schweizer ARA-Landschaft. Die Beurteilung erfolgte unter Berücksichtigung der folgenden Skala:



Wirtschaftlichkeit heute nicht gegeben und aufgrund absehbarer Entwicklungen mittelfristig nicht gegeben.



Wirtschaftlichkeit bei grösseren ARA gegeben bzw. aufgrund möglicher Entwicklungen mittelfristig möglich.



Wirtschaftlichkeit unabhängig von der ARA gegeben.

## EINFLUSS AUF ARA-BETRIEB

Beeinträchtigung bzw. Anpassungen im ARA-Betrieb, die durch eine neue Technologie erforderlich sind, sowie betriebsbezogene Umsetzungsrestriktionen. Berücksichtigt werden dabei Aspekte wie Platzbedarf, Betriebs- und Unterhaltsaufwand, erforderliches Knowhow, und Kompatibilität mit bestehendem ARA-Setup.



Nicht oder nur mit unverhältnismässigen Bemühungen zu bewältigende Anpassungen im ARA-Betrieb erforderlich.



Mit verhältnismässigen Anpassungen in heutigen ARA-Betrieb integrierbar (vor allem bei grösseren Anlagen).



Problemlos in das bestehende ARA-Setup integrierbar bzw. Implementierung erfolgt ausserhalb der ARA und hat keinen Einfluss auf den Betrieb.

Da die vorgängig beschriebenen drei Arbeitsschritte auf einer technologie-spezifischen Betrachtung beruhen, wurde die Kompatibilität zwischen den einzelnen Technologien ebenfalls berücksichtigt. Dies erfolgte anhand einer Kreuztabelle durch das Kernteam.

Beurteilungsskala:

- ++** Die beiden Technologien setzen sich gegenseitig voraus
- +** Die Kombination der beiden Technologien ist sinnvoll
- 0** Die beiden Technologien sind unabhängig voneinander
- Die Kombination der beiden Technologien ist wenig sinnvoll
- Die beiden Technologien schliessen sich gegenseitig aus

Zusätzlich wurden auch Zielkonflikte zwischen umweltpolitischen Teilzielen analysiert. Dabei stand der Trade-off

zwischen Anliegen einer Steigerung der Ressourcennutzung und dem Grundanliegen an die Abwasserreinigung «Schutz von natürlichen Gewässern vor Beeinträchtigungen» im Vordergrund.

## 2. Wirkungen von Rahmenbedingungen

Das zweite Modul zielte darauf, den Einfluss (d.h. fördernd oder hemmend) der heutigen und zukünftig absehbaren Rahmenbedingungen auf die Realisierung der identifizierten Technologie-Potenziale zu beurteilen. In einem ersten Schritt wurden diverse Einflussfaktoren erarbeitet, die eine fördernde und/oder hemmende Wirkung auf die Implementierung der Technologien ausüben (2.1). Die regulatorischen Rahmenbedingungen standen dabei im Vordergrund. Zusätzlich wurden auch sozio-ökonomische Faktoren berücksichtigt, die hinsichtlich finanzieller Anreizstrukturen oder verhaltens-bezogenen Aspekten von Bedeutung sind. Darauf aufbauend wurde jeder Einflussfaktor hinsichtlich seiner Wirkung auf die Ausschöpfung jedes Technologie-Potenzials beurteilt (2.2).

Die Beurteilung der Wirkung auf die Potenzialrealisierung erfolgte auf folgender 5er-Ordinalskala:

- ++** Stark fördernde oder verpflichtende Wirkung
- +** Schwache fördernde Wirkung
- 0** Keine Wirkung
- Schwach hemmende Wirkung
- Stark hemmende bzw. verbotende Wirkung

Die Resultate der ersten beiden Module sind in Technologie-spezifischen Faktenblättern übersichtlich zusammengefasst (vgl. Kapitel 3)

## 3. Politischer Handlungsbedarf

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den ersten beiden Modulen wurden im abschliessenden dritten Modul Vorschläge für gesetzliche Anpassungen in der Gewässerschutzgesetzgebung erarbeitet, um eine gesteigerte Ressourcennutzung bzw. die Ausschöpfung der Ressourcenpotenziale zu fördern. Dazu wurde in einem ersten Schritt der Bedarf für gesetzliche Anpassungen bzw. Weiterentwicklungen ermittelt und die zentralen, inhaltlichen Stossrichtungen abgeleitet (3.1). Dieser Schritt wurde geleitet durch diejenigen Bereiche, in denen nicht ausgeschöpfte Ressourcenpotenziale vorhanden sind (vgl. Modul 1) und die in Modul 2 vorgenommene Beurteilung der Wirkungen gezeigt hat, dass bestehende Regulierungen interferieren bzw. nicht ausreichen. Darauf aufbauend wurden die erarbeiteten Stossrichtungen in einer Arbeitssitzung mit Juristen des BAFU diskutiert und ein konkreter Vorschlag zur Anpassung der Gewässerschutzgesetzgebung entwickelt (3.2).

# 03

## POTENZIALE UND RAHMENBEDINGUNGEN

# Kapitelaufbau

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus der Studie illustriert. Da sich die Struktur von den vorher skizzierten Arbeitsmodulen unterscheidet, wird der Aufbau des Kapitels im Folgenden kurz eingeführt. Die Resultate gliedern sich grundsätzlich in zwei Unterkapitel. Ersteres stellt die Ergebnisse aus den ersten beiden Projektmodulen dar und ist folgendermassen strukturiert:

## **UNTERSUCHTES ABWASSERSYSTEM**

SEITE 12

Zweiseitige Infografik zur Illustration des untersuchten Abwassersystems inklusive der Verortung aller in der Studie berücksichtigten Technologien zur Steigerung der Ressourcennutzung.

## **ÜBERSICHT ÜBER DIE RAHMENBEDINGUNGEN**

SEITE 14

Tabellarische Übersicht mit allen Rahmenbedingungen, welche die Ressourcennutzung im betrachteten Abwassersystem beeinflussen, mit entsprechenden Kurzbeschreibungen.

## **TECHNOLOGIE-FAKTENBLÄTTER**

SEITE 16 BIS 57

Die Technologie-Faktenblätter bilden den eigentlichen Kern der Ergebnisse und sind in fünf Bereiche unterteilt.

### **Ressourcenbereiche:**

- **Stromeffizienz**
- **Wärmerückgewinnung auf ARA**
- **Energieproduktion**
- **Stickstoff-Rückgewinnung**
- **Phosphor-Rückgewinnung**

Für jeden Bereich werden die wesentlichen Erkenntnisse in einer kurzen Teilsynthese unter Berücksichtigung aller darin behandelten Technologien zusammengefasst.

Die einzelnen Faktenblätter fassen für jede berücksichtigte Technologie die Ergebnisse aus den ersten beiden Arbeitsmodulen zusammen und sind wie folgt aufgebaut:

### **Inhaltsgliederung:**

- Kurzbeschreibung der Technologie
- Informationen zur heutigen Nutzung und den mittelfristigen Potenzialen
- Beurteilung der Realisierbarkeit
- Darstellung von technologischen Abhängigkeiten und Zielkonflikten
- Beurteilung der Wirkung der Rahmenbedingungen auf die Implementierung der Technologie

## **HEUTIGE NUTZUNG, POTENZIALE UND REALISIERBARKEIT IM ÜBERBLICK**

SEITE 58

Eine zweiseitige Infografik, welche für alle Technologien die heutige Nutzung, die mittelfristigen Potenziale sowie die Beurteilung der Realisierbarkeit übersichtlich zusammenfasst.

## **KOMPATIBILITÄT ZWISCHEN DEN TECHNOLOGIEN**

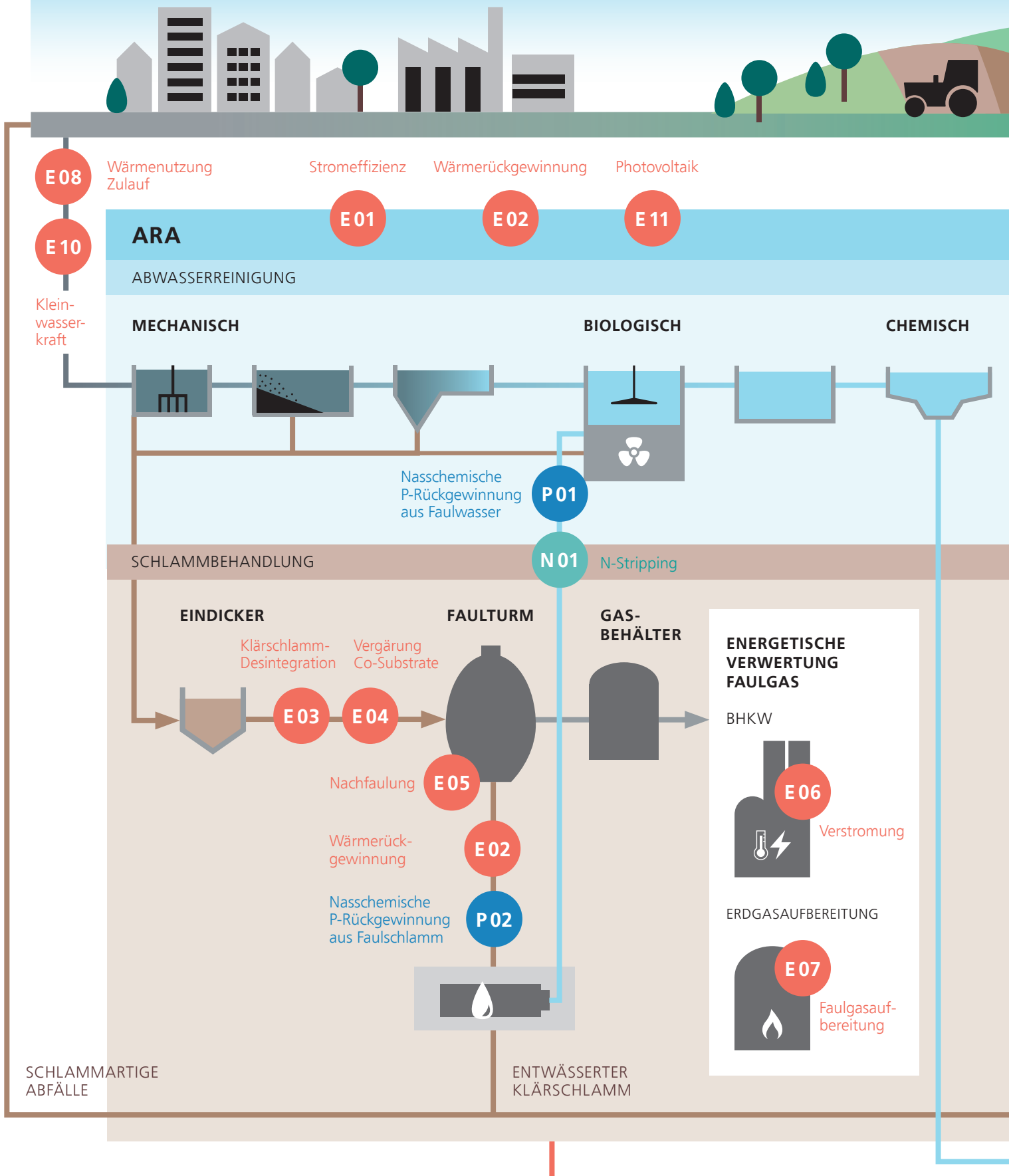
SEITE 60

Zweiseitige Übersicht mit einer Beurteilung der Kompatibilität zwischen den Technologien.

# Untersuchtes Abwassersystem

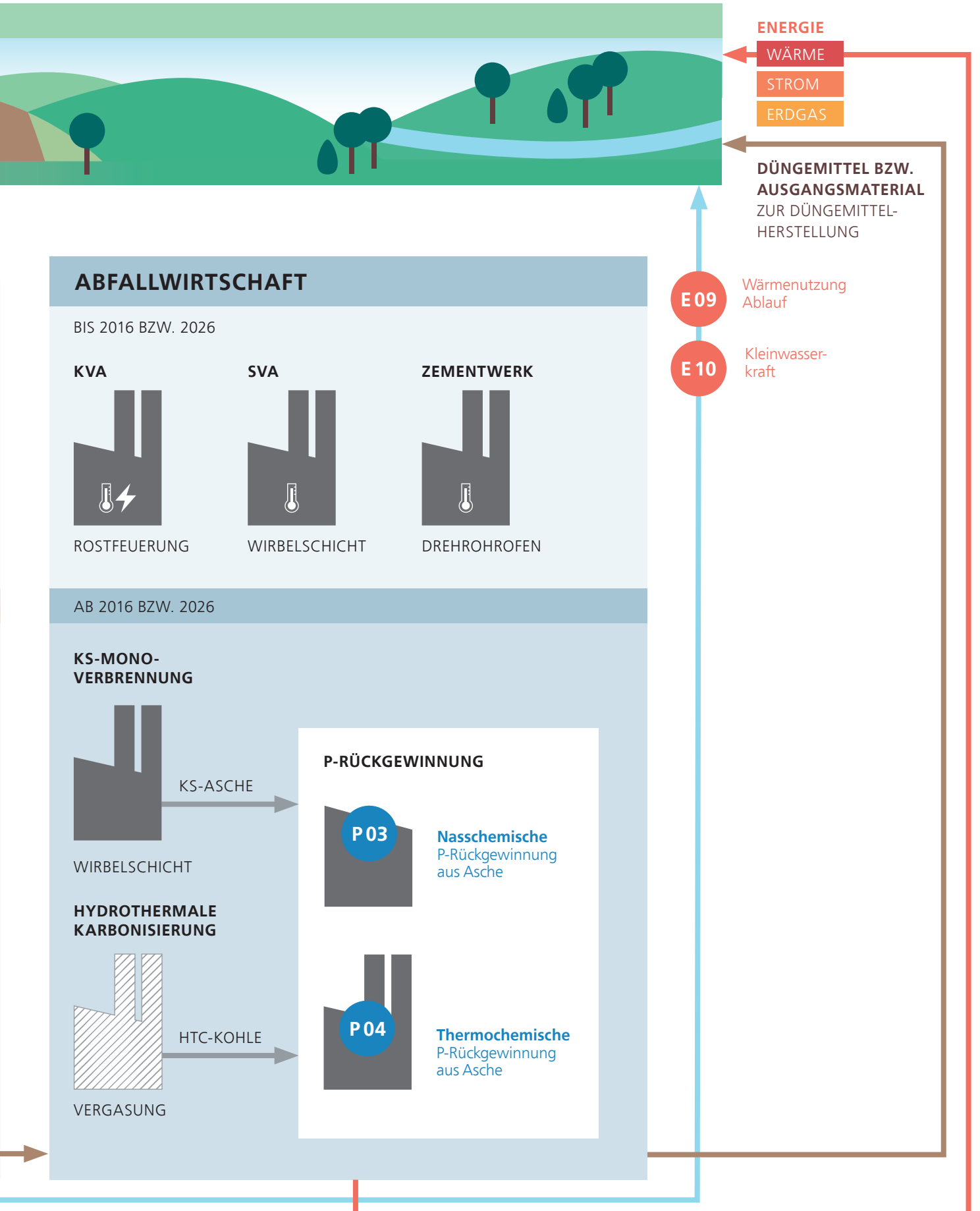
## TECHNOLOGIEN ZUR STEIGERUNG DER RESSOURCENNUTZUNG

SIEDLUNGSRaum, LANDWIRTSCHAFT, NATÜRLICHE GEWÄSSER



**E01-E02 > ENERGIEEFFIZIENZ**  
**E03-E11 > ENERGIEPRODUKTION**

**N01 > N-RÜCKGEWINNUNG**  
**P01-P04 > P-RÜCKGEWINNUNG**



# Rahmenbedingungen

## REGULATORISCHE EINFLUSSFAKTOREN

EINFLUSSFAKTOR	KURZBESCHREIBUNG
<b>CO<sub>2</sub>-Gesetz</b> inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung	Das Bundesgesetz über die Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen (kurz: CO <sub>2</sub> -Gesetz) legt verbindliche Ziele für die Reduktion von Treibhausgasen fest. Das Ziel des Gesetzes ist, den CO <sub>2</sub> Ausstoss bis 2020 um 20 % gegenüber 1990 zu senken. Das Gesetz enthält eine Reihe von politischen Massnahmen des Bundes sowie freiwillige Massnahmen von Unternehmen und Privathaushalten. Die CO <sub>2</sub> -Verordnung präzisiert die Bestimmungen aus dem CO <sub>2</sub> -Gesetz.
<b>Energiegesetz</b> EnG, inkl. Energieverordnung, EnV	Das EnG soll zu einer ausreichenden, breit gefächerten, sicheren, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung beitragen. Die Nutzung von Energie soll sparsam und rationell erfolgen und einheimische und erneuerbare Energien gefördert werden. Ausserdem soll die Energie bestmöglich und mit einem hohen Wirkungsgrad eingesetzt sowie die verwendbare Abwärme genutzt werden. Die EnV konkretisiert die Bestimmungen aus dem EnG.
<b>Mineralölsteuerverordnung</b> MinöStV	Die Mineralölsteuer ist eine besondere Verbrauchssteuer, mit der Mineralöle besteuert werden. Der Bund erhebt diese auf Erdöl, anderen Mineralölen, Erdgas und den bei ihrer Verarbeitung gewonnenen Produkten sowie auf Treibstoffen. Auf Letzteres wird zusätzlich ein Mineralölsteuerzuschlag erhoben. Geregelt wird die Abgabe der Mineralölsteuer durch das Mineralölsteuergesetz und der Mineralölsteuerverordnung.
<b>Gewässerschutzgesetz</b> GSchG	Das GSchG verfolgt das primäre Ziel, alle ober- und unterirdischen Gewässer vor Beeinträchtigungen zu schützen. Unter anderem sind darin die übergeordneten Vorgaben zur Beseitigung und Behandlung von Abwasser vorgegeben. Das Gesetz enthält auch die allgemeinen Grundsätze zum Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen.
<b>Gewässerschutzverordnung</b> GSchV	Die GSchV konkretisiert die allgemeine Bestimmung des GSchG. Dies umfasst unter anderem konkrete Vorgaben für die Abwasserbeseitigung, den Bau und Betrieb von ARA, die Entsorgung von Klärschlamm und die Einleitung von Abwasser in Gewässer (Grenzwerte für verunreinigende Stoffe und tolerierte Temperaturveränderungen von natürlichen Gewässern, etc.).
<b>Technische Verordnung über Abfälle</b> TVA (Vernehmlassungsversion 2015)	Die Technische Verordnung über Abfälle (TVA) regelt die Entsorgung von Abfällen. Mit der laufenden Revision soll unter anderem die Rückgewinnung von Phosphor aus phosphorreichen Abfällen (z. B. Klärschlamm) vorgeschrieben sowie die Verwertung von biogenen Abfällen (z.B. ARA-Co-Substrate) neu geregelt werden.
<b>Düngerverordnung</b> DüV	Die DüV enthält Regelungen zu Zulassung, Inverkehrbringen, Einfuhr und die Verwendung von Düngern (Mineraldünger, Recyclingdünger). Konkrete Anforderungen zur Zulassung und Verwendung von Düngemitteln sind in der ChemRRV geregelt.
<b>Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung</b> ChemRRV	Die ChemRRV enthält die Bestimmungen zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen. Unter anderem werden hier die konkreten Qualitätsanforderungen (z. B. Schadstoffgehalte) für organische Dünger, Recycling- und Hofdünger sowie die Übergangsbestimmungen für Klärschlamm festgelegt.
<b>Energierichtpläne und kommunale Energiekonzepte</b>	Energierichtpläne sind ein Instrument zur Abstimmung der räumlichen Entwicklung und die daraus resultierende Energienutzung auf die vorhandenen Energiepotenziale in einem Kanton oder einer Stadt/Gemeinde.

