



Helene Kindermann, BSc.

# **Kommunale Abwasserreinigungsanlagen als lokale Energiezentren**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Verfahrenstechnik

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Narodoslawsky

Institut für Prozess- und Partikeltechnik

Graz, Juni 2015

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Professor Michael Narodoslowsky für die Betreuung dieser Masterarbeit bedanken. Er hatte immer ein offenes Ohr für Fragen und hat mich mit seiner unbeschwerten Art motiviert Herausforderungen anzunehmen.

Desweiteren möchte ich mich beim Team des *Abwasserenergieprojektes* für die herzliche Aufnahme in die Gruppe sowie für die außerordentlich gute Zusammenarbeit bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Gerhard Kerschbaummayr, Geschäftsführer der Kläranlage Freistadt, für seine tatkräftige Unterstützung bei der Erhebung der Daten für diese Arbeit.

Bei der Arbeitsgruppe *Prozesssynthese – Prozessbewertung – Regionalentwicklung* des Instituts für Partikel und Prozesstechnik möchte ich für das tolle Arbeitsklima und die Unterstützung bei Unklarheiten bedanken. Mein besonderer Dank gilt Mag. Renè Kollmann und Barbara Truger für die Zusammenarbeit am *Abwasserenergieprojekt*.

Natürlich möchte ich mich auch bei meinen Eltern bedanken, die mich zu der Auswahl des Studiums motiviert und mich bedingungslos unterstützt haben.

Meinen Freunden, meinem Freund und meiner Schwester möchte ich für eine unvergessliche Zeit abseits des Studiums danken.

## Kurzfassung

Aufgrund der umweltschädlichen Eigenschaften und der Endlichkeit von fossilen Ressourcen, wird heutzutage versucht alternative Energiegewinnungsmöglichkeiten zu schaffen. Kommunale Abwasserreinigungsanlagen bieten einen möglichen Standort zur Bereitstellung von nachhaltiger Energie. Einerseits kann mit Hilfe von Wärmepumpen die Rückgewinnung der Abwasserwärme realisiert werden, andererseits kann die Verwertung des bei der anaeroben Schlammstabilisierung anfallenden Klärgases Strom und Wärme liefern.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Analyse des energetischen Potentials der Kläranlage Freistadt in Oberösterreich. Diese Analyse wurde im Zuge des *Abwasserenergieprojekts – Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energiekonzepte* anhand der Prozess-Netzwerk-Synthese erarbeitet und durchgeführt. Die Prozess-Netzwerk-Synthese ist ein Optimierungswerkzeug, das die wirtschaftlichste Technologiestruktur zur Produktion von vorab definierten Produkten berechnet. Die Ergebnisse der Analyse haben gezeigt, dass in abhängig vom Bedarf in der näheren Umgebung der Kläranlage, die Produkte der Abwasserwärmerückgewinnung (Niedertemperaturwärme, Kühlenergie) zu konkurrenzfähigen Preisen am Energiemarkt angeboten werden können. Als Voraussetzung muss das Heizsystem potentieller Abnehmer für die Anwendung von Niedertemperaturwärme angepasst sein. Die Produkte der Klärgasverwertung (Hochtemperaturwärme, Strom) können externen Abnehmern nicht unter wirtschaftlichen Bedingungen zur Verfügung gestellt werden. Die Einspeisung von aufbereitetem Klärgas in das öffentliche Erdgasnetz ist aufgrund der geringen Gasmenge der Kläranlage Freistadt ebenfalls nicht rentabel.

Somit hat sich gezeigt, dass kommunale Abwasserreinigungsanlagen als lokale Energiezentren für die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme und Kühlenergie auftreten können. Eine Synergie mit Energieabnehmern, die einen ganzjährig gleichbleibenden Niedertemperaturenergiebedarf aufweisen, wäre ideal. Gewächshäuser, Hallenbäder sowie diverse Industrie- und Gewerbeunternehmen bieten sich hierfür an.

## Abstract

Recently, attempts have been made to utilise alternative energy sources, to avoid the environmental impacts of finite fossil resources. Municipal waste water treatment plants present one possible location to gain renewable energy. Additionally to the electricity and heat provided by the sewage gas of the anaerobic fermentation, waste water heat recovery systems can be applied to generate energy.