## SOZIO-ÖKONOMISCHE EINFLUSSFAKTOREN

---

EINFLUSSFAKTOR	KURZBESCHREIBUNG
<b>Preis Netzstrom</b>	Preis für ARA-Betreiber zur Beschaffung von Netzstrom. Der Preis beeinflusst die Wirtschaftlichkeit von Effizienz-Massnahmen und die Kosteneinsparungen und Erlöse über die Stromproduktion auf ARA.
<b>Preis Brennstoff</b>	Preis für ARA-Betreiber zum Einkauf von gängigen fossilen Brennstoffen (Erdgas, Erdöl) für die Produktion der Prozesswärme. Er beeinflusst die Wirtschaftlichkeit von Effizienz-Massnahmen und die Kosteneinsparungen und Erlöse über die Wärme- produktion auf ARA.
<b>Preis PV-Module</b>	Preis für ARA-Betreiber zur Beschaffung von dem Stand der Technik entsprechenden Photovoltaik-Modulen zur Stromproduktion.
<b>Preis Mineraldünger</b>	Durchschnittlicher Preis für die Beschaffung von N- und P-Mineraldünger durch die Schweizer Landwirte. Je höher dieser Preis, desto wirtschaftlicher ist die Produktion von KS-Düngern zur Schliessung von Nährstoffkreisläufen.
<b>Akzeptanz Recyclingdünger</b>	Bereitschaft von Düngerabnehmern bzw. Düngerindustrie, Recyclingdünger bzw. Ausgangsmaterial aus Klärschlamm anstelle von Mineraldüngern im Pflanzenbau einzusetzen (unter der Voraussetzung vergleichbarer Preise und qualitativen Charakteristiken).
<b>Interessen Zementindustrie</b>	Interesse und Lobbyismus der Schweizer Zementindustrie zur sicheren Versorgung mit günstigen und klimaneutralen Ersatzbrennstoffen wie beispielsweise Klärschlamm.

## WEITERE EINFLUSSFAKTOREN

---

<b>Schonung Phosphor-Vorkommen</b>	Phosphor ist eine vergleichsweise begrenzte und essentielle Ressource, deren Abbau geographisch hochkonzentriert und mit bedeutenden ökologischen und sozialen Beeinträchtigungen erfolgt.
<b>Versorgungssicherheit</b>	Versorgungssicherheit bezeichnet hier die langfristige, stetige Sicherung der Versorgung der Schweiz mit Energie und strategisch wichtigen Rohstoffen.

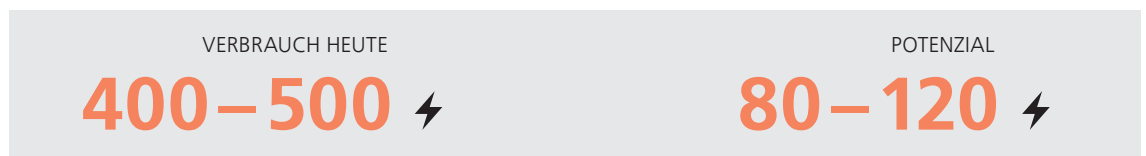
# E 01 Stromeffizienz

Senkung des Stromverbrauchs in ARA auf aktuelle Richtwerte (gemäss Leitfaden VSA/ energie schweiz) durch konsequente Umsetzung von Effizienzmassnahmen:

- a) bedarfsgerechter Betrieb Aggregate (z.B. tageszeitabhängige Optimierung).
- b) betriebliche und verfahrenstechnische Optimierungen: Grösse der Vorklärung, erhöhte Denitrifikation, separate Faulwasserbehandlung mit Anammox, Optimierung der Schlammensorgung, effiziente Membranbelüfter, optimierte Mess- und Regeltechnik (insbesondere Belüftungsregelung).
- c) Einsatz effizienter und optimal ausgelegter Aggregate für die Abwasser- und Schlammbehandlung: Pumpen, Rührwerke, Gebläse, Dekanter etc.
- d) Einsatz von Frequenzumrichtern.

## Heutige Nutzung und Potenzial

ENERGIE-  
EFFIZIENZ  
GWh/a



Umsetzungsbeispiele: Mehrheit der Schweizer ARA, einige ARA sind besonders innovativ

## Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Keine technischen Hürden für Einsatz effizienter Aggregate und betriebliche/verfahrenstechnische Optimierungen (entspricht Stand der Technik)



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Gut bei altersbedingtem Ersatz von Aggregaten, bei frühzeitigem Ersatz fraglich und im Einzelfall zu prüfen, Einzelfallabklärungen bei betrieblichen und verfahrenstechnischen Optimierungen, abhängig von ARA-Grösse (v.a. mittlere bis grosse ARA) und Einsparpotenzial



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Keine bis geringe Auswirkungen auf ARA-Betrieb durch Einsatz effizienter Aggregate, Um- und Erweiterungsbauten bei betrieblichen/verfahrenstechnischen Optimierungen erforderlich, erhöhte Anforderungen an Automatisierung bzw. Mess- und Prozessleittechnik sowie an Qualifikation des Betriebspersonals

## Zielkonflikte und Abhängigkeiten

### INTERN

Einzelbetrachtungen (Energieanalysen, Wirtschaftlichkeitsrechnungen) zur Identifikation von geeigneten und wirkungsvollen Ansatzpunkten für Optimierung erforderlich.

Umsetzung und Erfolgskontrolle bindet personelle Ressourcen und erfordert teilweise externe Ingenieur-Beratung (für kleinere ARA mit geringem Einsparpotenzial problematisch).

Separate Faulwasserbehandlung mittels Anammox-Verfahren in Konkurrenz zu Verfahren zur Stickstoff-Rückgewinnung aus Faulwasser (z. B. N-Stripping).

Positiver Einfluss einer grösseren Vorklärung auf weitere Schlammbehandlung (nicht generalisierbarer Erfahrungswert): verbesserte Entwässerbarkeit und erhöhte Klärgasproduktion; möglicherweise erhöhte Schlammensorgungskosten.



**EXTERN**

Verschiedene Auswirkungen von Massnahmen auf die Reinigungsleistung der ARA und damit auf die Anliegen des Gewässerschutzes, z. B.:

- Vergrösserung der Vorklärung mit negativem Einfluss auf die Denitrifikationsleistung.
- optimierte Belüftungsregelung mit positivem Einfluss auf Denitrifikationsleistung, aber potenzielle Erhöhung von Lachgasemissionen (Treibhausgas, Abbau von stratosphärischem Ozon).

Erhöhung des Stromverbrauchs durch Einsatz von Verfahren zur weitergehenden Abwasserreinigung und Einhaltung der sich verschärfenden Einleitorderungen (z.B. Membranfiltration, Elimination von Mikroverunreinigungen).

Wirkung der Rahmenbedingungen

**REGULATORISCH**

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	+++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV) > Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	+++	Art. 7: Wettbewerbliche Ausschreibungen zur finanziellen Förderung der Stromeffizienz (ProKilowatt, z. B.: Programm «Energieeffiziente ARA» von Infrawatt) Art. 17: Zielvereinbarungen bei Grossverbrauchern
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+ -	Priorität Gewässerschutz (Verschärfungen und höherer Strombedarf absehbar, z.B. Elimination Mikroverunreinigungen) Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb (Art. 10, Abs. 1 bis) Anforderungen an Stickstoff-Elimination aus Abwasser (nicht Ansatz-spezifisch; N-Stripping als ein mögliches Verfahren)
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+ -	Priorität Gewässerschutz Art. 14: Betriebsdaten (u.a. Energieverbrauch) meldepflichtig als Optimierungsgrundlage Anhang 3: Anforderungen betreffend Phosphor- und Stickstoff-Elimination Neue Vollzugshilfe (Kap. 2.4 Optimierung des Energieverbrauchs und der Energiegewinnung)

**SOZIO-ÖKONOMISCH**

Preis Netzstrom	0	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zu Effizienzsteigerungen (Beschaffungskosten)
-----------------	---	---

**WEITERE FAKTOREN**

Versorgungssicherheit	+	Reduktion des Strombedarfs erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	--

Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Keine Aussage zur Effizienz möglich; Verbrauch heute aus VSA/energieschweiz (2008/2010)

**POTENZIAL** Realisierbares Potenzial auf Grundlage einer «top-down»-Bestimmung von Effizienzpotenzialen aus der Differenz zwischen heutiger Situation und flächendeckender Umsetzung von Energierichtwerten (Kind & Levy, 2012).

**WEITERE LITERATUR** Kolisch et al. (2010), Wunderlin et al. (2014), FHNW (2014), Levy (2009), Kühni et al. (2010), Siegrist et al. (2009)

## Teilsynthese Stromeffizienz

In den verschiedenen Prozessstufen der ARA existieren diverse Möglichkeiten zur Steigerung der Stromeffizienz bzw. zur Senkung des Stromverbrauchs. Rund 40 % des Stromverbrauchs von Schweizer Kläranlagen entfällt auf die biologische Behandlung. Entsprechend setzen zahlreiche Verfahren in diesem Bereich an, z. B. bei der Reduktion der Belastung der biologischen Reinigung (grössere Vorklärbecken, separate Faulwasserbehandlung), beim Einsatz effizienter und optimal ausgelegter Aggregate (Gebläse, Rührwerke), aber auch bei der Optimierung der Belüftungssteuerung sowie verfahrenstechnischen Anpassungen (Denitrifikation). Weitere Möglichkeiten liegen im Einsatz von Frequenzumrichtern und im Bereich der Schlammwässerung (Dekanter, Filterpressen).

Die heutige Situation bezüglich der Umsetzung von Massnahmen zur Senkung des Stromverbrauchs ist sehr heterogen. Einzelne grössere Kläranlagen schöpfen das Potenzial zur Senkung des Stromverbrauchs weitgehend aus. Demgegenüber sind die Potenziale insbesondere auf vielen mittleren und kleinen Kläranlagen zurzeit noch in weit geringerem Masse genutzt.

Das gesamte, noch offenstehende Potenzial zur Reduktion des Stromverbrauchs über die heute verfügbaren Technologien und Optimierungsmassnahmen liegt bei schätzungsweise 100 GWh/a. Entsprechend besteht die Möglichkeit, den Stromverbrauch von heute 450 GWh/a (2012) in Zukunft um rund 20 % zu reduzieren, auch wenn ein relevanter Teil der Einsparungen durch steigende gewässerschutzrechtliche Anforderungen und entsprechende verfahrenstechnische Nachrüstungen kompensiert werden dürfte: Der zusätzliche Strombedarf für die Elimination von Mikroverunreinigungen wird sich beispielsweise auf ungefähr 60 GWh/a belaufen. Nicht berücksichtigt bei der Potenzialabschätzung sind Effizienzsteigerungen durch Skaleneffekte, welche z. B. als Folge einer verstärkten Regionalisierung (ARA-Zusammenschluss, regionale Schlamm Entsorgung) erreicht werden oder durch Massnahmen an Pumpwerken im Kanalnetz, welche gesamtschweizerisch ebenfalls grosses Potenzial zur Reduktion des Strombedarfs bieten. Ebenfalls nicht berücksichtigt sind die Möglichkeiten zur Lastverschiebung, welche zurzeit im Rahmen einer Machbarkeitsstudie vom BFE untersucht werden (BFE, 2013).

Technisch sind die Massnahmen zur Senkung des Stromverbrauchs mittelfristig realisierbar. Die Wirtschaftlichkeit von energieeffizienten Aggregaten ist mit gewissen Einschränkungen knapp gegeben, insbesondere wenn bestehende Aggregate altersbedingt ersetzt werden müssen. Es ist jedoch zu empfehlen, dass bei Anschaffungen eine einfache Kostenrechnung über die gesamte Lebensdauer eines Aggregates durchgeführt wird. Der frühzeitige Ersatz von Aggregaten sowie betriebliche und verfahrenstechnische Optimierungen sind vergleichsweise weniger wirtschaftlich und erfordern Einzelfallabklärungen unter Berücksichtigung der spezifischen Voraussetzungen auf ARA. Der ARA-Betrieb ist durch den Einsatz energieeffizienter Aggregate nicht massgebend betroffen. Allerdings können aus betrieblichen und verfahrenstechnischen Optimierungen erhöhte Anforderungen an die Automatisierung und/oder Um- und Erweiterungsbauten resultieren, z. B. die separate Faulwasserbehandlung mittels Anamox-Verfahren oder die Vergrösserung der Vorklärung. Diese Massnahmen haben zum Teil erhebliche Auswirkungen auf den ARA-Betrieb.

Die Umsetzung von Massnahmen zur Steigerung der Stromeffizienz auf ARA werden durch die heutigen Rahmenbedingungen stark gefördert. Im Vordergrund stehen dabei die finanzielle Förderung von Effizienzsteigerungen über die im Energiegesetz und -Verordnung geregelten wettbewerblichen Ausschreibungen (WeA, ProKilowatt) sowie die im CO<sub>2</sub>-Gesetz und -Verordnung festgehaltene Ausstellung von Bescheinigungen für im Inland freiwillig erzielte Verminderungen von Treibhausgasemissionen. Im Rahmen der WeA läuft unter Federführung von Infracore gerade das Förderprogramm «Energieeffiziente ARA», welches die ARA in der Ermittlung ihrer spezifischen Potenziale und in der Umsetzung von Stromsparmassnahmen unterstützt. Die Gewässerschutzgesetzgebung hat einerseits eine fördernde Wirkung, da sie den Grundsatz eines wirtschaftlichen ARA-Betriebs vorgibt (worauf Stromsparmassnahmen einen positiven Einfluss haben), Energieverbrauchsdaten als hilfreiche Optimierungsgrundlage meldepflichtig sind und in einer neuen Vollzugshilfe Leitlinien zur Optimierung des Energieverbrauchs festgehalten sind. Andererseits steht in der Gewässerschutzgesetzgebung die Elimination von Schadstoffen im Zentrum, was sich negativ auf den Stromverbrauch auswirken kann.

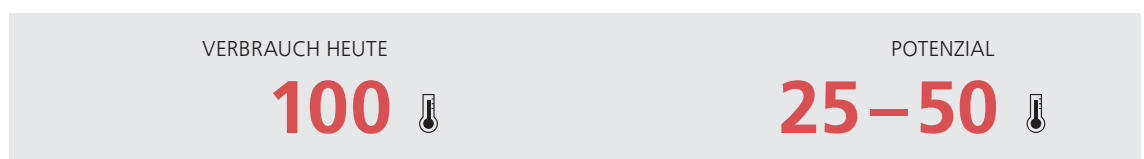


## E 02 Wärmerückgewinnung ARA

Verschiedene Ansätze zur Rückgewinnung von ungenutzter Abwärme aus ARA-Betrieb. Abwärme kann aus Faulschlamm, bei Prozessluft-Gebläsen, bei der Klärgasaufbereitung (verfahrensabhängig) oder dem BHKW zurückgewonnen werden und lässt sich ARA-intern verwenden (Gebäudeheizung, Klärgasaufbereitung, Erwärmung des Frischschlammes, Schlamm-trocknung, ggf. Anammox-Verfahren zur Faulwasserbehandlung, etc.). Dadurch kann der Bedarf an anderweitig produzierter Wärme (z. B. Erdöl, Erdgas, Klärgas) und damit verbundene Umweltauswirkungen reduziert werden.

### Heutige Nutzung und Potenzial (theoretisch)

ENERGIE-  
EFFIZIENZ  
GWh/a



Umsetzungsbeispiele: ARA Meilen (Kompressionswärmenutzung, Schlamm-Schlamm Wärmetauscher, Abwärmenutzung der Klärgasaufbereitung), ARA Uster (Kompressionswärmenutzung, Schlamm-Schlamm Wärmetauscher), ARA Birsfelden (Abwärmenutzung des Prozessluft-Gebläses)

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Entspricht generell dem Stand der Technik (keine technischen Hürden) mit Ausnahme der technisch anspruchsvollen Schlamm-Schlamm-Wärmetauscher (derzeit noch schwierig)



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Bei mittleren und grösseren ARA prinzipiell gegeben, möglicherweise erhöhte Wirtschaftlichkeit auf ARA ohne BHKW (höherer Grenznutzen bei anderen WRG), potenzielle Überschusswärme-Produktion im Sommer



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Geringer Anpassungsbedarf erforderlich, erhöhte Anforderungen an Automatisierung bzw. Mess- und Prozessleittechnik, möglicherweise Anpassung der Faulschlammbehandlung nötig

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Abwärmenutzung aus Faulschlamm mit negativem Einfluss auf (i) Anammox-Verfahren, weil erhöhte Temperaturen für Faulwasserbehandlung nötig, und (ii) Entwässerung des Schlammes (teilweise, divergierende Meinungen).

Schlamm-Schlamm-Wärmetauscher mit entsprechendem Druckverlust kann zum Einsatz von zusätzlichen Druckerhöhungspumpen und damit erhöhtem Stromverbrauch führen.

#### EXTERN

Reduktion des Wärmebedarfs führt über Substitutionseffekte zur Verringerung von Umweltauswirkungen (v. a. Treibhausgasemissionen bei fossiler Wärmeproduktion), aber nur wenn kein Wärmeüberschuss vorliegt.

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	+++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verwendbare Abwärme nutzen; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	+++	Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion und der Abwärmenutzung auf ARA (EnV Anhang 1.5: Heizung des Faulturmes über Abwärme) Art. 17: Zielvereinbarungen bei Grossverbrauchern
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+	Art. 14: Betriebsdaten (u.a. Energieverbrauch) meldepflichtig als Optimierungsgrundlage Neue Vollzugshilfe (Kap. 2.4 Optimierung des Energieverbrauchs und der Energiegewinnung)

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Brennstoffe	+	Anreiz zur Reduktion des Wärmebedarfs durch rationelle Nutzung von Abwärme
-------------------	---	--

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Reduktion des Wärmeenergiebedarf erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	--

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Keine Aussage zur Effizienz möglich; heutiger Verbrauch aus VSA/energieschweiz (2008/2010)

**POTENZIAL** Druckluftherzeugung: Schweizweite Schätzung basierend auf Leistungsaufnahme und Effizienz von Belüftungsaggregaten (EAWAG, 2011; Kind & Levy, 2012), Wärmerückgewinnung Faulschlamm: Wärmeeinsparungen durch Schlamm-Schlamm-Wärmetauscher betragen rund 30 % (gemäss bisherigen Erfahrungen von ARA-Betriebsleitern), Abwärme BHKW: Abwärme BHKW nicht im Potenzial berücksichtigt, da i.d.R. für Schlammwärmerung bereits genutzt.

**WEITERE LITERATUR** Kolisch et al. (2010), FHNW (2014), Levy (2009)

## Teilsynthese Wärmerückgewinnung ARA

Die Wärmerückgewinnung auf der ARA kann durch konsequente Nutzung der anfallenden Abwärme aus dem Faulschlamm, bei Prozessluft-Gebläsen, der Klärgasaufbereitung (verfahrensabhängig) oder dem BHKW gesteigert werden. Dadurch kann der Bedarf an Fremdenergie insbesondere aus fossilen Energieträgern deutlich reduziert werden. Die heutige Nutzung der Abwärme von Prozessluft-Gebläsen für die Gebäudeheizung ist auf Schweizer Kläranlagen bereits verbreitet. Allerdings besteht ein gewisses Potenzial zur Wärmenutzung aus dem Faulschlamm und von der Klärgasaufbereitung. Die ARA Rorguet (Meilen) und Jungholz (Uster) sind zwei Kläranlagen, welche das Wärmerückgewinnungspotenzial praktisch vollständig nutzen und gute Erfahrungen damit machen). Die Abwärme von Belüftungsaggregaten wird auf beiden ARA zur Gebäudeheizung verwendet. Die Abwärmenutzung aus dem Faulschlamm mittels Schlamm-Schlamm-Wärmetauscher ermöglicht es, den Wärmebedarf der Faulung, um rund 30 % zu senken, ohne den Stromverbrauch signifikant zu erhöhen (z. B. durch zusätzliche Pumpen zur Kompensation des Druckverlusts in Wärmetauschern).

Das theoretische Potenzial der Massnahmen zur Wärmerückgewinnung wird schweizweit im Bereich zwischen 25 bis 50 GWh geschätzt. Das offenstehende und realisierbare Potenzial dürfte jedoch wesentlich tiefer liegen, da in den Sommermonaten in der Regel ein Wärmeüberschuss besteht und viele ARA solche Massnahmen bereits umgesetzt haben. Das Potenzial zur Nutzung der Abwärme aus Blockheizkraftwerken (BHKW) wird als sehr gering eingeschätzt und nicht berücksichtigt, da die Abwärme der BHKW auf den meisten ARA bereits für die Frischschlammwärmung und Gebäudeheizung genutzt wird.

Die Technologie (Wärmetauscher) entspricht dem Stand der Technik und ist – mit Ausnahme des zu Verstopfung neigenden Schlamm-Schlamm-Wärmetauschers – problemlos betreibbar. Die Massnahmen zur Wärmerückgewinnung sind ohne grundlegendere Beeinträchtigungen des ARA-Betriebs umsetzbar. Die Wirtschaftlichkeit hängt stark vom saisonalen Wärmebedarf, von den Preisen der Fremdenergiequellen (z. B. Erdgas), von der Verfügbarkeit von Wärme aus BHKW, aber auch vom Anpassungsbedarf (Gebäudetechnik, Einbau Schlamm-Schlamm-Wärmetauscher) für die Wärmenutzung ab. Es bedarf Einzelfallabklärungen, um die Realisierbarkeit und insbesondere die Wirtschaftlichkeit aber auch den Einfluss auf den ARA-Betrieb abschliessend zu beurteilen.

Die Ausschöpfung der Wärmerückgewinnungs-Potenziale

wird stark über die Instrumente der Energie- und CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung gefördert. Hervorzuheben hierbei sind primär die Bescheinigungen für inländische Emissionsvermindierungen von Treibhausgasen (CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung) sowie das Grossverbrauchermodell (Energiegesetzgebung), welches Zielvereinbarungen für die Entwicklung des Energieverbrauchs bei Grossverbrauchern vorgibt. Im Weiteren sind diese Bestrebungen zur Reduktion des Wärmebedarfs auch in der Linie mit den Vorgaben der Gewässerschutzgesetzgebung, welche einen wirtschaftlichen Betrieb von ARA's vorgeben, was durch die Reduktion bei den Brennstoffbeschaffungskosten je nach Umsetzungskosten der Massnahme erreicht werden kann.

Eine konsequente Nutzung der Potenziale zur Wärmerückgewinnung führt zu einer deutlich geringeren Abhängigkeit von Fremdenergiequellen zur Wärmeproduktion und ist ein entscheidender Beitrag zur energieautarken ARA. Die Erfahrungen auf der ARA Rorguet und der ARA Jungholz zeigen, dass das realisierbare Potenzial ausreichend hoch sein kann, um die Kläranlage (mindestens zeitweise) wärmeautark zu betreiben.

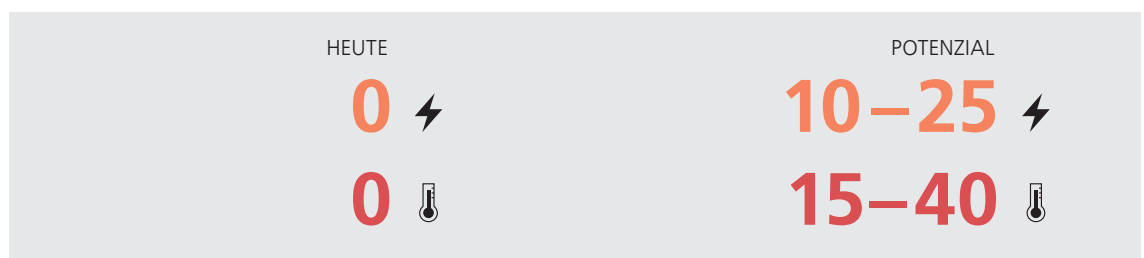


## E 03 Klärschlamm-Desintegration

Biologischer, chemischer oder physikalischer (mechanisch, thermisch) Prozess zum Aufschluss von Klärschlamm vor der anaeroben Behandlung im Faulturm. Die Klärschlamm-Desintegration ersetzt die enzymatisch-biologische Hydrolyse zur Überwindung des reaktionskinetisch limitierenden ersten Schrittes des anaeroben mikrobiellen Abbaus. Dadurch erhöht sich der Grad der Substrat-Bioverfügbarkeit für die verbleibenden Mikroorganismen und führt zu einer Steigerung der Faulgasausbeute und zu einer Reduktion der TR-Fracht.

### Heutige Nutzung und Potenzial

ENERGIE-  
EFFIZIENZ  
GWh/a



Umsetzungsbeispiele: ARA Moossee-Urtenenbach

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Mehr oder weniger marktreife Technologie, in Praxis umgesetzt, jedoch Probleme bei technisch anspruchsvoller Schlamm-Förderung (Entwicklungspotenzial)



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** I.d.R. erhöhter Betriebsaufwand (z. B. Strom-/Wärmeverbrauch), zusätzliche Energieerträge (abhängig von Möglichkeiten der Faulgasnutzung und Energieaufwand der Vorbehandlung), reduzierte Schlammentsorgungskosten, verbesserte Entwässerbarkeit des Schlammes



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Zusätzlicher Prozessschritt in ARA notwendig, erhöhter Betriebsaufwand, relativ geringer Platzbedarf, verbesserte Entwässerbarkeit des Schlammes

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

- Geht in der Regel mit verbesserter Entwässerbarkeit des anfallenden Faulschlammes einher.
- Reduktion der Schlammmenge und entsprechenden Entsorgungskosten um bis zu 15 %.
- Aufgrund der Erhöhung der Ammoniumfracht im Schlammwasser sinnvollerweise mit separater Schlammwasserbehandlung zu verbinden.
- Erhöhter Energiebedarf für Schlamm-Vorbehandlung (abhängig vom Verfahren).
- Mehrnutzen (d. h. Steigerung Faulgasertrag) abhängig von Fauldauer im Faulturm (ab 30 Tagen sehr gering).
- Potenzieller Einfluss auf Kapazität des Gasspeichers und Leistung des BHKW.
- Nutzen abhängig von Möglichkeiten der Faulgasnutzung (BHKW, Biomethan-Aufbereitung).

#### EXTERN

Beitrag zur erneuerbaren Energieproduktion auf ARA, jedoch Reduktion der Energieproduktion in nachgeschalteten Verbrennungsprozessen aufgrund des tieferen Brennwertes (Gesamtbilanz auch unter Berücksichtigung des Energieaufwands der Desintegration erforderlich).



## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	+++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verwendbare Abwärme nutzen; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	+++	Art. 7: Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) als Anreiz zur Steigerung der Stromproduktion (falls BHKW) Art. 7: Verpflichtung von Netzbetreibern zur Abnahme von Strom aus Biomasse Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion Art. 17: Zielvereinbarungen bei Grossverbrauchern
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+	Art. 14: Betriebsdaten (u.a. Energieverbrauch) meldepflichtig als Optimierungsgrundlage

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Netzstrom	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur Stromproduktion im BHKW
Preis Brennstoffe	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur gesteigerten Brennstoff- und Wärmeproduktion

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Reduktion des Wärmeenergiebedarf erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	--

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Ein Umsetzungsbeispiel bekannt (verschwindend klein)

**POTENZIAL** Faulgasenertrag Schweizer ARA-Landschaft in GWh/a (Hunziker, 2005; Gujer, 2007): 400 bis 500 GWh/a, Steigerung Faulgasausbeute (VSA/energie schweiz, 2008/2010): 20 bis 30 %, Energienutzungsgrad BHKW: 35 % elektrisch, 55 % thermisch (Benchmark)

**WEITERE LITERATUR** McCann (2014), Bagnuolo et al. (2009), Wolff et al. (2005), Winter (2003), Levy (2009), Horn et al. (2009), DWA (2015)

## E 04 Vergärung Co-Substrate

Nutzung von offenen Kapazitäten im Faulturm durch Vergärung von Co-Substraten zur Steigerung der Faulgasproduktion und anschliessender energetischer Verwertung (Strom, Wärme bzw. Erdgas) zur Produktion von erneuerbarer Energie. Als Co-Substrate werden insbesondere flüssige, leicht abbaubare organische Abfälle ohne wesentliche Verschmutzungen aus Industrie und Gewerbe bzw. der Landwirtschaft verwendet (z. B. Speiseöl, Milchserum).

### Heutige Nutzung und Potenzial

	HEUTE	POTENZIAL
ENERGIE-PRODUKTION GWh/a	10–25 ⚡ 15–40 🌡️	keine Aussage möglich  nicht bekannt
NÄHRSTOFFE kg/t	– 0.5 P	– 1.4 N

Umsetzungsbeispiele: ARA Bern, ARA Morgental

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Marktreife Technologie, in Praxis umgesetzt, zuverlässiger Betrieb, abhängig von Co-Substrat-Zusammensetzung



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Zusätzliche Energieerträge (auch wegen KEV, allerdings abnehmend), Auslastung von Faulturmkapazitäten, zusätzliche Entsorgungskosten (insbesondere falls ungeeignete Co-Substrat-Zusammensetzung), abhängig von Qualität und geografischer Verfügbarkeit von Co-Substraten



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Zusätzliche Infrastruktur (z.B. Annahmestelle, Störstoffentfernung, Abluftkonzept, Dosiervorrichtung), Mehraufwand im Betrieb (z.B. Regelung Faulungsstabilität, Annahme, Verrechnung, Datenauswertung), abhängig von Co-Substrat-Qualität

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

- Setzt freie Kapazitäten im Faulturm voraus.
- Bei der Verwendung von ungeeigneten Co-Substraten können Mehrkosten für die Schlamm Entsorgung den zusätzlichen Erlös aus der gesteigerten Energieproduktion übersteigen.
- Potenzieller Einfluss auf Kapazität des Gasspeichers und Leistung des BHKW.
- Zweckmässigkeit abhängig von Möglichkeiten der Faulgasnutzung (BHKW, Biomethan-Aufbereitung).

#### EXTERN

- Geografische Abhängigkeit von geeigneten Co-Substratlieferanten.
- Grosse Konkurrenz um qualitativ hochwertige Co-Substrate zwischen ARA und Betreibern anderer Biogasanlagen.
- Zusätzlicher Beitrag zur erneuerbaren Energieproduktion und entsprechende Reduktion von Treibhausgasen durch Substitution nicht erneuerbarer Energie im Energiemix CH (falls Co-Substrate nicht in Biogasanlagen gelangen).
- Erneuerbare Energieproduktion auf Kosten der Nährstoffverwertung (aus gesamtheitlicher Umweltperspektive wenig sinnvoll), da durch KS kontaminierter Gärrest in der Landwirtschaft nicht ausgebracht werden kann (ausser Nährstoffe werden nachgeschaltet aus Klärschlamm zurückgewonnen, vergleiche P01 bis P04).

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verwendbare Abwärme nutzen; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	++	Art. 7: Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) als Anreiz zur Steigerung der Stromproduktion (falls BHKW) Art. 7: Verpflichtung von Netzbetreibern zur Abnahme von Strom aus Biomasse Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion Art. 17: Zielvereinbarungen bei Grossverbrauchern
Mineralölsteuerverordnung (MinöStV)	-	Art. 19: Wegfall des begünstigten Steuersatzes für Biogas aus Rohstoffen ohne Nachweis und Wegfall von KEV-Beiträgen bei Biotreibstoffen ohne Mineralölsteuerleichterung
Revidierte Techn. VO. über Abfälle (TVA)	--	Art. 14: Pflicht zur stofflichen Verwertung von biogenen Abfällen als Dünger
Düngerverordnung (DüV)	--	Allgemeine Regelung für Zulassung und Inverkehrbringung aller Kategorien von Düngemitteln (z.B. Recyclingdünger)
ChemRVV	--	Anhang 2.6 (zu Art. 3): Hohe Qualitätsanforderungen an Düngemittel (Gärrest aus Faultürmen überschreitet tolerierte Schadstoffgehalte von Recyclingdüngern)
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb

### SOZIO-ÖKONOMISCH VERGLEICHE E03 AUF SEITE 25

### WEITERE FAKTOREN

Phosphor-Vorkommen	-	Anliegen natürliche Phosphor-Ressourcen zu schonen und externe Effekte aus Primärherstellung zu vermeiden
Versorgungssicherheit	+ -	Inländische Energieproduktion (Strom, Wärme, Brennstoffe) erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit) Import von zerstörten Nährstoffen weil Gärrest nicht als Dünger verwendet werden darf

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Menge und Nährstoffgehalte der Co-Substrate und daraus resultierende Energieproduktion auf Grundlage von Daten der ARA Region Bern (Bachmann, 2009) und Hochrechnung auf ARA-Landschaft anhand eigener Schätzung (Annahme: ARA > 100 000 EW setzen dies um), Stickstoff- und Phosphor-Verluste pro Tonne vergärter Co-Substraten auf Grundlage von Daten der ARA Region Bern (Bachmann, 2009).

**POTENZIAL** Keine Aussage möglich, da ungenutzte Faulturm-Kapazitäten nicht eruierbar

## E 05 Nachfäulung

Zusätzlicher Fäulungsschritt (nicht durchmischt) für vorgefäulten Schlamm zur anaeroben Nachbehandlung von schwer abbaubaren, organischen Stoffen, die vorgängig nicht vollständig abgebaut wurden. Der Faulschlamm dickt dabei weiter ein und entstehendes Faulwasser gelangt zusammen mit dem Zentrat aus der Schlammmentwässerung in die Nacheindickung. Die Nachfäulung führt zu einer Steigerung des Faulgasertrags und der nachgeschalteten Energieproduktion, zur Minimierung von Methanemissionen aus der Schlammstapelung, sowie zur verbesserten Entwässerbarkeit des Schlammes.

### Heutige Nutzung und Potenzial (theoretisch)

ENERGIE-  
PRODUKTION  
GWh/a



Umsetzungsbeispiele: ARA Werdhölzli, ARA Morgental

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Marktreife Technologie, in Praxis umgesetzt, zuverlässiger Betrieb, Schlamm-Beförderung technisch anspruchsvoll



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Zusätzliche Energieerträge; Investitionskosten in zweiten Faulbehälter; abhängig von ARA-Grösse (ab 100 000 EW)



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Zusätzlicher Platzbedarf für zweiten Faulbehälter; zusätzlicher Betriebs- und Unterhaltsaufwand, Einfluss auf Eindickeigenschaften

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

- Potenzieller Einfluss auf Kapazität des Gasspeichers und Leistung des BHKW.
- Zweckmässigkeit abhängig von Möglichkeiten zur energetischen Nutzung des Faulgases (BHKW, Biomethan-Aufbereitung).

#### EXTERN

- Minimierung von klimawirksamen Emissionen durch Methanschluß aus Schlammstapelung.
- Zusätzlicher Beitrag zur erneuerbaren Energieproduktion und entsprechende Reduktion von Treibhausgasen durch Substitution nicht erneuerbarer Energie im Energiemix CH.

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	+++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verwendbare Abwärme nutzen; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	+++	Art. 7: WeA zur finanziellen Förderung der Stromeffizienz (ProKilowatt) Art. 7: Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) als Anreiz zur Steigerung der Stromproduktion (falls BHKW) Art. 7: Verpflichtung von Netzbetreibern zur Abnahme von Strom aus Biomasse Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion Art. 17: Zielvereinbarungen bei Grossverbrauchern
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+	Art. 14: Betriebsdaten (u.a. Energieverbrauch) meldepflichtig als Optimierungsgrundlage Neue Vollzugshilfe (Kap. 2.4 Optimierung des Energieverbrauchs und der Energiegewinnung)

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Netzstrom	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur Stromproduktion im BHKW
Preis Brennstoffe	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur gesteigerten Brennstoff- und Wärmeproduktion

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Inländische Energieproduktion (Strom, Wärme, Brennstoffe) erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	---

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Eigene Abschätzung auf Grundlage bekannter Umsetzungsbeispiele

**POTENZIAL** Faulgasenertrag Schweizer ARA-Landschaft (Hunziker, 2005; Gujer, 2007):

400 bis 500 GWh/a, Steigerungspotenzial der Faulgasausbeute (Boller, 2014; Kind & Levy, 2012): 5 % bis 10 %, Energienutzungsgrad BHKW: ( $\eta_{\text{elektrisch}}$ : 35 %;  $\eta_{\text{thermisch}}$ : 55 %)

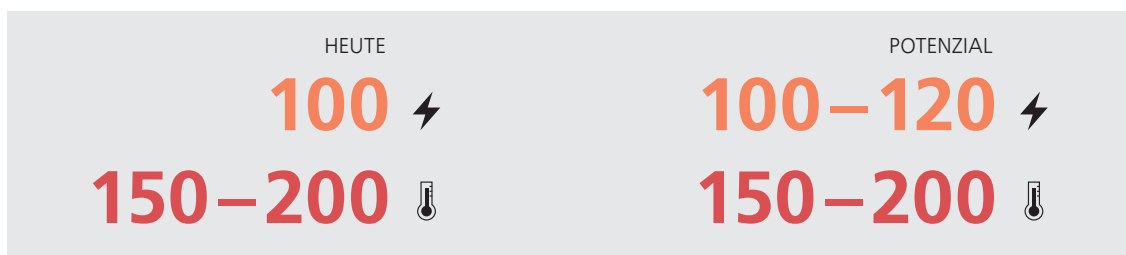
**WEITERE LITERATUR** Levy (2009)

## E 06 Verstromung Faulgas im BHKW

Produktion von Strom und Wärme durch die energetische Verwertung des Faulgases in dem heutigen Stand entsprechenden Blockheizkraftwerk mit einem energetischen Gesamtnutzungsgrad von bis zu 90 % ( $\eta_{\text{elektrisch}}$ : 30 bis 35 %;  $\eta_{\text{thermisch}}$ : 50 bis 55 %). Die energetische Verwertung trägt zur Produktion von erneuerbarer Energie bei, welche soweit möglich zur Deckung des Eigenbedarfs verwendet wird.

### Heutige Nutzung und Potenzial

ENERGIE-  
PRODUKTION  
GWh/a



Umsetzungsbeispiele: Rund 60 % aller ARA in der Schweiz (insbesondere grössere Anlagen)

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Marktreife Technologie, in Praxis breit umgesetzt (> 60 % aller ARA), zuverlässiger Betrieb



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Zusätzliche Energieerträge (auch über KEV, abhängig von Nutzungsmöglichkeiten für Überschusswärme), Investitionskosten BHKW, abhängig von ARA-Grösse (ab 10000 EW)



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Platzbedarf BHKW, erhöhter Betriebs- und Unterhaltsaufwand

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Alternative zur Aufbereitung des Faulgases zu Biomethan (auf grossen ARA auch beide Verfahren gleichzeitig implementierbar, so dass die Faulgas-Verwertung optimal auf den Wärmebedarf abgestimmt werden kann und die Produktion von Überschusswärme minimiert wird).

#### EXTERN

Zusätzlicher Beitrag zur erneuerbaren Energieproduktion und entsprechende Reduktion von Treibhausgasen durch Substitution nicht erneuerbarer Energie im Energiemix CH.

Mögliche Steigerung der Energieproduktion, wenn Faulschlamm kleiner ARA zur Behandlung auf grössere ARA gebracht wird.

Problem des Wärmeüberschusses (gerade im Sommer): Ökonomische und ökologische Sinnhaftigkeit hängt von der Verfügbarkeit eines Fernwärmeverbundes ab. Ebenfalls denkbar wäre eine saisonale Wärmespeicherung (oder alternativ: Umwandlung des Faulgases zu Biomethan > speicherbarer Brennstoff).