The object of this thesis is to analyse the energetic potential of the waste water treatment plant of Freistadt in Upper Austria. This analysis was realised in the course of the *Abwasserenergieprojekt* by using the Process-Network-Synthesis. The Process-Network-Synthesis is an optimisation tool, which calculates the most economically advantageous technology structure to generate predefined products. The results of this analysis have shown, that depending on the energy demand in the vicinity of the waste water treatment plant, the products of the waste water heat recovery systems (low temperature heat and cooling energy) can be offered at competitive prices at the energy market. As a requirement the heating system of potential customers has to be adapted to a low temperature heat supply. The products of the utilisation of sewage gas (high temperature heat and electricity) cannot be offered economically to external customers. To feed cleaned sewage gas into the public natural gas supply system is not profitable either because of the small amount of gas at the waste water treatment plant of Freistadt.

It is shown that the municipal waste water treatment plant can act as a local energy centre for the provision of low temperature heat and cooling energy. A synergy with energy consumers which have an all-season demand of low temperature heat would be ideal. Greenhouses, indoor swimming pools or various industrial and business sectors would be suitable consumers.

# Inhaltsverzeichnis

<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>i</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>ii</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iv</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>v</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>9</b>
1.1 Potentiale der Abwasserwärmerückgewinnung .....	10
1.2 Abwasserenergieprojekt .....	11
1.3 Problemstellung und Forschungsfragen .....	11
<b>2 Prinzip der Abwasserreinigung .....</b>	<b>12</b>
2.1 Definition von Abwasser.....	12
2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen .....	14
2.3 Verfahren in der Abwasserreinigung .....	16
2.3.1 Mechanische Reinigung .....	17
2.3.2 Biologische Reinigung .....	20
2.3.3 Chemische Reinigung .....	23
2.3.4 Schlammbehandlung .....	24
<b>3 Energie in der Abwasserreinigung .....</b>	<b>31</b>
3.1 Energieverbraucher .....	32
3.2 Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz.....	34
3.2.1 Stromverbrauch durch Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung...34	
3.2.2 Faulgasерzeugung/-verwertung bei Anlagen mit Faulung .....	36
3.2.3 Wärmebedarf bei Anlagen mit Faulung und Klärschlammтrocknung .....	39
<b>4 Methodik .....</b>	<b>44</b>
4.1 Vorgehen im Abwasserenergieprojekt .....	44
4.1.1 Datenerhebung .....	44
4.1.2 World Cafè .....	44
4.2 Prozess-Netzwerk-Synthese .....	46
4.2.1 Algorithmus.....	46
4.2.2 Erstellen eines Technologienetzwerkes .....	48

<b>5</b>	<b>Optimierungsproblem der Kläranlage Freistadt .....</b>	<b>50</b>
5.1	Rahmenbedingungen der Optimierung .....	51
5.2	Das Technologienetzwerk der Optimierung .....	53
5.2.1	Rohmaterialien .....	55
5.2.2	Technologien .....	56
5.2.3	Zwischenprodukte .....	58
5.2.4	Endprodukte .....	59
5.2.5	Sonstiges.....	60
5.2.6	Quellenverzeichnis der Daten für die Optimierungsberechnung .....	61
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Optimierungsberechnung der Kläranlage Freistadt .....</b>	<b>63</b>
6.1	Basisszenario .....	63
6.2	Szenario 1: Wärmeversorgung des INKO-Betriebsansiedlungsgebiets .....	65
6.3	Szenario 2: Klärgasreinigung und anschließendes Einspeisen in das öffentliche Erdgasnetz.....	68
6.4	Szenario 3: Alternativen zur landwirtschaftlichen Klärschlamm Entsorgung mit Option der Phosphorrückgewinnung .....	70
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>72</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>73</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>75</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>77</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>78</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>84</b>
	Anhang 1: Poster des Abwasserenergieworkshops .....	84
	Anhang 2: Kapazitätsklassen der Technologien.....	89
	Anhang 3: Berechnungsergebnisse im Detail.....	91

## Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
€	Euro
A	Jahr
AEV	Abwasser-Emissionsverordnung
BHKW	Block-Heiz-Kraftwerk
BOKU	Universität für Bodenkultur
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
EGW	Einwohnergleichwert
EW	Einwohner
EZ	Einwohnerzahl
HT	Hochtemperatur
INKO	interkommunal
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
NT	Niedertemperatur
ÖWAV	österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
PNS	Prozess-Netzwerk-Synthese
PV	Photovoltaik
t	Tonne

TOC	totale organische Kohlenstoffgehalt
TS	Trockensubstanz
TSB	totalen Sauerstoffbedarf
TU	Technische Universität

# 1 Einleitung

Seit der Mensch sesshaft geworden ist und viele Personen auf engem Raum zusammenleben, hat die Beseitigung von verschmutzten Abwässern angefangen eine Rolle zu spielen. Bereits in der Antike war bekannt, dass Abwasser mittels Entwässerungsleitungen entsorgt werden muss. Der berühmteste Bau dieser Zeit ist die Cloaca Maxima (erbaut 6 Jhd. v. Chr.) des antiken Roms, die das Abwasser in den Tiber als Vorfluter<sup>1</sup> einleitete.

Im Mittelalter wurde aufgrund der vorangegangenen Völkerwanderungen der Siedlungswasserbau nicht mehr betrieben, was zu hygienischen Problemen führte. Küchen- und Waschwässer wurden auf den Straßen entleert und Fäkalien in undichten Gruben gesammelt. Dies führte zur Verunreinigung des Grundwassers, Seuchen und Epidemien waren die Folge. (Kainz et al., 2012)

Während der Industrialisierung verschlechterte sich die Situation an einigen Orten drastisch, was zur Einführung der Wasserleitungen und der Kanalisation führte. Grund- und Flusswasser wurden jedoch weiterhin verschmutzt. (Rubli et al., 2015)

Erst in der Neuzeit wurde damit begonnen Abwasser zu reinigen. Die erste Reinigungstechnologie waren Rieselfelder. Auf großflächigen wasserdurchlässigen Feldern wurde das Abwasser verrieselt, wodurch die Inhaltsstoffe mechanisch abfiltriert worden sind. (Fritsch & Hömpler, 2001/2009)

Heute wird auf Basis gesetzlichen Forderungen darauf geachtet, dass die Verunreinigung des Abwassers durch Reinigung auf ein vertretbares Ausmaß reduziert wird wodurch der Schutz der Gewässer gewährleistet ist. Deshalb können heutzutage, in Zeiten des Umweltschutzes und der Schonung fossiler Ressourcen, die Energieeinsparungs- und -gewinnungsmöglichkeiten auf Abwasserreinigungsanlagen fokussiert werden.

Diese Arbeit widmet sich der Analyse der Energiesituation von kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (Kläranlagen). Zu Beginn werden die Grundzüge der kommunalen Abwasserreinigung beschrieben sowie der Energieverbrauch und die Energieeinsparungsmöglichkeiten auf Kläranlagen erläutert. Desweiteren wurde eine Optimierungsberechnung der Kläranlage Freistadt durchgeführt, um die Energienutzung und -gewinnung zu verbessern. Neben der Abwasserwärmerückgewinnung mittels Wärmepumpen, die den thematischen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt, werden die Klärgasverwertungsmöglichkeiten untersucht.

## 1.1 Potentiale der Abwasserwärmerückgewinnung

Abwasser ist deutlich wärmer als das ursprüngliche Leitungswasser, da es zum Beispiel durch Duschen, Baden, Geschirrspülen und Kühlwasser aus der Industrie erwärmt wird. Somit fließt mit dem Abwasser eine große ungenutzte Energiemenge durch die Kanalisation zur Kläranlage. Ein Teil davon kann mit Hilfe von Abwasserwärmerückgewinnung durch Wärmepumpen wieder zugänglich gemacht werden.