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verwendbare Abwärme nutzen; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	++	Art. 7: WeA zur finanziellen Förderung der Stromeffizienz (ProKilowatt) Art. 7: Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) als Anreiz zur Steigerung der Stromproduktion (falls BHKW) Art. 7: Verpflichtung von Netzbetreibern zur Abnahme von Strom aus Biomasse Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion Art. 17: Zielvereinbarungen bei Grossverbrauchern
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Priorität Gewässerschutz (Verschärfungen und höherer Strombedarf absehbar, z.B. Elimination Mikroverunreinigungen) Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+	Art. 14: Betriebsdaten (u.a. Energieverbrauch) meldepflichtig als Optimierungsgrundlage Neue Vollzugshilfe (Kap. 2.4 Optimierung des Energieverbrauchs und der Energiegewinnung)

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Netzstrom	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zu Effizienzsteigerungen (Beschaffungskosten) Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur Stromproduktion im BHKW
Preis Brennstoffe	+	Anreiz zur Reduktion des Wärmebedarfs durch rationelle Nutzung von Abwärme Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur gesteigerten Brennstoff- und Wärmeproduktion

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Inländische Energieproduktion (Strom, Wärme, Brennstoffe) erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	---

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG UND POTENZIAL** Stromproduktion BHKW (EAWAG, 2011; nur Potenzial: Kind & Levy, 2012), Wärmeproduktion BHKW: über Energienutzungsgrade ( $\eta_{\text{elektrisch}}$ : 35 %;  $\eta_{\text{thermisch}}$ : 55 %).

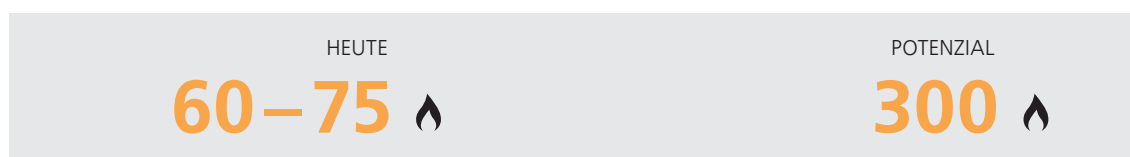
**WEITERE LITERATUR** FHNW (2014), Levy (2009), VSA/energieschweiz (2008/2010)

## E 07 Faulgasaufbereitung zu Erdgas (Biomethan)

Prozess zur Veredelung des produzierten Faulgases zu Biomethan, das heisst Erhöhung des Methangehalts von etwa 60 Volumenprozent auf mindestens 96 Vol.-% in einer Gasaufbereitungsanlage. Die Veredelung basiert auf Trocknung, Entschwefelung und CO<sub>2</sub>-Abtrennung des Faulgases, was mit einem Energieverlust von 5 bis 10 % einhergeht. Das erzeugte Biomethan erfüllt die Anforderungen an die Erdgasqualität und kann daher vielseitig als Brennstoff verwendet werden.

### Heutige Nutzung und Potenzial (theoretisch)

ENERGIE-  
PRODUKTION  
GWh/a



Umsetzungsbeispiele: ARA Bern, ARA Meilen (Aufbereitung durch EWZ), ARA Werdhölzli

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Marktreife Technologie, in Praxis umgesetzt, zuverlässiger Betrieb



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Einnahmen durch Erdgasverkauf. Investitions- und Betriebskosten, Energiebedarf für Aufbereitung, Einzelfallbetrachtung und Vergleich mit BHKW erforderlich (abhängig von ARA-Grösse und Nähe zu Erdgasversorgungsnetz)



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Betrieb durch Externe häufig, ARA-internes Fachwissen zur Gasaufbereitung teilweise nicht vorhanden, Platzbedarf und Wärmeversorgung der Gasaufbereitungsanlage

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Alternative zur energetischen Verwertung im BHKW (bzw. HKW).

#### EXTERN

Zusätzlicher Beitrag zur erneuerbaren Energieproduktion und entsprechende Reduktion von Treibhausgasen durch Substitution nicht erneuerbarer Energie im Energiemix CH (bei ungünstiger Verfahrenswahl ist Methanschluß möglich mit stark negativem Effekt auf Klimaschutz).

Strom und Wärme aus Biogas-Nutzung im BHKW müssten aus anderen Energiequellen mit entsprechenden Umweltauswirkungen produziert werden.

Vermeidung des Problems des Wärmeüberschusses (gerade im Sommer), da Energie gebunden in speicherbarem und vielseitig verwendbarem Brennstoff (Biomethan).

Abhängig von der Vermarktung des Biogas-Zertifikats (je nach dem von Dritten).



## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	+++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verwendbare Abwärme nutzen; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	--	Art. 7: Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) als Anreiz zur Steigerung der Stromproduktion (falls BHKW) Art. 7: Verpflichtung von Netzbetreibern zur Abnahme von Strom aus Biomasse Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion und der Abwärmenutzung auf ARA (EnV Anhang 1.5: Heizung des Faulturmes über Abwärme)
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+	Art. 14: Betriebsdaten (u.a. Energieverbrauch) meldepflichtig als Optimierungsgrundlage Neue Vollzugshilfe (Kap. 2.4 Optimierung des Energieverbrauchs und der Energiegewinnung)

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Netzstrom	-	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur Stromproduktion im BHKW (anstelle von Erdgasaufbereitung)
Preis Brennstoffe	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur gesteigerten Brennstoff- und Wärmeproduktion

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Inländische Energieproduktion (Strom, Wärme, Brennstoffe) erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	---

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Auf Grundlage einer Studie von swisspower (swisspower, 2015)

**POTENZIAL** a) Energieverlust Aufbereitung Faulgas zum Biomethan auf Grundlage ARA Region Luzern (Hunziker, 2005): 7.5 %, Hochrechnung auf die Schweizer ARA-Landschaft über Verhältnis der Faulgaserträge auf ARA Region Luzern und schweizweit (Hunziker, 2005; Gujer, 2007); b) bestehende Potenzialabschätzung (swisspower, 2015)

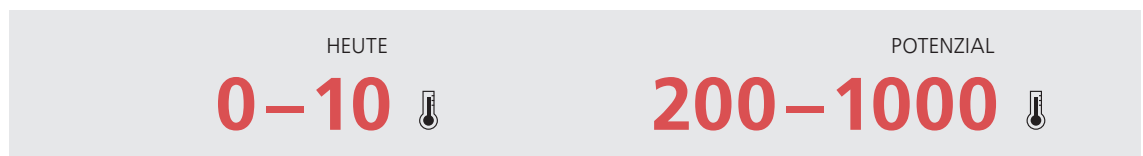
**WEITERE LITERATUR** Swisspower (2015), Levy (2009)

## E 08 Wärmenutzung Zulauf

Produktion von Niedertemperatur-Wärme durch Wärmeentnahme aus dem Zulauf der ARA, respektive aus dem Kanalnetz. Über Wärmetauscher und Fernwärmeverbände kann die Wärme je nach Energienachfrage zum Heizen und Kühlen verwendet werden, wobei dem Abwasser bei letzterem die Wärme nicht entnommen, sondern zugeführt wird.

### Heutige Nutzung und Potenzial

ENERGIE-  
PRODUKTION  
GWh/a



Umsetzungsbeispiele: ARA Murten, ARA Winterthur

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Marktreife Technologie, in Praxis umgesetzt, zuverlässiger Betrieb, wegen Verunreinigungen technisch relativ anspruchsvoll



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Nähe der Energieverbraucher und Wärmedichte entscheidend, Energieerträge (abhängig von Wärmebedarf: > 100 kW), Investitionskosten in Fernwärmeverbund, kombiniertes Wärme- und Kühlungsnetz vorteilhaft, relativ hoher Unterhaltsaufwand (weil ungereinigtes Rohabwasser), abhängig von ARA-Grösse (> 3 000 EW), minimaler Durchfluss von 10 bis 15 l/s, minimaler Rohrdurchmesser von 80 bis 100 cm



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Ausserhalb ARA-Perimeter (kein Einfluss auf ARA-Betrieb), sofern Wärmeentnahme bei tiefer Zulauftemperatur gedrosselt wird)

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Wärmeentzug aus Zulauf ARA mit potenziell negativem Effekt auf die Nitrifikationsleistung und Stickstoffelimination (v.a bei kühlen Gewässern im Winter) und damit potenziell im Konflikt zur Hauptaufgabe der Gewässerreinigung (umgekehrter Effekt bei Wärmeeintrag durch Kühlen; beides abhängig vom Umfang der Temperaturveränderung).

Wärmeentnahme führt zu tendenziell höheren ARA-Ablaufkonzentrationen (umgekehrt bei Wärmeeintrag).

#### EXTERN

Potenzial zur Wärmeentnahme vor allem im Sommer vorhanden, wenn Wärmenachfrage tief.

Wärmeentnahme mit positiven Einfluss auf Gewässer (umgekehrt bei Wärmeeintrag).

Zusätzlicher Beitrag zur erneuerbaren Wärmeproduktion und entsprechende Reduktion von Treibhausgasen durch Substitution nicht erneuerbarer Brennstoffe (z. B. Gas, Heizöl). Allerdings ist der Betrieb von Wärme- und Kühlungsnetzen mit zusätzlichem Stromverbrauch verbunden.

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	+++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verwendbare Abwärme nutzen; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	+	Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+ -	Priorität Gewässerschutz (Wärme für biologische Reinigung erforderlich) Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb Anforderungen an Stickstoff-Elimination aus Abwasser (nicht Ansatz spezifisch; N-Stripping als ein mögliches Verfahren)
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	-	Priorität Gewässerschutz Anhang 2.2: Bestimmungen über Temperaturveränderungen durch Wärmeentzug bzw. -eintrag (max 3°C) und Maximaltemperatur (25°C) Anhang 3: Anforderungen betreffend P-/N-Elimination
Energierichtpläne und kommunale Energiekonzepte	+	Behördenverbindliche Vorgaben zur Nutzung von Abwärme aus Abwasser

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Brennstoffe	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur gesteigerten Wärmeproduktion
Preis Netzstrom	-	Zusatzkosten beim Betrieb der Wärme- bzw. Kühlungsnetze

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Inländische Energieproduktion (Strom, Wärme, Brennstoffe) erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	---

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Abschätzung auf Grundlage von Gesprächen mit ARA-Betreibern (keine Literaturgrundlagen bekannt)

**POTENZIAL** Theoretisches Wärmenutzungspotenzial von 6000 GWh/a bei durchschnittlicher Abkühlung um ca. 8°C (BFE, 2008; VSA/energieschweiz, 2008/2010), Reduktion des Potenzials über Annahme einer Abkühlung von 0,5 bis 1°C wegen potenzieller Beeinträchtigung der ARA-Biologie

**WEITERE LITERATUR** Müller & Dietler (2015), FHWN (2014), AWEL (2010), Kobel (2011), Schmid (2007), Meggers & Leibundgut (2011), Levy (2009)

## E 09 Wärmenutzung Ablauf

Produktion von Niedertemperatur-Wärme durch Wärmeentnahme aus dem Ablauf der ARA. Über Wärmetauscher und Fernwärmeverbände kann die Wärme je nach Energienachfrage zum Heizen und Kühlen verwendet werden, wobei dem Abwasser bei letzterem die Wärme nicht entnommen sondern zugeführt wird. Die Wärmeentnahme bzw. -Zufuhr ist mit Einflüssen auf die Gewässerökologie verbunden (vgl. unten).

### Heutige Nutzung und Potenzial (theoretisch)

ENERGIE-  
PRODUKTION  
GWh/a



Zahlreiche Umsetzungsbeispiele (schweizweit mehrere 100 ARA)

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Marktreife Technologie, in Praxis zahlreich umgesetzt, zuverlässiger Betrieb, technisch problemlos (gereinigtes Abwasser)



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Nähe der Energieverbraucher und Wärmedichte ist entscheidend, Energieerträge (abhängig von Wärmenachfrage), Investitionskosten in Fernwärmeverbund, kombiniertes Wärme- und Kühlungsnetz vorteilhaft, (> 10 000 EW), abhängig von ARA-Grösse, minimaler Durchfluss von 10 bis 15 l/s, minimaler Rohrdurchmesser von 80 bis 100 cm



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Ausserhalb ARA-Perimeter (kein Einfluss auf ARA-Betrieb)

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Beitrag zur Versorgung der ARA mit erneuerbarer Wärmeenergie (z. B. für Schlamm-trocknung, Heizen von Betriebsgebäuden).

#### EXTERN

Stark abhängig von der Nähe der Energieverbraucher (im Vergleich zum ARA-Zulauf häufig relativ grosse Entfernungen; jedoch abnehmend aufgrund Siedlungsentwicklung) und Wärmedichte.

Potenzial zur Wärmeentnahme vor allem im Sommer vorhanden, wenn Wärmenachfrage tief.

Wärmeentnahme mit positiven Einfluss auf Gewässer (umgekehrt bei Wärmeeintrag, was aus ökologischer Sicht keine Option darstellt, da im Sommer bei grossem Kühlungsbedarf die Gewässer nicht noch weiter erwärmt werden sollten).

Die gewässerschutzrechtlichen Anforderungen an die Temperaturänderungen im Vorfluter sind einzuhalten.

Zusätzlicher Beitrag zur erneuerbaren Wärmeproduktion und entsprechende Reduktion von Treibhausgasen durch Substitution nicht erneuerbarer Brennstoffe (z. B. Gas, Heizöl). Allerdings ist der Betrieb von Wärme- und Kühlungsnetzen mit zusätzlichem Stromverbrauch verbunden.

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	++	Art. 7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verwendbare Abwärme nutzen; verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	+	Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	--+	Priorität Gewässerschutz (Wärme für biologische Reinigung erforderlich) Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	-	Priorität Gewässerschutz Anhang 2.2: Bestimmungen über Temperaturveränderungen durch Wärmeentzug bzw. -eintrag (max. 3 °C) und Maximaltemperatur (25°C)
Energierichtpläne und kommunale Energiekonzepte	+	Behördenverbindliche Vorgaben zur Nutzung der Abwärme aus Abwasser

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Brennstoffe	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur gesteigerten Wärmeproduktion
Preis Netzstrom	-	Zusatzkosten beim Betrieb der Wärme- bzw. Kühlungsnetze

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Inländische Energieproduktion (Strom, Wärme, Brennstoffe) erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	---

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Keine verlässliche quantitative Aussage möglich; über hundert Anlagen in der Schweiz)

**POTENZIAL** Wärmenutzungspotenzial von 6000 GWh/a bei durchschnittlicher Abkühlung um ca. 8 °C (BFE, 2008; VSA/energieschweiz, 2008/2010)

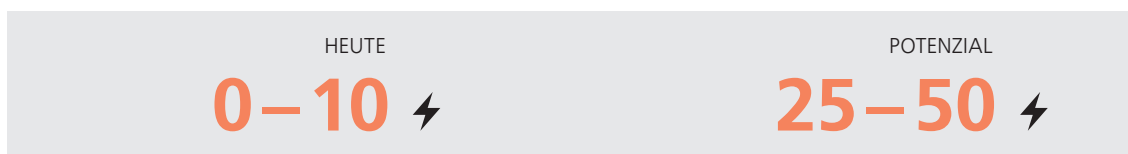
**WEITERE LITERATUR** Müller & Dietler (2015), FHWN (2014), AWEL (2010), Kobel (2011), Schmid (2007), Levy (2009)

## E 10 Kleinwasserkraft Zu- und Ablauf

Nutzung des hydrostatischen Potenzials im Zu- und Ablauf der ARA über eine Abwasser-Turbine zur Stromproduktion. Aufgrund des geringeren Anteils an Verunreinigungen im gereinigten Abwasser ist der Turbinenbetrieb im Ablauf einfacher umzusetzen als im Zulauf.

### Heutige Nutzung und Potenzial

ENERGIE-  
PRODUKTION  
GWh/a



Umsetzungsbeispiele: ARA Hofen, ARA Morgental, ARA Schwyz

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Marktreife Technologie, in Praxis umgesetzt; zuverlässiger Betrieb (im Ablauf einfacher realisierbar als im Rohabwasser-Zulauf), abhängig vom Gefälle (hydrostatisches Potenzial)



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Zusätzliche Energieerträge; Investitions- und Betriebskosten (Turbinen), allenfalls Ausgleichsbecken erforderlich, abhängig von KEV, abhängig von Anlagengrösse bzw. Durchflussmengen (>5000 EW)



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Ausserhalb ARA-Perimeter (kein Einfluss auf ARA-Betrieb, falls kein Ausgleichsbecken wegen Druckschwankungen erforderlich ist)

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Keine

#### EXTERN

Zusätzlicher Beitrag zur erneuerbaren Energieproduktion und entsprechender Reduktion von Treibhausgasen durch Substitution nicht erneuerbarer Energie im Energiemix CH.

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	++	Art.7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	++	Art. 7: Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) als Anreiz zur Steigerung der Stromproduktion Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion
Stromversorgungsgesetz (StromVG)	++	Vergütung zu fixem Preis über 25 Jahre garantiert
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+	Neue Vollzugshilfe (Kap. 2.4 Optimierung des Energieverbrauchs und der Energiegewinnung)

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Netzstrom	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für Stromproduktion
Versorgungssicherheit	+	Inländische Energieproduktion (Strom, Wärme, Brennstoffe) erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Eigene Abschätzung auf Grundlage des ausgewiesenen Potenzials

**POTENZIAL** Aus bestehender Potenzialabschätzung übernommen (Mueller, 2010)

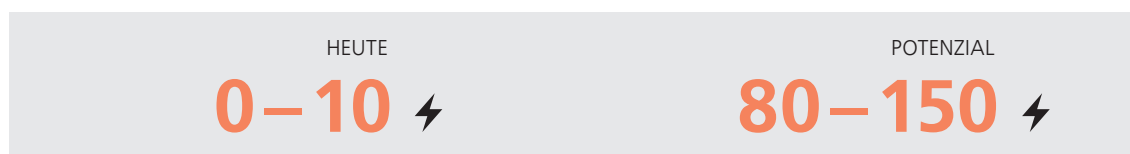
**WEITERE LITERATUR** Schmid (2009), Schmid et al. (2010)

# E 11 Photovoltaik

Produktion von Strom mittels Photovoltaik-Modulen auf verfügbaren Flächen im ARA-Perimeter (z. B. Dachflächen, Klärbecken). Diese Massnahme trägt zur Produktion von erneuerbarer Energie bei, welche soweit möglich zur Deckung des Eigenbedarfs verwendet wird.

## Heutige Nutzung und Potenzial

ENERGIE-  
PRODUKTION  
GWh/a



Diverse Umsetzungsbeispiele schweizweit (z. B. ARA Birs, ARA Ergolz 1, ARA Ergolz 2, ARA Hofen (in Planung), ARA Werdhölzli, ARA Mannenberg)

## Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Zuverlässige, erprobte Technologie, wird auf vielen ARA umgesetzt



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Zusätzliche Erträge aus Stromverkauf bzw. geringere Stromkosten, abhängig von Ausrichtung, jährlichen Sonnenstunden und Einsatz von Trackersystemen (Ertragssteigerung um ca. 40%), sowie KEV oder Einmalvergütung



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Kein bis sehr geringer Einfluss auf ARA-Betrieb; Installation auf bereits vorhandenen, bisher ungenutzten Gebäude- und Arealflächen sowie über Klärbecken

## Zielkonflikte und Abhängigkeiten

### INTERN

Keine

### EXTERN

Zusätzlicher Beitrag zur erneuerbaren Energieproduktion und entsprechender Reduktion von Treibhausgasen durch Substitution nicht erneuerbarer Energie im Energiemix CH.



## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
CO <sub>2</sub> -Gesetz (inkl. CO <sub>2</sub> -Verordnung)	++	Art.7: Bescheinigungen für Emissionsverminderungen im Inland
Energiegesetz (EnG, inkl. EnV)		
> Allgemeine Grundsätze	+	Art. 1: Verstärkte Nutzung von einheimischen und erneuerbaren Energien Art. 3: Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien Art. 6: Bevorzugung wirtschaftlicher und klimaneutraler Energieproduktion
> Diverse Förderinstrumente (KEV, WeA, Grossverbrauchermodell)	++	Art. 7: Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) als Anreiz zur Steigerung der Stromproduktion Art. 13: Unterstützung der erneuerbaren Energieproduktion Art. 17: Zielvereinbarungen bei Grossverbrauchern
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+	Art.14: Betriebsdaten (u.a. Energieverbrauch) meldepflichtig als Optimierungsgrundlage Neue Vollzugshilfe (Kap. 2.4 Optimierung des Energieverbrauchs und der Energiegewinnung)

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Netzstrom	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für Stromproduktion
-----------------	---	---

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Inländische Energieproduktion (Strom, Wärme, Brennstoffe) erhöht Versorgungssicherheit (reduzierte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	---

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Abschätzung auf Grundlage bestehender Projekte (z. B. ARA Werdhölzli: Fläche = 1770 m<sup>2</sup>, Stromproduktion = 0,2 GWh/a; ARA Mannenberg: Fläche = 60 m<sup>2</sup>, Stromproduktion = 0,005 GWh/a)

**POTENZIAL** Extrapolation von Erfahrungswerten aus Umsetzungsbeispielen auf die ARA-Landschaft Schweiz

**WEITERE LITERATUR** Mueller et al. (2013), VSA/energieschweiz (2008/2010)

## Teilsynthese Energieproduktion

Auf der ARA (inklusive Zu- und Ablauf) existieren diverse Verfahren, um Energie in Form von Strom, Wärme aber auch Brennstoffen zu produzieren. Mit Ausnahme der Wärmenutzung und der Stromproduktion im Zu- und Ablauf der ARA und der Herstellung von Solarstrom mittels Photovoltaik stehen diese vorwiegend in Verbindung mit der Nutzung des im Klärschlamm enthaltenen energetischen Potenzials. Einerseits zielen diese Verfahren auf die Steigerung der Faulgasausbeute ab, sei es durch den erhöhten Abbau der organischen Substanz mittels Klärschlamm-Desintegrationsverfahren bzw. einer zweiten Faulungsstufe (Nachfaulung) oder der Annahme von Co-Substraten bei noch offenen Kapazitäten im Faulturm. Andererseits geht es um die verbesserte Nutzung des produzierten Faulgases in effizienten Blockheizkraftwerken zur Strom- und Wärme-Produktion oder durch die Aufbereitung des Faulgases zu Biomethan (Erdgasqualität).

Die energetischen Potenziale sind unter den berücksichtigten Verfahren stark unterschiedlich. Da sich die Technologien teilweise gegenseitig ausschliessen oder bedingen bzw. fördern, entspricht das Gesamtpotenzial nicht der Summe der ausgewiesenen Einzelpotenziale (vgl. Kompatibilitätsmatrix). Die eindeutig grössten Potenziale liegen in der Wärmenutzung aus dem Zu- und Ablauf, wobei das Potenzial beim Ablauf bedeutend grösser ausfällt, weil dort die Wärme ohne Beeinträchtigung der Reinigungsleistung entzogen werden kann. Das wirtschaftlich nutzbare Potenzial aus dem Ablauf fällt jedoch aufgrund verschiedener Aspekte (z. B. Distanz zu Wärmeabnehmer, bestehende Fernwärmenetze, Gas- und Ölpreis, geringe Nachfrage im Sommer) mit 2000 bis rund 3000 GWh bedeutend geringer aus. Zudem sind bei einer intensiven Nutzung die Auswirkungen auf die Gewässerökologie massgeblich zu berücksichtigen. Weitere wesentliche Potenziale sind mit der gesteigerten Nutzung des Faulgases verbunden. Eine konsequente Verstromung in einem effizienten BHKW birgt ein erschliessbares Potenzial von rund 100 GWh Strom bzw. bis 200 GWh Wärme. Letztere ist allerdings aufgrund des limitierten Wärmebedarfs der ARA (gerade in den Sommermonaten) nicht in allen Fällen unbeschränkt nutzbar (Wärmeüberschuss). Eine Alternative ist die Aufbereitung des Faulgases zu Biomethan (Erdgasqualität), die bis heute nur wenig verbreitet ist (v.a. grossen ARA ab ca. 100 000 EW). Dadurch kann das Problem des Wärmeüberschusses vermieden werden, weil die im Faulgas enthaltene Energie in einen speicherbaren und damit vielseitig einsetzbaren Brennstoff umgewandelt wird. Das hier ausgewiesene Potenzial von 300 GWh ist jedoch geringer, weil ja bereits ein bedeutender Anteil des Faulgases in BHKW energetisch verwertet wird. Wie das Beispiel der ARA Bern zeigt, ist eine Kombination dieser beiden Verwertungsverfahren empfehlenswert, weil die Form

der produzierten Energie so besser auf die ARA-bezogene Nachfrage abgestimmt werden kann. Die Steigerung der Faulgasausbeute über Desintegrationsverfahren und Nachfaulung mit anschliessende energetischer Verwertung im BHKW wie auch die Stromproduktion in Abwasserkanälen (Kleinwasserkraft) und über Photovoltaik auf ARA bergen ein vergleichsweise geringes Energiepotenzial. Das Potenzial der Co-Substratvergärung ist vermutlich bedeutend, aber im Rahmen der Studie nicht quantifizierbar. Aus einer gesamtökologischen Perspektive ist die Co-Vergärung nur dann sinnvoll, wenn die Nährstoffe später aus dem Schlamm zurückgewonnen werden (vgl. P01 bis P04) und die Co-Substrate ansonsten nicht einer landwirtschaftlichen oder gewerblichen Biogasanlage mit der Möglichkeit der Nährstoffverwertung (Verwendung des nährstoffhaltigen Gärrests) zugeführt würden. Ansonsten würde durch die Vermischung der Co-Substrate mit dem stark verschmutzten Klärschlamm eine Verwertung der Nährstoffe verunmöglicht. Demgegenüber bieten die ARA den Vorteil eines sicheren Entsorgungswegs mit Nutzung des Energieinhalts für Grossmengen an organischen Abfällen.

Die betrachteten Möglichkeiten zur Steigerung der Energieproduktion auf ARA beruhen weitgehend auf marktreifen und bewährten Technologien und sind technisch gut realisierbar. Einschränkungen gehen auf die anspruchsvolle Schlammförderung (KS-Desintegration) sowie die Verschmutzung im Rohabwasser (Wärmenutzung Zulauf) zurück. Alle Verfahren werden aber in der Praxis bereits eingesetzt und betrieben. Keines der Potenziale ist uneingeschränkt wirtschaftlich, wobei es bedeutende Unterschiede zwischen den verschiedenen Ansätzen gibt. Entscheidend sind neben der ARA-Grösse die zusätzlichen Energieerträge, die erforderlichen infrastrukturellen Anpassungen (z. B. Investition in zweiten Faulbehälter, Fernwärmenetz) sowie die veränderten Betriebskosten, die sich beispielsweise durch veränderte Schlammbehandlungskosten, aber auch Unterhaltsaufwände ergeben. Auch bei den Auswirkungen auf den ARA-Betrieb, die durch eine Umsetzung der Potenziale zur Energieproduktion verbunden sind, sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Ansätzen erkennbar. Während für die Verfahren, welche ausserhalb des ARA-Perimeters im Zu- bzw. Ablauf ansetzen, keine bis geringe Anpassungen im ARA-Betrieb erforderlich sind, gehen andere mit mehr oder weniger umfangreichen infrastrukturellen Anpassungen einher (z.B. Nachfaulung, Desintegration). Grundsätzlich lassen sich jedoch alle Verfahren mit verhältnismässigen Betriebsanpassungen realisieren, wobei die Grösse der ARA entscheidenden Einfluss darauf hat. Auch hier sind für die Realisierung der Potenziale deshalb detaillierte Einzelfallbetrachtungen erforderlich, welche die spezifischen Verhältnisse und Möglichkeiten der jeweiligen ARA berücksichtigen.

Die Ausschöpfung der Potenziale zur Energieproduktion auf ARA wird hauptsächlich über die Energie- und CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung stark gefördert. Die darin enthaltenen Regelungen beschreiben die Grundsätze und eine Reihe von finanziellen Förderinstrumenten, welche auf die Produktion von erneuerbarem Strom und Wärme abzielen. Besonders hervorzuheben sind hier die Bescheinigungen für inländische Emissionsvermindernungen von Treibhausgasen (CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung) sowie die kostendeckende Einspeisevergütung, welche den Produzenten von erneuerbarem Strom einen auf die Produktionskosten abgestimmten Preis garantiert. Die Möglichkeiten zum Einsparen von Brennstoff- bzw. Strombeschaffungskosten haben ebenfalls fördernden Einfluss auf die Umsetzung, da sie die Wirtschaftlichkeit eines Energieproduktionsansatzes positiv beeinflussen.

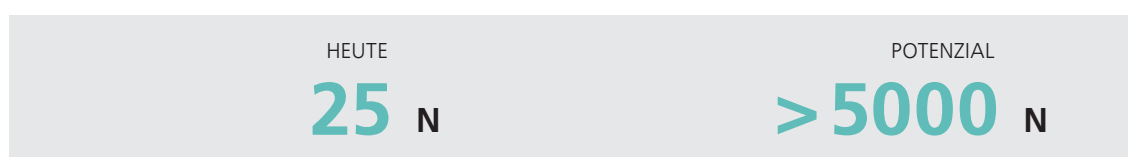
Aus Sicht der Ressourceneffizienz in der Schweiz birgt die Schweizer ARA-Landschaft ein bedeutendes Potenzial zur Steigerung der erneuerbaren Energieproduktion. Das grob abgeschätzte Potenzial liegt klar über dem Eigenverbrauch der Abwasserreinigung, so dass die Schweizer ARA-Landschaft einen Beitrag zur Versorgung der Schweiz mit erneuerbarer Energie leisten kann. Allerdings ist dieser Beitrag mit jährlich einigen tausend GWh im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch der Schweiz von ca. 250 000 GWh zu relativieren.

# N 01 N-Stripping

Verfahren zur Behandlung der ammoniumstickstoffhaltigen Rückläufe. Der im Faulwasser enthaltene Stickstoff wird als Ammoniak ausgetrieben und mit Schwefelsäure gebunden. Der gewonnene Stickstoff kann in der Landwirtschaft als flüssiger Ammoniumsulfat-Dünger verwendet werden.

## Heutige Nutzung und Potenzial

NÄHRSTOFF-  
RÜCKGEWINNUNG  
ARA  
t/a



Umsetzungsbeispiele: ARA Kloten/Opfikon und einige Anlagen in Deutschland und Österreich

## Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Gut erforscht. Vereinzelt existieren in Europa grosstechnische Anlagen; Marktreifes Verfahren, (weitere Optimierungen bei Energiebedarf möglich); Erfordert separate Faulwasserbehandlung, d.h. abhängig von ARA-Grösse (> 50 000 EW)



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Im Vergleich zu anderen Verfahren zur N-Elimination nicht wirtschaftlich, Produkterträge (allerdings relativ gering aufgrund tiefer Düngemittelpreise), Strombedarf, hohe spezifische Investitionskosten pro kg N (im Vergleich zu Haber-Bosch-Verfahren), abhängig von ARA-Grösse



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Erhöhter Betriebsaufwand, übrige ARA-Prozesse (Abwasserbehandlung und Schlammbehandlung) nicht betroffen, abhängig von ARA-Grösse

## Zielkonflikte und Abhängigkeiten

### INTERN

Separate Faulwasserbehandlung entlastet die biologische Reinigungsstufe (freiwerdende Behandlungskapazität, reduzierter Strombedarf der Belüftung).

Wirtschaftlichkeit der separaten Faulwasserbehandlung ist deutlich höher, wenn dadurch ein Ausbau der biologischen Reinigungsstufe vermieden werden kann.

### EXTERN

Umsetzung ist in der Gesamtperspektive zu beurteilen: Energieaufwand auf ARA im Verhältnis zur industriellen N-Düngerherstellung unter Berücksichtigung des Verbrauchs an Rohstoffen (Schwefelsäure, Natronlauge).

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
Düngerverordnung (DüV)	+	Allgemeine Regelung für Zulassung und Inverkehrbringung aller Kategorien von Düngemitteln (z.B. Recyclingdünger)
ChemRVV	+++	Art. 3 (Anhang 2.6): Qualitätsanforderungen an u.a. Recyclingdünger (z.B. Recyclingdünger aus Faulwasser)
Gewässerschutzgesetz (GSchG)	+	Priorität Gewässerschutz Art. 10: Vorgabe für wirtschaftlichen ARA-Betrieb Anforderungen an Stickstoff-Elimination aus Abwasser (nicht Ansatz spezifisch; N-Stripping als ein mögliches Verfahren)
Gewässerschutzverordnung (GSchV)	+	Priorität Gewässerschutz A3: Anforderungen betreffend Stickstoff-Elimination

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Netzstrom	+	Betriebswirtschaftlicher Anreiz für ARA-Betreiber zur Senkung des Stromverbrauchs (Beschaffungskosten)
Preis Mineraldünger	--	Konkurrenz zu Recycling-Düngern aus der Behandlung von Rückläufen

### WEITERE FAKTOREN

Versorgungssicherheit	+	Import von zerstörten Nährstoffen wegen nicht stattfindender Rückgewinnung aus Abfällen notwendig (erhöhte Auslandabhängigkeit)
-----------------------	---	---

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** gemäss Angaben ARA Kloten/Opfikon

**POTENZIAL** Stickstoffgehalt in Faulwasser auf ARA  $\geq 50\,000$  EW: ca. 20 % der Stickstofffracht im Zulauf (Strahl et al., 2013; Siegrist et al., 2009), Rückgewinnungseffizienz N-Stripping gemäss ARA Kloten/Opfikon: 90 %

**WEITERE LITERATUR** FHNW (2014), BAFU (2014), Siegrist et al. (2009)

## Teilsynthese Stickstoff

In der Schweiz gelangen jährlich rund 40 000 Tonnen Stickstoff über das Abwasser in Schweizer Kläranlagen. Davon werden rund 18 000 Tonnen aus dem Abwasser eliminiert und gelangen in die Atmosphäre oder über die Klärschlammmentsorgung in die Verbrennung. Allerdings weist lediglich das Faulwasser aus der Schlammbehandlung ausreichend hohe Stickstoffkonzentrationen für die Rückgewinnung auf. Der Stickstoffgehalt im Faulwasser entspricht rund 15 % bis 20 % des Rohwassereintrags in die Kläranlage.

Es gibt mehrere Methoden zur Stickstoff-Rückgewinnung, von welchen jedoch lediglich die N-Strippung bereits grosstechnisch auf einigen grösseren Kläranlagen im deutschen Sprachraum im Einsatz ist. Die heutige Nutzung in der Schweiz beschränkt sich auf die ARA Kloten/Opfikon (72 000 EW), auf welcher seit März 2010 das Verfahren zur N-Strippung aus Faulwasser in Betrieb ist. Das theoretische Potenzial der N-Strippung wird auf über 5000 t N/a geschätzt, was bezogen auf den Stickstoffgehalt im Rohwasser einem Anteil von über 12 % entspricht. Insgesamt dürfte das realisierbare Potenzial auf ARA in der Grössenklasse  $\geq 50\,000$  EW ca. 2000 bis 3000 t N/a betragen. Auf kleineren Anlagen ist der Einsatz der N-Strippung aus betrieblichen und aus Kostengründen nicht realistisch.

Technisch ist die N-Strippung realisierbar, da das Verfahren bereits gut erforscht ist und bereits grosstechnisch auf der ARA Kloten/Opfikon und auf wenigen Kläranlagen in Deutschland und Österreich in Betrieb ist. Die Wirtschaftlichkeit der N-Strippung ist stark abhängig von den Düngemittelpreisen und dem Strompreis. Zur Elimination von Stickstoff aus Faulwasser ist die N-Strippung im Vergleich zu Anammox-Verfahren zu heutigen Düngemittelpreisen nicht wirtschaftlich, da das Anammox-Verfahren den geringeren spezifischen Strombedarf (kWh/kg N/a) aufweist. Zur Produktion von Stickstoffdünger ist die N-Strippung nicht wirtschaftlich im Vergleich zu konventioneller Düngemittelherstellung mittels Haber-Bosch-Verfahren, da beide Verfahren einen ähnlichen Strombedarf aufweisen, aber die N-Strippung höhere spezifische Investitionskosten erfordert. Aus Sicht der ressourceneffizienten ARA ist jedoch die Realisierbarkeit der N-Strippung im Vergleich zum Anammox-Verfahren massgebend. Der ARA-Betrieb ist durch die Faulwasseraufbereitung weder in der Abwasserbehandlung noch in der Schlammbehandlung beeinträchtigt. Allerdings schafft die N-Strippung einen höheren Aufwand für das Betriebspersonal und ist deshalb vorwiegend auf grossen Kläranlagen betrieblich realisierbar. Verbindliche regulatorische Verpflichtungen sowie Förderprogramme für die Implementierung der N-Strippung auf ARA sind nicht vorhanden, stehen dieser aber auch

nicht im Weg (GSchG, GSchV, DüV, ChemRRV). Die Ausschöpfung dieses beträchtlichen Ressourcenpotenzials scheidet momentan an tieferen Kosten anderer Verfahren zur Elimination von Stickstoff auf ARAs sowie den vergleichsweise niedrigen Preisen für N-Mineraldünger, welche über das zurückgewonnene Ammoniumsulfat und dessen Verwertung in der Landwirtschaft eingespart würden.

Weitere Verfahren zur Rückgewinnung von Stickstoff aus Faulwasser sind beispielsweise Membranverfahren oder die Struvit-Fällung. Das Potenzial zur Rückgewinnung mittels Membranverfahren wird ähnlich hoch geschätzt wie bei der N-Strippung. Allerdings befindet sich das Verfahren noch im Forschungsstadium, mit einer ersten grosstechnischen Versuchsanlage auf der ARA Altrhein (90 000 EW) in Planung. Das Verfahren zur Struvit-Fällung wird im Faktenblatt P01 (Phosphor) beschrieben. Das Verfahren ist nicht geeignet für die Stickstoffrückgewinnung, da Stickstoff und Phosphor im Struvit im Verhältnis 1:1 vorliegen, im Faulwasser jedoch deutlich mehr Stickstoff als Phosphor enthalten ist. Dem Faulwasser müsste somit viel Phosphor hinzugefügt werden, um mittels Struvit-Fällung einen hohen Anteil an Stickstoff rückzugewinnen zu können.



# P01 Nasschemische Phosphor-Rückgewinnung aus Faulwasser

Phosphor wird durch Zugabe von Magnesium und pH-Anhebung als Struvit (Magnesium-Ammonium-Phosphat) aus dem Faulwasser (Filtrat nach Entwässerung) auskristallisiert. Dies ermöglicht die Rückgewinnung von Phosphor und Stickstoff für die Verwendung als Recyclingdünger in der Landwirtschaft bzw. als Ausgangsmaterial für die Düngemittelherstellung. Die derartige nasschemische Rückgewinnung von Phosphor auf der ARA setzt eine biologische Phosphorelimination mit entsprechend hohem P-Transfer vom Abwasser in den Belebtschlamm voraus. Der Rückgewinnungsgrad ist aber auch dann aufgrund der relativ geringen Phosphor-Konzentration im Faulschlamm auf maximal 35 % (bezogen auf Rohabwasser) limitiert.