Im Rahmen des Projekts *Energie aus Abwasser – Abwasserwärme- und –kältenutzung mittels hocheffizienter Großwärmepumpen (2009-2012)* wurden die Rahmenbedingungen sowie das theoretische, technische und wirtschaftliche Potential der Abwasserwärmerückgewinnung auf österreichischen Kläranlagen untersucht.

Bei dem theoretischen Potential von bivalenten Anlagen (zusätzliches Backup-Heizsystem) wird von einer Wärmeleistung von 1.300 bis 2.000MW ausgegangen. Bezogen auf eine Standardwohneinheit (90m<sup>2</sup> Fläche, 2,3 Einwohner und 91kWh/m<sup>2</sup>a bzw. 3,2kW Wärmeleistungsbedarf) reicht dies theoretisch zur Versorgung von einem Achtel aller Wohnungen in Österreich.

Für das technisch-realisiertbare Potential muss berücksichtigt werden, dass Wärmeabnehmer nicht zu weit von Kläranlagen entfernt sein dürfen. Desweiteren sind die Siedlungsstruktur bzw. –dichte und der Energiebedarf in der näheren Umgebung der Kläranlage von Bedeutung. Dies kann mit Hilfe von raumplanerischen Werkzeugen, die eine Abschätzung der Bebauungsstrukturen im Umkreis einer Kläranlage zulassen, analysiert werden. Der Bedarf im Umkreis von 1km von österreichischen Kläranlagen >20.000EW kann mit einer Abkühlung um 2,5°C des Abwassers gedeckt werden, was technisch jedenfalls möglich ist. Um den Bedarf im Umkreis von 2km zu decken, müsste das Abwasser um 4,9°C abgekühlt werden, was technisch durchführbar sein sollte. Die Versorgung im Umkreis von 4km würde einer Abkühlung um 8,1°C entsprechen, was die Möglichkeiten der theoretischen Betrachtung übersteigt.

Das wirtschaftliche Potential der Abwasserenergienutzung ist abhängig vom Wärmebedarf potentieller Abnehmer, von konkurrierenden Energieträger und von Hürden die für die Errichtung von Verbindungsleitungen überwunden werden müssen. Außerdem müssen die Energiepreise und deren Entwicklung sowie das Wärmeverteil- und -abgabesystem potentieller Abnehmer berücksichtigt werden. Aufgrund dieser Komplexität kann für Österreich noch keine sinnvolle Potentialabschätzung erstellt werden. (Ochnser et al., 2013)

Deshalb wird versucht in dem Nachfolgeprojekt *Abwasserenergieprojekts – Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energiekonzepte (2013-2016)* die technologische Machbarkeit, Kohlenstoffdioxidreduktion und die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Abwasserenergie wissenschaftlich zu untersuchen. Diese Arbeit wurde im Zuge dieses Projektes verfasst.

## 1.2 Abwasserenergieprojekt

Das *Abwasserenergieprojekt* ist ein von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft teilfinanziertes Projekt dessen Themenschwerpunkt die Bereitstellung sicherer, nachhaltiger und leistbarer Energien. Das Projektteam setzt sich zusammen aus folgenden Institutionen:

- Österreichische Energieagentur
- Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) mit den Instituten für Raumplanung und ländliche Neuordnung und Siedlungswasserbau
- Technischen Universität Graz (TU Graz) mit dem Institut für Partikel- und Prozesstechnik
- Austrian Institute für Technology (AIT)
- Energie Schweiz für Infrastrukturanlagen (InfraWatt bzw. Infra)
- Ochsner Wärmepumpen GmbH

Weitere Informationen stehen unter [www.abwasserenergie.at](http://www.abwasserenergie.at) zur Verfügung.

## 1.3 Problemstellung und Forschungsfragen

Die wirtschaftlichen Einsatzgrenzen von Abwasserenergiegewinnung sollen im Zuge des *Abwasserenergieprojektes* anhand von Fallbeispielen und unter Einbeziehung raumstruktureller Rahmenbedingungen systematisch untersucht werden. In dieser Arbeit wird die energetische Optimierung basierend auf ökonomischen Bedingungen mit Hilfe der Prozess-Netzwerk-Synthese der Kläranlage Freistadt (Oberösterreich) erarbeitet.