## Heutige Nutzung und Potenzial

NÄHRSTOFFRÜCK-  
GEWINNUNG ARA  
t/a

	HEUTE	POTENZIAL
P	0	500–2500
N	0	225–1200

Umsetzungsbeispiele: In CH keine bekannt; mehrere grosstechnische Anlagen im Ausland in Betrieb

## Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Stand der Technik (mehrere Grossanlagen in EU), relativ komplexe Verfahrensführung, biologische Phosphorelimination mit erhöhtem P-Transfer in KS als Voraussetzung



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** ARA mit Bio-P: Reduzierte Betriebskosten (weniger Verstopfungen durch spontan gebildetes Struvit und bessere Entwässerbarkeit des Faulschlammes, keine Chemikalien zur P-Fällung), Erträge Phosphor-Produkt (jedoch vergleichsweise klein aufgrund P-Rückgewinnung von max. vno max. 35 %, je nach Verfahrensführung), relativ komplexe Verfahrensführung und hohe Prozessinvestitionen; ARA ohne Bio-P: nicht wirtschaftlich aufgrund hoher Prozessinvestitionen und sehr geringen Produkt-Erträgen (P-Rückgewinnung von ca. 10 %)



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** ARA mit Bio-P: zusätzliche Infrastruktur für Struvit-Fällung erforderlich, potenzielle Betriebsprobleme mit Bio-P (z. B. Schaumbildung, Eliminationsleistung bei Spitzenbelastungen, falls keine chemische P-Elimination als 2. Standbein); ARA ohne Bio-P (zusätzlich zu vorherigen Aspekten): umfangreiche Anpassung der ARA von chemischer auf biologische P-Elimination

## Zielkonflikte und Abhängigkeiten

### INTERN

Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist biologische Phosphor-Elimination mit entsprechend hohem Transfer des Phosphors in den Klärschlamm. (laut FHNW sind weniger als 5 ARA > 50 000 EW mit Bio-P ausgestattet).

Alternative zu:

- nasschemischen Rückgewinnung aus Faulschlamm.
- Klärschlamm-Monoverbrennung und anschliessender P-Extraktion aus Asche (nass- oder thermochemisch).



**EXTERN**

Potenzielle Probleme mit Eliminationsleistung von Bio-P bei Spitzenbelastungen, falls keine chemische P-Fällung als zweites Standbein vorhanden ist (was aber i.d.R. vorhanden ist).

Verfügbarkeit des entwässerten Faulschlamm als Ersatzbrennstoff für Zementindustrie nicht beeinträchtigt (keine Monoverbrennung vorgängig zur P-Extraktion erforderlich) mit entsprechenden Einsparungen von Treibhausgasemissionen durch Substitution fossiler Brennstoffe (häufig Braunkohle) in Zementwerken.

Wirtschaftlichkeit stark abhängig von Chemikalienpreisen und Preisentwicklung auf Mineraldüngermarkt.

Wirkung der Rahmenbedingungen

**REGULATORISCH**

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
Revidierte Technische Verordnung über Abfälle (TVA, ab 2016)	++	Art.15: Pflicht zur Phosphor-Rückgewinnung nach dem Stand der Technik (mit Übergangsfrist)
Düngerverordnung (DüV)	+	Allgemeine Regelung für Zulassung und Inverkehrbringung aller Kategorien von Düngemitteln (z.B. Recyclingdünger)
ChemRRV	++	Anhang 2.6 (zu Art. 3): Qualitätsanforderungen an Düngemittel (u.a. Recyclingdünger aus Klärschlamm-Verwertung)
	+	Verbot der Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft

**SOZIO-ÖKONOMISCH**

Preis Mineraldünger	--	Konkurrenz zu Recycling-Düngern aus der stofflichen Klärschlamm-Verwertung
Akzeptanz Recyclingdünger	-	Skepsis bezogen auf Schadstoff-Gehalt und Pflanzenverfügbarkeit Entspricht nicht den bisherigen Gewohnheiten von Landwirten

**WEITERE FAKTOREN**

Schonung Phosphor-Vorkommen	+	Endliche Ressource, deren Abbau mit bedeutender Beeinträchtigung von Umwelt und Gesellschaft zusammenhängt
Versorgungssicherheit	+	Import von Nährstoffen wegen nicht stattfindender Rückgewinnung aus Abfällen notwendig (erhöhte Auslandsabhängigkeit: geopolitisch instabil)

Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Keine Nutzung in der Schweiz bekannt.

**POTENZIAL** Jährliche Phosphorfracht im Rohabwasser auf Grundlage von ARA-größenabhängigen Phosphorkonzentration im Zulauf und entsprechenden Rohabwasser-Mengen (VSA, 2011): 6500 t P/a, Transfer des Phosphors im Rohabwasser ins Faulwasser (Pinnekamp, 2013; AWEL, 2009; validiert durch Hermann, 2014): 10 % (ohne Bio-P) bis 40 % (mit Bio-P), Maximaler Rückgewinnungsgrad von Phosphor aus Faulwasser (AWEL, 2009; Hermann, 2014): 95 %, Resultierender Rückgewinnungsgrad bezogen auf Rohabwasser-Fracht (bestätigt durch Hermann, 2009): < 10 % bis max. 35 % (je nach Verfahrensführung)

**WEITERE LITERATUR** Hermann (2009), Roskosch et al. (2014), Gaschen und Liechti (2010), TBF + Partner AG (2015)

## P02 Nasschemische Phosphor-Rückgewinnung aus Faulschlamm

Phosphor wird durch Säure-Aufschluss aus dem Faulschlamm herausgelöst, der Faulschlamm anschliessend entwässert und der Phosphor schliesslich aus dem Filtrat ausgefällt (z. B. als Struvit). Dies ermöglicht die Rückgewinnung von Phosphor und Stickstoff für die Verwendung als Düngemittel in der Landwirtschaft oder als Ausgangsmaterial für die Düngemittelherstellung. Die derartige nasschemische Rückgewinnung von Phosphor auf der ARA erfordert grosse Mengen an Chemikalien (z. B. Schwefelsäure). Der Rückgewinnungsgrad (bezogen auf Rohabwasser) hängt stark vom Säureeinsatz (38 % des Phosphats im Faulschlamm bei pH 4.8 bzw. 62 % bei pH 2.9) und je nach Verfahren von Druck und Temperatur ab.

### Heutige Nutzung und Potenzial

NÄHRSTOFFRÜCK-  
GEWINNUNG ARA  
t/a

	HEUTE	POTENZIAL
P	0	2500–4500
N	0	1100–2000

Umsetzungsbeispiele: In CH keine bekannt; Versuchsanlagen im Ausland in Betrieb

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Verschiedene Verfahren in Entwicklung, Pilotanlage (Stuttgarter Verfahren) auf ARA Offenburg in Betrieb, komplexe, mehrstufige Verfahrensführung



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Erträge Phosphor-Produkt, komplexe und aufwändige Verfahrensführung, hohe Investitionskosten in komplexes, mehrstufiges Verfahren, hohe Betriebskosten (kostenintensive Komplexierung mit Zitronensäure, hoher Säure- und Laugenbedarf wegen starker Ansäuerung für Hydrolyse), vergleichsweise bescheidene Produktausbeute von max. 35 % des P im Rohabwasser (mit verhältnismässigem und daher wirtschaftlich tragbarem Chemikalienaufwand), keine Investition in Verbrennungsanlage für P-Rückgewinnung erforderlich



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Umfangreiche Infrastrukturanpassungen für Hydrolyse, Komplexierung und Fällung erforderlich, grosser Platzbedarf, aufwändige Prozessführung, Anforderungen an Qualifikation des Betriebspersonals, kompatibel mit chemisch-physikalischer P-Fällung (in CH mit wenigen Ausnahmen umgesetzt), Entwässerung mit geeignetem Polymer vergleichbar wie bei unbehandeltem Schlamm

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Alternative zur:

- Nasschemischen Phosphor-Rückgewinnung aus Faulwasser.
- Klärschlamm-Monoverbrennung und anschliessender P-Extraktion aus Asche (nass- oder thermochemisch).

**EXTERN**

Verfügbarkeit des entwässerten Faulschlamm als Ersatzbrennstoff für Zementindustrie nicht beeinträchtigt (keine Monoverbrennung vorgängig zur P-Extraktion erforderlich) mit entsprechenden Einsparungen von Treibhausgasemissionen durch Substitution fossiler Brennstoffe (häufig Braunkohle) in Zementwerken.

Wirtschaftlichkeit ist stark abhängig von Preisen für die Chemikalien und Preisentwicklung auf Mineraldüngermarkt.

Wirkung der Rahmenbedingungen

**REGULATORISCH**

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
Revidierte Technische Verordnung über Abfälle (TVA, ab 2016)	++	Art.15: Pflicht zur Phosphor-Rückgewinnung nach dem Stand der Technik (mit Übergangsfrist)
Düngerverordnung (DüV)	+	Allgemeine Regelung für Zulassung und Inverkehrbringung aller Kategorien von Düngemitteln (z.B. Recyclingdünger)
ChemRRV	++	Anhang 2.6 (zu Art. 3): Qualitätsanforderungen an Düngemittel (u.a. Recyclingdünger aus Klärschlamm-Verwertung)
	+	Verbot der Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft

**SOZIO-ÖKONOMISCH**

Preis Mineraldünger	--	Konkurrenz zu Recycling-Düngern aus der stofflichen Klärschlamm-Verwertung
Akzeptanz Recyclingdünger	-	Skepsis bezogen auf Schadstoff-Gehalt und Pflanzenverfügbarkeit Entspricht nicht den bisherigen Gewohnheiten von Landwirten

**WEITERE FAKTOREN**

Schonung Phosphor-Vorkommen	+	Endliche Ressource, deren Abbau mit bedeutender Beeinträchtigung von Umwelt und Gesellschaft zusammenhängt
Versorgungssicherheit	+	Import von Nährstoffen wegen nicht stattfindender Rückgewinnung aus Abfällen notwendig (erhöhte Auslandsabhängigkeit: geopolitisch instabil)

Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Keine Nutzung in der Schweiz bekannt.

**POTENZIAL** Jährliche Phosphorfracht im Rohabwasser auf Grundlage von ARA-größenabhängigen Phosphorkonzentration im Zulauf und entsprechenden Rohabwasser-Mengen (VSA, 2011): 6500 t P/a, Transfer des Phosphors im Rohabwasser in Faulschlamm (Pinnekamp, 2013; AWEL, 2009; validiert durch Ludwig Hermann, 2014): bis 90 %, Maximaler Rückgewinnungsgrad von Phosphor aus Faulwasser (AWEL, 2009; Ludwig Hermann, 2014): > 60 %, Resultierender Rückgewinnungsgrad bezogen auf Rohabwasser-Fracht (bestätigt durch Hermann, 2009): max. 55 %.

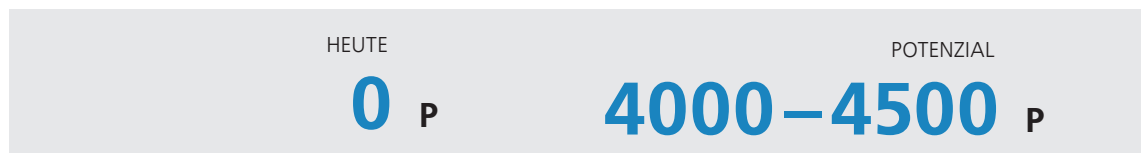
**WEITERE LITERATUR** Hermann (2009), Roskosch et al. (2014), FHNW (2014), Maier & Steinmetz (2014), TBF + Partner AG (2015)

## P03 Nasschemische Phosphor-Rückgewinnung aus Asche der KS-Monoverbrennung

Phosphor wird im Anschluss an eine KS-Monoverbrennung durch Säure-Aufschluss aus der KS-Asche herausgelöst und anschliessend aus der entstandenen P-reichen Fraktion nach Schwermetallseparation durch Fällung extrahiert. Das Verfahren ermöglicht die Rückgewinnung von Phosphor für die Verwendung als Düngemittel in der Landwirtschaft oder als Ausgangsmaterial für die Düngemittelherstellung. Mit einem Rückgewinnungsgrad von maximal 70 % des P im Rohabwasser wird ein relativ hoher Rückgewinnungsgrad erreicht.

### Heutige Nutzung und Potenzial

NÄHRSTOFF-  
RÜCKGEWINNUNG  
ABFALLWIRTSCHAFT  
t/a



Umsetzungsbeispiele: Keine bekannt

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Verfahrensprinzip bekannt und in grosstechnischem Pilotversuch auf KVA Bern getestet (allerdings nur über 2 bis 3 Monate), noch in Weiterentwicklung



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Relativ hohe Produktausbeute von bis zu 70 % des P im Rohabwasser, flexibles Produkt (variierbarer  $P_2O_5$ -Gehalt bis 40 %) mit Einfluss auf Produkterträge, relativ hoher Säurebedarf und aufwändige Schwermetallabtrennung, hohe Investitionskosten, hohe Entsorgungskosten für grosse Rückstandsmengen von 1,4 kg pro t Asche (insbesondere KSA-Filterkuchen); Verbesserungen werden geprüft



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Ausserhalb ARA-Perimeter, andere Klärschlammabnehmer, unabhängig von Art der Phosphor-Elimination auf ARA

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Alternative zur:

- Nasschemischen Extraktion aus Faulwasser und Faulschlamm.
- Thermochemischen Extraktion aus KS-Asche.

Kurzfristige Implementierung möglich, falls mit P-Rückgewinnung kein Gewinn erzielt werden muss.

#### EXTERN

Wirtschaftlichkeit ist abhängig von Preisentwicklung auf dem Mineraldüngermarkt und der erzielten Qualität des zurückgewonnenen Produkts.

Umsetzung ist nicht im Interesse der Zementindustrie, da alternative Brennstoffbeschaffung (in der Regel Braunkohle) mit Mehrkosten und zusätzlichen Treibhausgasemissionen verbunden sind (Klärschlammvergasung im Zementwerk würde kombinierte Nutzung ermöglichen).

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
Umweltschutzgesetz (USG)	+	Art. 30: Förderung d. Entwicklung neuer Umwelttechnologien
Revidierte Technische Verordnung über Abfälle (TVA, ab 2016)	++	Art. 15: Pflicht zur Phosphor-Rückgewinnung nach dem Stand der Technik (mit Übergangsfrist)
Düngerverordnung (DüV)	+	Allgemeine Regelung für Zulassung und Inverkehrbringung aller Kategorien von Düngemitteln (z.B. Recyclingdünger)
ChemRRV	--	Anhang 2.6 (zu Art. 3): Qualitätsanforderungen an Düngemittel (u.a. Recyclingdünger aus Klärschlamm-Verwertung)
	+	Verbot der Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Mineraldünger	--	Konkurrenz zu Recycling-Düngern aus der stofflichen Klärschlamm-Verwertung
Akzeptanz Recyclingdünger	-	Skepsis bezogen auf Schadstoff-Gehalt und Pflanzen-verfügbarkeit entspricht nicht den bisherigen Gewohnheiten von Landwirten
Interessen Zementindustrie	--	Klärschlamm als wirtschaftlich hoch interessanter Ersatzbrennstoff

### WEITERE FAKTOREN

Schonung Phosphor-Vorkommen	+	Endliche Ressource, deren Abbau mit bedeutender Beeinträchtigung von Umwelt und Gesellschaft zusammenhängt
Versorgungssicherheit	+	Import von Nährstoffen wegen nicht stattfindender Rückgewinnung aus Abfällen notwendig (erhöhte Auslandsabhängigkeit: geopolitisch instabil)

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Keine Nutzung in der Schweiz bekannt, grosstechnischer Pilotversuch auf KVA Bern über 2 bis 3 Monate durchgeführt

**POTENZIAL** Jährliche Phosphorfracht im Rohabwasser auf Grundlage von ARA-größenabhängigen Phosphorkonzentration im Zulauf und entsprechenden Rohabwasser-Mengen (VSA, 2011): 6500 t P/a, Transfer des Phosphors im Rohabwasser in Asche über vorgängige Monoverbrennung (Pinnekamp, 2013; AWEL, 2009; validiert durch Ludwig Hermann, 2014): 90 %, Maximaler Rückgewinnungsgrad von Phosphor aus KS-Asche (AWEL, 2009; Ludwig Hermann, 2014): max 80 %, Resultierender Rückgewinnungsgrad bezogen auf Rohabwasser-Fracht: 35 % bis max. 70 %

**WEITERE** Hermann (2009), Roskosch et al. (2014), FHNW (2014)

## P04 Thermochemische Phosphor-Rückgewinnung aus Asche

Thermische Behandlung von KS-Asche mit reaktiven (Na-/K-) Alkaliverbindungen bei ca. 900 °C zur Entfrachtung der Asche von Schadstoffen (As, Cd, Pb). Die Asche wird in einer Wirbelschicht-Feuerung erhitzt, die thermochemischen Reaktionen in einem Drehrohr ablaufen. Die Rauchgase werden trocken gereinigt. Das Verfahren ermöglicht die Rückgewinnung von Phosphor für die Verwendung als Düngemittel in der Landwirtschaft oder als Ausgangsmaterial für die Düngemittelherstellung. Mit einem Rückgewinnungsgrad von bis zu 90 % des P im Rohabwasser wird ein sehr hoher Rückgewinnungsgrad erzielt.

### Heutige Nutzung und Potenzial

NÄHRSTOFF-  
RÜCKGEWINNUNG  
ABFALLWIRTSCHAFT  
t/a



Umsetzungsbeispiele: Keine bekannt

### Beurteilung der Potenzialrealisierung



**TECHNISCHE MACHBARKEIT** Verfahrensprinzip bekannt und in grosstechnischer Pilotanlage getestet (über 2 Jahre), Rückgriff auf bestehende Aggregate- und Anlagentechnik



**WIRTSCHAFTLICHKEIT** Sehr hohe Produktausbeute von bis zu 90 % des P im Rohabwasser, relativ unflexibles Produkt (mit vergleichsweise tiefem  $P_2O_5$ -Gehalt) mit Einfluss auf Produkterträge, Wärmebedarf und hohe Investitionskosten, relativ tiefe Entsorgungskosten für Rückstandsmengen von 40 – 50 kg pro t Asche.



**EINFLUSS ARA-BETRIEB** Ausserhalb ARA-Perimeter (unabhängig von Art der Phosphor-Elimination auf ARA), andere Klärschlamm-Abnehmer

### Zielkonflikte und Abhängigkeiten

#### INTERN

Alternative zur:

- Phosphor-Fällung aus Faulwasser bzw. stabilisiertem Klärschlamm.
- Nasschemischer Extraktion aus Faulschlamm.
- Nasschemischer Extraktion aus Asche.

Kurzfristige Implementierung möglich, falls mit P-Rückgewinnung kein Gewinn erzielt werden muss.

#### EXTERN

Wirtschaftlichkeit ist abhängig von Preisentwicklung auf dem Mineraldüngermarkt und der erzielten Qualität des zurückgewonnen Produkts und Brennstoffpreisen.

Umsetzung ist nicht im Interesse der Zementindustrie, da alternative Brennstoffbeschaffung (in der Regel Braunkohle) mit Mehrkosten und zusätzlichen Treibhausgasemissionen verbunden sind (Klärschlammvergasung im Zementwerk würde kombinierte Nutzung ermöglichen).

## Wirkung der Rahmenbedingungen

### REGULATORISCH

EINFLUSSFAKTOREN	WIRKUNG	BEGRÜNDUNG
Revidierte Technische Verordnung über Abfälle (TVA, ab 2016)	++	Art. 15: Pflicht zur Phosphor-Rückgewinnung nach dem Stand der Technik (mit Übergangsfrist)
Düngerverordnung (DüV)	-	Allgemeine Regelung für Zulassung und Inverkehrbringung aller Kategorien von Düngemitteln (z.B. Recyclingdünger)
ChemRRV	--	Anhang 2.6 (Art. 3): Qualitätsanforderungen an u.a. Recyclingdünger (Recyclingdünger aus Klärschlamm-Verwertung)
	+	Verbot der Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft

### SOZIO-ÖKONOMISCH

Preis Mineraldünger	--	Konkurrenz zu Recycling-Düngern aus der stofflichen Klärschlamm-Verwertung
Akzeptanz Recyclingdünger	-	Skepsis bezogen auf Schadstoff-Gehalt und Pflanzenverfügbarkeit Entspricht nicht den bisherigen Gewohnheiten von Landwirten
Interessen Zementindustrie	--	Klärschlamm als wirtschaftlich hoch interessanter Ersatzbrennstoff

### WEITERE FAKTOREN

Schonung Phosphor-Vorkommen	+	Endliche Ressource, deren Abbau mit bedeutender Beeinträchtigung von Umwelt und Gesellschaft zusammenhängt
Versorgungssicherheit	+	Import von Nährstoffen wegen nicht stattfindender Rückgewinnung aus Abfällen notwendig (erhöhte Auslandabhängigkeit: geopolitisch instabil)

## Grundlagen

**HEUTIGE NUTZUNG** Keine Nutzung in der Schweiz bekannt, grosstechnischer Pilotanlage über 2 Jahre getestet

**POTENZIAL** Jährliche Phosphorfracht im Rohabwasser auf Grundlage von ARA-grössenabhängigen Phosphorkonzentration im Zulauf und entsprechenden Rohabwasser-Mengen (VSA, 2011): 6500 t P/a, Transfer des Phosphors im Rohabwasser in Asche über vorgängige Monoverbrennung (Pinnekamp, 2013; AWEL, 2009; validiert durch Hermann, 2014): 90 %, Maximaler Rückgewinnungsgrad von Phosphor aus KS-Asche (AWEL, 2009; Hermann, 2014): annähernd 100 %, Resultierender Rückgewinnungsgrad bezogen auf Rohabwasser-Fracht: 90 %

**WEITERE LITERATUR** Hermann (2009), Roskosch et al. (2014), FHNW (2014)

## Teilsynthese Phosphor

Im Prozess der Abwasserreinigung stehen verschiedene Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor zur Verfügung. Grundsätzlich kann Phosphor aus der wässrigen Phase (d. h. Faulwasser), der Schlammphase (d. h. stabilisierter Klärschlamm, entwässerter Klärschlamm) oder aus der Asche nach vorgängiger Mono-Verbrennung des entwässerten Klärschlamm extrahiert werden. Die Rückgewinnung aus dem Faulwasser bzw. stabilisierten Klärschlamm erfolgt über Fällungsprozesse durch Zugabe von Magnesiumsalzen. Die Extraktion aus dem Klärschlamm benötigt vorgängig zusätzlich einen Säure-Aufschluss, um den Phosphor in Lösung zu bringen. Die Rückgewinnung aus dem Faulwasser erfordert einen hohen Phosphor-Transfer vom Rohabwasser in den Belebtschlamm über eine biologische Phosphorelimination, da die heute gängige chemische P-Elimination mit Eisen- oder Aluminiumsalzen zu chemisch sehr stabilen Eisen- bzw. Aluminiumphosphatverbindungen führt. Für die Rückgewinnung aus der Monoverbrennungs-Asche kommen sowohl nasschemische wie auch thermochemische Verfahren in Frage.

Die entsprechenden Rückgewinnungsgrade hängen neben der Verfügbarmachung des Phosphors (bei den verschiedenen nasschemischen Ansätzen) hauptsächlich ab vom Phosphor-Gehalt der Fraktion, aus welcher die Rückgewinnung erfolgt. Je nach Verfahren und Art der vorgängigen P-Elimination variieren die Rückgewinnungsgrade bezogen auf die Phosphor-Fracht im Rohabwasser zwischen 10 % (nasschemisch aus Faulwasser ohne Bio-P) und 90 % (thermochemisch aus Asche). Die rückgewinnbaren Mengen liegen zwischen 500 und knapp 6000 t P pro Jahr. Dies entspricht zwischen zwischen 10 % und 100 % des Schweizer Phosphor-Imports in Form von Mineraldüngern für die Landwirtschaft. Der Gesamtimport von P (inkl. Futtermitteln, etc.) beläuft sich jährlich auf 16 000 t P (Binder et al., 2009). Eine konsequente Rückgewinnung von P aus dem Abwasser würde folglich einen bedeutenden Beitrag zur Schweizerischen Gesamtversorgung leisten und die mit den importierten Primärgütern verbundenen Umweltauswirkungen signifikant reduzieren. Bis anhin wird jedoch keines dieser Verfahren in der Schweiz eingesetzt.

Hinsichtlich technologischer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit ist das Verfahren mit dem geringsten Rückgewinnungspotenzial (nasschemisch aus Faulwasser mit vorgängiger biologischer P-Elimination) am besten beurteilt. Das Verfahren ist marktreif und in mehreren Europäischen ARA erfolgreich umgesetzt. Die hohe Wirtschaftlichkeit ist primär auf tiefere Betriebs- und Unterhaltskosten (weniger Verstopfungen durch Struvit-Ablagerungen, bessere Entwässerbarkeit des Faulschlamm, keine Chemikalien zur P-Fällung bei Bio-P) zurückzuführen, die mit einer biologischen P-Eli-

mination in Verbindung stehen. Allerdings sind in der Schweiz weniger als 5 ARA mit Bio-P ausgestattet, was die Wirtschaftlichkeit und Eignung dieses Verfahrens für die Schweizer ARA-Landschaft (geringe P-Rückgewinnung von 10 %) stark reduziert. Die nasschemische Rückgewinnung aus Faulschlamm ist technisch weit aus komplexer sowie weniger weit entwickelt und die Wirtschaftlichkeit wird – neben den relativ tiefen Mineraldüngerpreisen – durch den kostenintensiven Chemikalieneinsatz in der Faulschlamm-Behandlung (Komplexierung, Hydrolyse) kompromittiert. Beide Verfahren sind mit umfangreichen Auswirkungen auf den ARA-Betrieb verbunden. Die beiden Verfahren zur P-Rückgewinnung aus der Klärschlamm-Asche unterscheiden sich nur relativ geringfügig in der Beurteilung der drei Kriterien. Da diese Verfahren inklusive der vorgängigen Monoverbrennung des Faulschlamm nicht auf der ARA erfolgen, gibt es – mit Ausnahme anderer Abnehmer für den Faulschlamm – keine Auswirkungen auf den ARA-Betrieb. Die thermochemische Aufbereitung wird aufgrund einer mehrjährig betriebenen Pilotanlage und der Tatsache, dass auf bewährte Technik zurückgegriffen wird, leicht höher eingeschätzt. Die Wirtschaftlichkeit ist aus verschiedenen Gründen (Investitionskosten, Produktqualität und –Erträge, Entsorgung der Rückstände) bei beiden Verfahren nicht abschliessend gegeben.

Bei den Rahmenbedingungen steht die Totalrevision der TVA im Vordergrund. Diese wird voraussichtlich die Rückgewinnung von Phosphor aus phosphorreichen Abfällen (Klärschlamm, Tier- und Knochenmehl) nach dem Stand der Technik ab 2016 verbindlich vorschreiben (mit einer 10-jährigen Übergangsfrist). Bei den beiden Rückgewinnungsverfahren aus der Asche stellen die Anforderungen an die Schadstoffgehalte für Recyclingdünger, die bedeutend über denjenigen der Mineraldünger liegen, noch eine Hürde für die Zulassung und damit für die landwirtschaftliche Verwendung dar. Weitere Hürden bestehen im relativ tiefen Preis von Mineraldünger, der skeptischen Einstellung von Abnehmer gegenüber Recyclingprodukten und, im Falle der Rückgewinnungswege mit Monoverbrennung, im Interesse der Zementindustrie für den günstigen und CO<sub>2</sub>-neutralen Klärschlamm als Brennstoff für die Klinkerproduktion.

Aus Sicht der Ressourceneffizienz ist eine Lösung anzustreben, die auf einen möglichst hohen Rückgewinnungsgrad abzielt, die im Schlamm enthaltene Energie effizient nutzt und auf die Bedürfnisse des Markts ausgerichtete Recyclingprodukte hervorbringt. Die Frage, welche Lösung(en) für den Schweizer Kontext tatsächlich zu präferieren ist bzw. sind, ist nicht abschliessend geklärt und wird im Rahmen von verschiedenen Studien weiter untersucht (Marktpotenziale und -Akzeptanz, Technologieentwicklung).





# Heutige Nutzung, Potenzial und Realisierbarkeit

ENERGIEEFFIZIENZ	HEUTE	POTENZIAL	BEURTEILUNG
GWh/a			
<b>E01</b> Stromeffizienz	400–500 ⚡	80–120 ⚡	
<b>E02</b> Wärmeverbrauch	100 🌡️	25–50 🌡️	

ENERGIEPRODUKTION	HEUTE	POTENZIAL	BEURTEILUNG
GWh/a			
<b>E03</b> Klärschlamm-Desintegration	0 ⚡ 0 🌡️	10–25 ⚡ 15–40 🌡️	
<b>E04</b> Vergärung Co-Substrate	10–25 ⚡ 15–40 🌡️	keine Aussage möglich nicht bekannt	
Nährstoffe (kg/t)	– 0.5 P	– 1.4 N	
<b>E05</b> Nachfäulung	0–10 ⚡ 0–15 🌡️	10–25 ⚡ 15–40 🌡️	
<b>E06</b> Verstromung BHKW	100 ⚡ 150–200 🌡️	100–120 ⚡ 150–200 🌡️	
<b>E07</b> Faulgasaufbereitung	60–75 🔥	300 🔥	
<b>E08</b> Wärmenutzung Zulauf	0–10 🌡️	200–1000 🌡️	

<b>E09</b>	Wärmenutzung Ablauf	keine Aussage möglich	<b>5000–6000</b>	  
<b>E10</b>	Kleinwasserkraft	<b>0–10</b>	<b>25–50</b>	  
<b>E11</b>	Photovoltaik	<b>0–10</b>	<b>80–150</b>	  

**NÄHRSTOFFRÜCKGEWINNUNG ARA**      HEUTE      POTENZIAL      BEURTEILUNG

t/a

<b>P01</b>	Nasschemische P-Rückgewinnung aus Faulwasser	<b>0</b> P <b>0</b> N	<b>500–2500</b> P <b>225–1200</b> N	  
<b>P02</b>	Nasschemische P-Rückgewinnung aus Faulschlamm	<b>0</b> P <b>0</b> N	<b>2500–4500</b> P <b>1100–2000</b> N	  
<b>N01</b>	N-Stripping	<b>25</b> N	<b>&gt; 5000</b> N	  

**NÄHRSTOFFRÜCKGEWINNUNG  
ABFALLWIRTSCHAFT**      HEUTE      POTENZIAL      BEURTEILUNG

t/a

<b>P03</b>	Nasschemische P-Rückgewinnung aus Asche	<b>0</b> P	<b>4000–4500</b> P	  
<b>P04</b>	Thermochemische P-Rückgewinnung aus Asche	<b>0</b> P	<b>5500–6000</b> P	  



WÄRME-NUTZUNG ABLAUF	KLEIN-WASSER-KRAFT	PHOTO-VOLTAIK	N-STRIPPING	KS-MONO-VERBREN-NUNG	NASSCHEM. P-RECYCLING (WASSER)	NASSCHEM. P-RECYCLING (SCHLAMM)	NASSCHEM. P-RECYCLING (ASCHE)	THERMOCHEM. P-RECYCLING (ASCHE)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	+	+	+	+	+
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0/- Winter	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0
				0	0	0	0	0
					-	-	++	++
						--	-	-
							--	--
								--

# 04 POLITISCHER HANDLUNGSBEDARF

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den ersten beiden Projektmodulen wurde der Regulierungsbedarf für eine Steigerung der Ressourcennutzung abgeleitet. Bevor auf die konkreten Stossrichtungen eingegangen wird, wird im Folgenden der Bedarf für zusätzliche Regulierungen für die drei Ressourcen (Energie, Stickstoff, Phosphor) übergeordnet zusammengefasst:

### **ENERGIE**

Die bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen haben eine stark fördernde Wirkung auf die Ausschöpfung der diversen energetischen Potenziale, die mit den analysierten Technologien in Verbindung stehen. Dies betrifft sowohl die Förderung der Stromeffizienz und die Möglichkeiten zur optimierten Wärmenutzung wie auch die diversen Optionen zur Steigerung der Energieproduktion. Hier gilt es mehr sicherzustellen, dass die über diverse Instrumente stark geförderte Energieproduktion nicht auf Kosten der Nährstoffnutzung geschieht bzw. dass diese Massnahmen den Betrieb der ARA und Anliegen an die Gewässerökologie nicht negativ beeinträchtigen.

### **STICKSTOFF**

Auf die Steigerung der Rückgewinnung von Stickstoff auf ARA haben die bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen weder fördernden noch hemmenden Einfluss. Wirtschaftliche Anreize sind bei den heutigen Düngerpreisen und den konkurrierenden Verfahren zur Stickstoffelimination auf ARA derzeit nicht vorhanden. Der Regulierungsbedarf wird insofern nicht als sehr dringlich erachtet, als dass Stickstoff weder eine geologisch knappe noch hinsichtlich der Primärherstellung ökologisch sowie sozial bedenkliche Ressource darstellt.

### **PHOSPHOR**

Unter der Voraussetzung, dass die in der neuen TVA vorgeschriebene Pflicht zur Rückgewinnung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors nach dem Stand der Technik ab 2016 in Kraft tritt, gibt es zur Steigerung der Phosphornutzung keinen Bedarf für zusätzliche Regulierungen in der Gewässerschutzgesetzgebung. Der entsprechende Stand der Technik soll in einer Vollzugshilfe konkretisiert werden. Dabei ist zentral, dass die Umsetzung der Phosphor-Rückgewinnung auf die unterschiedlichen regionalen Gegebenheiten abgestimmt wird. Allfällige Anpassungen in der Gesetzgebung sollten darauf ausgerichtet sein, dass der landwirtschaftlichen Verwendung der aus Klärschlamm zurückgewonnenen Nährstoffe keine Barrieren über die Zulassungsanforderungen für Düngemittel im Wege stehen.

Die Ausführungen legen nahe, dass die Realisierung der mit den einzelnen Technologien verbundenen Potenziale – Ausnahme des grossen Potenzials zur Stickstoff-Rückgewinnung aus Faulwasser – keiner zusätzlichen regulatorischen Förderung bedarf. Vielmehr ist bei der Anpassung der Gesetzgebung darauf zu achten, dass unterschiedliche Optimierungen bzw. Ansätze zur Steigerung der Ressourcennutzung im Sinne der Optimierung des Gesamtsystems sinnvoll aufeinander abgestimmt werden und nicht im Konflikt mit anderen politischen Teilzielen (z. B. Gewässerschutz durch weitgehende Schadstoffelimination) stehen.

## STOSSRICHTUNGEN FÜR REGULATORISCHE ANPASSUNGEN

STOSSRICHTUNG	BESCHREIBUNG	RESSOURCENBEZUG
<b>Grundsatz eines ressourceneffizienten ARA-Betriebs</b>	<p>Zusätzlich zur Gewährleistung eines wirtschaftlichen Betriebs, wäre zusätzlich eine generelle Verpflichtung von Kantonen und ARA-Betreibern zu einem ressourceneffizienten ARA-Betrieb eine denkbare Ergänzung.</p> <p>Um dem Gesamtsystem der Abwasserreinigung gerecht zu werden bzw. Problemverlagerungen zu vermeiden, ist dabei folgendes zentral:</p> <p>Nachweiserbringung, dass Massnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz die Anliegen an den Gewässerschutz und Gewässerqualität nicht negativ tangieren.</p> <p>Sicherstellen, dass prozessbezogene Optimierungen unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf alle ARA-Prozesse vorgenommen werden.</p> <p>Prüfung, dass standortorientierte Massnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz aus gesamtheitlicher Ressourcenperspektive unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus Sinn machen (z. B. Vergärung von Co-Substraten, was die Nutzung des nährstoffhaltigen Gärrestes in der Landwirtschaft verunmöglicht; N-Stripping mit Energie- und Säureverbrauch im Vergleich zu industrieller Herstellung von Düngemitteln).</p>	<p>Energieeffizienz Energieproduktion N-Recycling P-Recycling</p>
<b>Erhöhung der Energieproduktion</b>	<p>Durch KEV oder Bescheinigungen für Emissionsvermindierungen geförderte Projekte zur Steigerung der erneuerbaren Stromproduktion auf ARA sollen im Einzelfall anhand von Lebenszyklusanalysen ganzheitlich beurteilt werden (z. B. KS-Desintegration, Nachfäulung; vgl. «Anforderungen an Vergärung von Co-Substraten auf ARA»).</p>	<p>Energieeffizienz Energieproduktion</p>
<b>Anforderungen an Vergärung von Co-Substraten</b>	<p>Vergärung von Co-Substraten in Faultürmen ist nur zulassen, wenn:</p> <p>Nachweis erbracht wird, dass Biomasse nicht in anderen Biogasanlagen energetisch genutzt wird bzw. aufgrund ihrer Charakteristik (z. B. Schadstoffgehalt) nicht anderweitig energetisch verwertet werden kann.</p> <p>Nährstoffe, die im Faulschlamm enthaltenen sind, in nachfolgendem Schritt zurückgewonnen werden.</p> <p>Der Energieinhalt der Co-Substrate weitgehend genutzt wird.</p> <p>Die ARA aus ökologischer Perspektive einen sinnvollen und sicheren Entsorgungsweg darstellen (z. B. anstelle Zudosierung von kohlenstoffhaltigen Abfällen in die biologische Reinigungsstufe).</p>	<p>Energieproduktion</p>



<b>Anforderungen an Energieeffizienz von Aggregaten</b>	Festlegung von Mindestanforderungen zur Stromeffizienz bei der Neubeschaffung von Aggregaten zur Abwasser- und Schlammbehandlung (z. B. Pumpen, Rührwerke, Gebläse).  Vorgaben für Ersatz von ineffizienten Aggregaten nach optimaler Lebensdauer.	Energieeffizienz
<b>Anforderungen an Wärmenutzung aus Zulauf</b>	Anforderungen und Pflicht zur Nachweiserbringung für Wärmeentnahme aus ARA-Zulauf, so dass keine negativen Effekte auf Nitrifikationsleistung und Stickstoffelimination in der ARA auftreten.	Energieproduktion
<b>Anforderungen an Wärmenutzung aus Ablauf</b>	Anforderungen und Pflicht zur Nachweiserbringung für Wärmezufuhr in ARA-Ablauf (zur Kühlung), so dass gewässerökologische Anliegen nicht tangiert werden (kühlender Effekt durch Abwasser ist sowohl im Winter wie im Sommer gewünscht).  Abwassereinleitungen in die üblichen Bewilligungsverfahren für thermische Nutzung von Oberflächengewässern aufnehmen (läuft momentan daran vorbei).	Energieproduktion
<b>Anforderungen an Düngemittel aus KS-Asche</b>	Anpassung der Vorschriften für Recyclingdünger aus Klärschlammasche hinsichtlich der tolerierten Schadstoffgehalte. Denkbar wäre einerseits die Einführung einer neuer Düngerkategorie für solche Recyclingdünger, da diese im Vergleich zu klassischen Recyclingdüngern (z. B. Kompost) aufgrund ihrer hochwertigen Eigenschaften in bedeutend geringeren Mengen ausgebracht werden müssen. Ziel wäre eine Gleichstellung mit handelsüblichen, konkurrierenden Mineraldüngern.	P-Recycling
<b>Energierichtpläne und kommunale Energiekonzepte</b>	Bei der Erstellung von Energierichtplänen und kommunalen Energiekonzepten sollen die Anliegen anderer Infrastruktursysteme mit ökologisch wesentlichen Funktionen explizit berücksichtigt werden.	Energieproduktion

Im Folgenden wird ein Vorschlag für die konkrete Umsetzung obiger Stossrichtungen auf regulatorischer Ebene illustriert. Dieser ist das Resultat einer Diskussion mit der verantwortlichen Sektion «Gewässerschutz» und Vertretern der Rechtsabteilung beim BAFU:

#### VORGESCHLAGENE REGULATORISCHE ANPASSUNGEN

---

WO	WAS
<p><b>Gewässerschutzverordnung</b> GSchV</p>	<p><b>Ergänzung von Artikel 13 «Fachgerechter Betrieb» von Abwasserreinigungsanlagen um eine Weisung</b>, welche die Optimierung der Ressourceneffizienz des Gesamtsystems ARA im Rahmen des technisch machbaren, wirtschaftlich tragbaren und gesamtökologisch sinnvollen für Kantone und ARA-Betreiber verbindlich vorschreibt. Dabei ist es wesentlich, dass die Steigerung der Ressourceneffizienz nicht auf Kosten der Anliegen des Gewässerschutzes erfolgt.</p>
<p><b>Leitfaden/Vollzugshilfe</b> Steigerung der Ressourceneffizienz auf ARA</p>	<p><b>Erstellung eines Leitfadens zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf ARA:</b> Dieser Leitfaden soll konkrete Anhaltspunkte darüber liefern, welche technologischen Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf ARA zur Verfügung stehen und, insbesondere, was bei der Umsetzung einzelner Technologien zu beachten ist. Damit können gezielte Optimierungsbestrebungen aufeinander abgestimmt werden können und Problemverlagerungen zwischen politischen Teilzielen (z. B. Gewässerschutz) vermieden werden.</p>

---



# 05

## SCHLUSS- FOLGERUNGEN

Das Hauptziel der vorliegenden Studie bestand darin, eine Auslegeordnung zum möglichen Beitrag des Schweizer Abwassersystems zu einer Grünen Schweizer Wirtschaft zu schaffen und daraus Grundlagen für gesetzliche Anpassungen abzuleiten, um die Ressourcennutzung in Zukunft zu steigern. Dazu wurde die heutige Nutzung und mittelfristigen Potenziale von insgesamt 16 technologischen Ansätzen zur Steigerung der Nutzung der Ressourcen Energie, Phosphor und Stickstoff analysiert und hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit grob beurteilt. Auf Grundlage einer Analyse der Wirkung der relevanten politischen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen auf die Umsetzung der Potenziale wurde der Regulierungsbedarf ermittelt und ein Vorschlag für rechtliche Anpassungen vorwiegend in der Gewässerschutzgesetzgebung erarbeitet.