Es ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie können Kläranlagen als lokale Energiezentren aufgebaut werden?
- Welche Technologien sind für den Einsatz bei Kläranlagen besonders prädestiniert?
- Welche Parameter beeinflussen die technologische Struktur auf einer Kläranlage?

## 2 Prinzip der Abwasserreinigung

Die primäre Aufgabe der Abwasserreinigung ist der Schutz von Gewässern vor Verunreinigung, da das gesamte Ökosystem des Festlandes auf einen sauberen Süßwasserkreislauf angewiesen ist. (Resch & Schatz, 2010)

In den nächsten Kapiteln wird darauf eingegangen wie Abwasser definiert ist, wodurch es verschmutzt wird und wie die rechtlichen Grundlagen zur Reinigung von Abwasser festgelegt sind. Weiters wird das allgemeine Funktionsprinzip von Kläranlagen zur Abwasserreinigung und der anschließenden Klärschlammbehandlung erläutert.

### 2.1 Definition von Abwasser

Im Lexikon der Abwassertechnik ist nach Bischofsberger & Hegemann (2005) Abwasser folgendermaßen definiert:

Durch Gebrauch verändertes abfließendes Wasser und jedes in die Kanalisation gelangtes Wasser.

Man unterscheidet z.B.:

- a.) Schmutzwasser
- b.) Regenwasser
- c.) Fremdwasser
- d.) Mischwasser
- e.) Kühlwasser

Dabei wird als **Schmutzwasser** das durch Gebrauch verunreinigte Wasser bezeichnet. (Österreichisches Normungsinstitut, 2007) Somit besteht Schmutzwasser im Wesentlichen aus häuslichem, gewerblichem und industriellem Abwasser. (Resch & Schatz, 2010)

Unter dem Begriff **Regenwasser** (Niederschlagswasser) wird Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel und Nebel), der nicht im Boden versickert und von der Bodenoberfläche oder von Gebäudeaußenflächen in das Entwässerungssystem eingeleitet wird, verstanden.

**Fremdwasser** ist ein unerwünschter Abfluss in einem Entwässerungssystem, wie z.B.: infiltriertes<sup>ii</sup> Grundwasser oder im Schmutzwasserkanal durch Schachtabdeckungen eingedrungenes Regenwasser.

Werden Schmutz-, Regen- und gegebenenfalls Fremdwasser in einen gemeinsamen Entwässerungssystem abgeleitet, wird der Abfluss als **Mischwasser** bezeichnet.

**Kühlwasser** ist im Allgemeinen unverschmutztes, durch Gebrauch erwärmtes Abwasser, das zur Wärmeübertragung verwendet wurde. (Österreichisches Normungsinstitut, 2007)

Charakterisiert wird konventionelle Verschmutzung von Abwasser über den BSB- und CSB-Wert, dem Gehalt an Stickstoffverbindungen und Phosphor sowie dem TOC- und TSB-Wert.