## Beitrag der Abwasserreinigung zur Grünen Wirtschaft

Die Analyse hat offenbart, dass sich die heutige Ressourcennutzung im Schweizer Abwassersystem weitgehend auf den Energiebereich beschränkt. Die Steigerung der Strom- und Wärmeeffizienz sowie der Energieproduktion auf der ARA und dieser vor- bzw. nachgelagert ist schon längere Zeit ein Schwerpunkt von ökologischen und betriebswirtschaftlichen Optimierungsbestrebungen. So ist beispielsweise die Mehrheit der Schweizer ARA mit Faultürmen und BHKW ausgestattet, um das im Klärschlamm enthaltene Energiepotenzial über die Produktion von Faulgas in Strom und Wärme umzuwandeln. Auch die Reduktion des Strom- und Wärmebedarfs über eine Vielzahl von Effizienzmassnahmen (z.B. effiziente Aggregate zur Druckluftherzeugung, Rückgewinnung nutzbarer Abwärme bei Aggregaten) war und ist heute Gegenstand von Bestrebungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Zusätzliche Ansätze zur Erhöhung der erneuerbaren Energieproduktion (z.B. Wärmenutzung aus Zu- und Ablauf, Photovoltaik, Kleinwasserkraft) werden ebenfalls zunehmend verfolgt, was dazu geführt hat, dass ausgewählte Vorreiter-ARA heute mindestens saisonal energieautark sind, d.h. ihren Energiebedarf über die eigene Produktion decken und nicht mehr auf Strom- bzw. Wärmeversorgung von ausserhalb angewiesen sind. Demgegenüber spielt die Nutzung der ins Rohabwasser eingetragenen Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff bis heute keine bzw. eine stark untergeordnete Rolle. Eine Rückgewinnung von Phosphor findet bis anhin schweizweit nicht statt. Einzig im Kanton Zürich auf der ARA Werdhölzli wird mit dem Bau einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage die infrastrukturelle Voraussetzung geschaffen, um den Phosphor zukünftig aus der beim Verbrennungspro-

zess anfallenden Asche mit hohem Rückgewinnungsgrad zurückzugewinnen. Die Rückgewinnung von Stickstoff aus dem Faulwasser wird gegenwärtig auf einer einzigen ARA (Kloten/Opfikon) betrieben.

Trotz beachtlichen Bestrebungen in den vergangenen Jahren bergen die ARA noch ein bedeutendes, nicht erschlossenes Potenzial zur Reduktion des Energieverbrauchs bzw. zur Steigerung der Energieproduktion. Energieeinsparpotenziale über diverse Effizienzsteigerungsmassnahmen liegen in der Grössenordnung von 150 GWh pro Jahr, was ungefähr einem Viertel des gesamten Strom- und Wärmeverbrauchs in der Schweizer ARA-Landschaft entspricht. Etwa 2/3 davon betreffen Stromeinsparungen, während Wärmeeinsparungen von bis zu 50 GWh über die konsequente Abwärmenutzung über Wärmerückgewinnung an verschiedenen Stellen (z.B. WRG aus Faulschlamm, WRG bei Aggregaten zur Druckluftherzeugung) möglich sind. Das Potenzial zur Steigerung der Energieproduktion liegt demgegenüber um einiges höher und beläuft sich insgesamt auf mehrere tausend GWh pro Jahr, was von der Grössenordnung her dem Beitrag der heutigen Schweizer Abfallwirtschaft bzw. einigen wenigen Prozent des Schweizer Endenergieverbrauchs entspricht. Der eindeutig grösste Beitrag zum gesamten Potenzial geht auf die Nutzung der im ARA-Zu- bzw. Ablauf enthaltenen Wärme zurück. Das Strompotenzial ist mit wenigen 100 GWh pro Jahr vergleichsweise gering. Beim Phosphor liegt das unerschlossene Nutzungspotenzial im Klärschlamm bei maximal 5500 bis 6000 Tonnen pro Jahr. Das Potenzial ist jedoch stark abhängig von der eingesetzten Technologie und variiert zwischen jährlich 500 und 6000 Tonnen. Dabei sind die Ansätze, welche auf eine Rückgewinnung des Phosphors aus der Asche einer Klärschlamm-Monoverbrennung setzen, der direkten Rückgewinnung aus dem Faulschlamm bzw. Faulwasser klar vorzuziehen. Bei einem Import von jährlich ca. 16 000 Tonnen Phosphor (davon knapp 6000 Tonnen in Form von Mineräldüngern), könnte eine schweizweite, effektive Rückgewinnung aus Klärschlamm einen bedeutenden Anteil von ca. 40 % des importierten Primärphosphors substituieren und somit einen wesentlichen Beitrag zur Schonung dieser essentiellen Ressource und zur Reduktion der Importabhängigkeit leisten. Weiter kam die Studie zum Schluss, dass die schweizweite Umsetzung der Stickstoff-Strippung aus Faulwasser auf grösseren ARA (> 50 000 EW) mehr als 5000 Tonnen Stickstoff in Form von Ammoniumsulfat für die landwirtschaftliche Nutzung verfügbar machen könnte. Im Verhältnis zum Stickstoff-Import in Form von Mineräldüngern von rund 50 000 Tonnen pro Jahr (BAFU, 2014), entspricht dies einem Anteil von rund 10 %.

Die Studie zeigt, dass ein hinsichtlich Ressourcennutzung optimiertes Abwasserreinigungssystem (inklusive der Entsorgung des Klärschlammes) durchaus einen Beitrag zu einer Grünen Wirtschaft und nachhaltigen Energieversorgung in der Schweiz leisten kann. Der Vergleich der identifizierten Ressourcenpotenziale mit dem jeweiligen gesamtschweizerischen Ressourcenbedarf macht aber auch deutlich, dass eine Umsetzung einer Grünen Wirtschaft und nachhaltigen Energieversorgung weitaus umfassendere Anstrengungen voraussetzt und branchenübergreifend (Produktion und Entsorgung) angegangen werden muss.

Die Analyse der Rahmenbedingungen kam zum Schluss, dass aus heutiger Sicht kein dringender regulatorischer Handlungsbedarf besteht, um die Ressourceneffizienz in der Schweizer ARA zu erhöhen. Die bestehenden und absehbaren rechtlichen Rahmenbedingungen sowie verschiedene darauf aufbauende Förderinstrumente setzen die Anreize bzw. Vorgaben zu einer schrittweisen Ausschöpfung der identifizierten Ressourceneffizienz-Potenziale. Mit Ausnahme der Phosphor-Rückgewinnung erfolgt dieser Prozess aufgrund der langlebigen Infrastrukturen jedoch eher schrittweise als von heute auf morgen.

Während die Nutzung der energetischen Potenziale in den Bereichen Energieeffizienz und Energieproduktion über diverse Anreiz- und Fördersysteme in der CO<sub>2</sub>- und Energiegesetzgebung heute bereits umfangreich gefördert und angegangen wird, zeichnen sich die notwendigen gesetzlichen Anpassungen für die Phosphor-Rückgewinnung mit der Revision der TVA, die anfangs 2016 in Kraft treten soll, und laufenden Bestrebungen im Bundesamt für Landwirtschaft konkret ab. Anstelle der Förderung und Regulierung von einzelnen Technologien besteht der Regelungsbedarf in Zukunft mehr darin, den grundlegenden Anspruch an einen ressourceneffizienten ARA-Betrieb in der Gesetzgebung zu verankern und einzelne Bestrebungen in verschiedenen Ressourcengebieten (Energie, Stickstoff, Phosphor) auf das übergeordnete Ziel eines ressourceneffizienten Gesamtsystems «Abwasserreinigung» auszurichten. Ein derartiger integrativer Ansatz soll einerseits sicherstellen, dass die Steigerung der Ressourceneffizienz nicht auf Kosten der übergeordneten Gewässerschutzanliegen erfolgt bzw. diese nicht beeinträchtigt. Andererseits geht es darum, dass die standortorientierten Massnahmen zur Realisierung von Potenzialen aus gesamtheitlicher Umweltperspektive unter Berücksichtigung des Lebenszyklus erfolgen, um Problemverlagerungen zwischen einzelnen Umweltzielen zu vermeiden. Letzteres ist insbesondere auch darauf zurückzuführen, dass die Energie- und Klimaschutzgesetzgebung einen nationalen, territorialen

Ansatz verfolgt, während dem Anliegen an eine Grüne Wirtschaft ein grenzüberschreitender Lebenszyklusansatz zugrunde liegt. Entsprechende Zielkonflikte sollen berücksichtigt und gegeneinander abgewogen werden. Spezifische Orientierungen und Empfehlungen darüber, was bei der Ausschöpfung einzelner Technologie-Potenziale an Abhängigkeiten und Zielkonflikten zu beachten ist, könnte in einem ergänzenden Leitfaden umgesetzt werden (ähnlich dem bestehenden Leitfaden zur Energieoptimierung auf Abwasserreinigungsanlagen, der vom VSA und EnergieSchweiz herausgegeben wurde (VSA/energieschweiz, 2008/2010).

## Weiterer Abklärungsbedarf

Die präsentierte Studie beinhaltetete eine grobe schweizweite Betrachtung und Auslegeordnung zu Ressourceneffizienz-Potenzialen und deren Ausschöpfung beeinflussenden regulatorischen Rahmenbedingungen sowie ein daraus abgeleiteter Vorschlag zur Anpassung der Gewässerschutzgesetzgebung. Ergänzend bzw. weiterführend zu dieser Studie sehen wir die folgenden Schwerpunkte, die wir zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Schweizer Abwasserreinigungslandschaft als zielführend erachten:

### VON DER VOGEL- ZUR DETAILPERSPEKTIVE

Da die Voraussetzungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz von ARA zu ARA bzw. unter verschiedenen ARA-Typen unterschiedlich sind, sollten die hier erarbeiteten, generischen Ergebnisse in dieser Hinsicht vertieft und differenziert werden. Potenziale und insbesondere die Realisierbarkeit der einzelnen Technologien sind kritisch abhängig von den spezifischen Voraussetzungen der jeweiligen ARA. Eine genauere Betrachtung unter Berücksichtigung der ARA-Grösse, den bestehenden Prozess-Setups, der Platzverhältnisse etc. eventuell im Rahmen von ausgewählten Pilotstudien ist zu empfehlen bzw. wird den energetischen Grob- und Feinanalysen bereits heute gemacht.

### ABKLÄRUNG DER ÖKOLOGISCHEN SINNHAFTHKEIT

Die Beurteilung der Realisierbarkeit sollte noch um eine ökologische Analyse ergänzt werden, welche die Wirkung der Massnahmen (Technologien) aus einer umfassenden Perspektive beurteilt. Dies ist insofern notwendig, als dass Zielkonflikte zwischen Ressourcen (z.B. energetische versus stoffliche Nutzung) bestehen und die Technologien (z.B. nasschemische Aufbereitung der KS-Asche) selber mit Umweltbelastungen einhergehen, die es gegenüber dem Umweltnutzen abzuwägen gilt.







# Literaturverzeichnis

## **AWEL (2009)**

Synthesebericht für interessierte Fachpersonen – Zürcher Klärschlamm Entsorgung unter besonderer Berücksichtigung der Ressourcenaspekte. Zürich: Baudirektion Kanton Zürich.

## **AWEL (2010)**

Heizen und Kühlen mit Abwasser. Zürich: Baudirektion Kanton Zürich.

## **Bachmann, N. (2009)**

Vorteile und Grenzen der Vergärung von leicht abbaubaren Industrie- und Lebensmittelabfällen in Abwasserreinigungsanlagen - Vergleich zur landwirtschaftlichen Vergärung. Masterarbeit, ETH Lausanne.

## **BAFU (2014)**

Stickstoff – Segen und Problem. Umwelt 2/2014. Bern: Bundesamt für Umwelt.

## **BFE (2013)**

Potential der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung. Bern: Bundesamt für Energie.

## **BFE (2008)**

Abwasserwärmenutzung – Potential, Wirtschaftlichkeit und Förderung. Bern: Bundesamt für Energie.

## **Binder, C.R., de Baan, L., & Wittmer D. (2009)**

Phosphorflüsse der Schweiz. Stand, Risiken und Handlungsoptionen. Umwelt-Wissen Nr. 0928. Bern: Bundesamt für Umwelt.

## **Boller, R. (2014)**

Kläranlage – vom Energieverbraucher zum Energieproduzenten. Nur eine Idee, Vision oder Realität? Steinach: Abwasserverband Morgental.

## **DWA (2015)**

Merkblatt DWA-M 302 (Entwurf). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

## **EAWAG (2011)**

Stickstoffrückgewinnung am Beispiel der ARA Kloten/Opfikon – Dünger aus Abwasser. Kantonale Tagung Zürcher Klärwerkspersonal.

## **FHNW (2014)**

Ressourceneffiziente ARA - Faktenblatt zur stofflichen und energetischen Nutzung relevanter Quellen in der Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung. Muttenz.

## **Gaschen, A., & Liechti, J. (2010)**

Optimale Verwertung bringt gute CO<sub>2</sub>-Bilanz. Umwelt Perspektiven (4), S. 2 bis 5.

## **Gujer, W. (2007)**

Siedlungswasserwirtschaft. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.

## **Hermann, L. (2009)**

Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung: Eine Bestandesaufnahme. Umwelt-Wissen Nr. 29.

## **Hermann, L. (2014)**

Mündliche Mitteilung.

## **Horn, H., Rapp-Fiegle, S., Günthert, W., & Holtorff, M. (2009)**

Forschungsvorhaben «Kläranlage der Zukunft» – Themenbereiche Faulgasproduktion, Anaerobtechnik und Deammonifikation.

## **Hunziker, P. (2005)**

Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz - Vorreiterrolle der ARA Region Luzern. GWA, 4, S. 1 bis 8.

## **Kind, E., & Levy, G. A. (2012)**

Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA. Baden.

## **Kobel, B. (2011)**

Wärmeentnahme aus Kanalisationen – eine innovative Idee zur Energieeinsparung. VSA Kanalisationsforum. Zürich.

## **Kolisch, G., Osthoff, T.,**

## **Hobus, I., & Hansen, J. (2010)**

Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen – eine Ergebnisbetrachtung zu durchgeführten Energieanalysen. Korrespondenz Abwasser, Abfall, 57 (10), S. 1028 bis 1032.

## **Kühni, M., Warthmann, R., & Baier, U. (2010)**

Energieautarke ARA ist technisch möglich. Umwelt Perspektiven, 3, S. 14 bis 17.

## **Levy, G. A. (2009)**

Energieoptimierungen auf Kläranlagen. GWA, 6, S. 1 bis 7.

## **Maier, W., Steinmetz, H., & Gugel, J. (2014)**

Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm. Machbarkeitsstudie, SEG – Stadtentwässerung Göppingen.

**Meggers, F., & Leibundgut, H. (2011)**

The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings*, 43 (4), S. 879 bis 886.

**Mueller, E. A., & Dietler, M. (2015)**

Abwasser als Energiequelle. *Aqua & Gas*, 7/8.

**Mueller, E. A., Graf, E., Moser, R., & Mathys, O. (2013)**

Innovative Energieprojekte auf ARA – Medaille d'eau 2013. *Aqua & Gas*, 7/8, S. 50 bis 56.

**Mueller, E. A., Schmid, F., & Kobel, B. (2010)**

Heizen und Kühlen mit Abwasser - Ratgeber für Bauherren und Kommunen. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Bundesverband Wärmepumpe e.V., Institut Energie in Infrastrukturanlagen.

**Pinnekamp, J., Baumann, P., Cornel, P., Everding, W., Göttlicher-Schmidle, U., Heinzmann, B., et al. (2013)**

Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 10/11 (60), S. 1 bis 11.

**Roskosch, A., Laux, D., Kneisel, M., & Pluta, H.-J. (2014)**

Phosphor-Rückgewinnung – Aktuelle technische und politische Entwicklungen. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 5 (61), S. 437 bis 446.

**Schmid, F. (2007)**

Wärmerückgewinnung aus Abwasser – Potentialerhebung im Rahmen des GEP. *GWA*, 6, S. 405 bis 411.

**Schmid, F. (2009)**

Aus grauem Wasser wird grüner Strom – Interessante Stromerzeugung in Abwasserleitungen. *Bulletin SEV/AES*, 2, S. 13 bis 15.

**Schmid, F., Müller, E. A., & Baumann, R. (2010)**

Aus grauem Wasser wird grüner Strom – Elektroenergie aus dem Kanal. *WWT*, 3, S. 21 bis 23.

**Siegrist, H., Salzgeber, D., Eugster, J., Böhler, M., & Joss, A. (13. März 2009)**

Möglichkeiten zur Behandlung von Rückläufen – Schlammwässerung – Einsatz von Zusatzstoffen in der Schlammbehandlung. Fachtagung der VSA Kommission ARA. Zürich.

**Strähl, S., Ort, C., Siegrist, H., Thomann, M., Obrecht, J., & Kurz, E. (2013)**

Stickstoffelimination in Schweizer ARA – Weitere Entlastung der Oberflächengewässer. *Aqua & Gas*, 5, S. 74 bis 84.

**Swisspower (2015)**

Potenzial zur Effizienzsteigerung in Kläranlagen mittels Einspeisung oder Verstromung von Klärgas. Zürich.

**TBF + Partner AG (2015)**

Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. Zürich.

**VSA (2011)**

Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung. Bern: Fachorganisation Kommunale Infrastruktur.

**VSA/energieschweiz (2008/2010)**

Leitfaden zur Energieoptimierung auf Abwasserreinigungsanlagen.

**Wunderlin, P., Siegrist, H., Kipf, M., Gruber, W., & Joss, A. (2014)**

Energieoptimierung um jeden Preis? – Potentielle Risiken für den Umweltschutz. 89. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium. Stuttgart.