- Der BSB-Wert steht für den biologischen Sauerstoffbedarf. Das ist jene Menge an Sauerstoff, die bei 20°C unter Dunkelheit in einer anzugebenden Anzahl an Tagen beim Abbau der organischen Stoffe durch Mikroorganismen verbraucht wird. Meistens wird der BSB<sub>5</sub> bestimmt, wobei 5 dabei für den Abbau innerhalb von 5 Tagen steht. (Pöppinghaus et al., 1994) Durchschnittlich verursacht eine Person in Österreich 60g BSB<sub>5</sub>-Fracht pro Tag. (Kainz et al., 2012)
- Der CSB-Wert beschreibt den chemischen Sauerstoffbedarf. Das ist jene Menge an Sauerstoff, die für eine chemische Oxidation der organischen und anorganischen Inhaltsstoffe verbraucht wird. Dabei können Kaliumpermanganat oder Kaliumdichromat als Oxidationsmittel eingesetzt werden. (Pöppinghaus et al., 1994) Im Mittel beträgt die tägliche CSB-Fracht eines Einwohners von Österreich 120g pro Tag. (Kainz et al., 2012)
- Stickstoff gelangt hauptsächlich über städtisches Abwasser, aufgrund von Harnstoff, zur Kläranlage. Aber auch gewerbliche oder landwirtschaftliche Abwässer (tierischer Harnstoff, Düngemittel) können Stickstoffverbindungen enthalten. Stickstoff muss größtenteils aus dem Abwasser entfernt werden, da er in zu großen Mengen eine eutrophierende<sup>iii</sup> Wirkung auf Gewässer haben kann. (Bever et al., 2002)
- Phosphor gelangt in primär durch menschliche Stoffwechselprodukte in das Abwasser. Stark abgenommen hat der früher bedeutsamere Eintrag über Waschmittel. Phosphor ist, wie Stickstoff, ein wichtiger Nährstoff für das Pflanzenwachstum und kann ebenfalls Eutrophierung hervorrufen. (Kainz, et al., 2012) Desweiteren ist Phosphor ein endlicher Rohstoff der allerdings einer der Hauptbestandteile von mineralischen Düngemitteln ist. Eine Phosphorrückgewinnung aus Abwasser wäre eine mögliche dezentrale und nachhaltige Rohstoffquelle. (Egle et al., 2014a)
- Als TOC-Wert wird der totale organische Kohlenstoffgehalt im Abwasser bezeichnet. Er wird anhand thermischer Oxidation der organischen Substanzen bestimmt, d.h. die Abwasserinhaltsstoffe werden verbrannt und die Menge an gebildetem CO<sub>2</sub> (Kohlenstoffdioxid) gemessen. (Pöppinghaus et al., 1994)
- Der TSB-Wert stellt den totalen Sauerstoffbedarf des Abwassers dar. Dies ist die theoretische Menge an Sauerstoff, die zur Oxidation aller im Abwasser enthaltenen, oxidierbaren Stoffen notwendig ist. Damit werden sowohl organische als auch anorganische, oxidierbare Verbindungen gemessen. (Pöppinghaus et al., 1994)

Um Abwassermengen definieren und vergleichen zu können wurden Kennzahlen eingeführt:

- Die Einwohnerzahl (EZ) steht für die tatsächliche Anzahl an Personen die an eine Kläranlage angeschlossen sind. (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2012)
- Der Einwohnergleichwert (EGW) dient als Vergleichswert von der Schmutzfracht gewerblichem Abwassers und der Schmutzfracht aus häuslichem Abwasser einer einzelnen Person. Er kann sich auf verschiedene charakteristische Werte des Abwassers beziehen, wie z.B.: Abwassermenge, chemischer Sauerstoffbedarf, biologischer Sauerstoffbedarf oder die Schlammmenge. In der Regel wird er auf den chemischen Sauerstoffbedarf bezogen. (Bischof & Hosang, 1989) Dabei wird der EGW durch die Division der mittleren täglichen Schmutzfracht im Abwasser eines Betriebes durch die CSB-Schmutzfracht einer Person (120g/d) erhalten.
- Der Einwohnerwert (EW) drückt die tatsächliche Belastung einer Kläranlage aus. Er ergibt sich aus der Addition von Einwohnerzahl und Einwohnergleichwert (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2012):

$$EW = EZ + EGW$$

## 2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die rechtlichen Grundlagen für die Benutzung, den Schutz und die Reinhaltung von Gewässern sowie der Schutz vor den Gefahren des Wassers (z.B.: Hochwasser) bildet in Österreich das Wasserrechtsgesetz von 1959. Darin wird das Ziel der Gewässerreinhaltung in § 30 (1) folgendermaßen formuliert:

Alle Gewässer einschließlich des Grundwassers sind im Rahmen des öffentlichen Interesses und nach Maßgabe der folgenden Bestimmungen so reinzuhalten und zu schützen,

1. dass die Gesundheit von Mensch und Tier nicht gefährdet werden kann,
2. dass Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes und sonstige fühlbare Schädigungen vermieden werden können,
3. dass eine Verschlechterung vermieden sowie der Zustand der aquatischen Ökosysteme und der direkt von ihnen abhängenden Landökosysteme und Feuchtgebiete im Hinblick auf ihren Wasserhaushalt geschützt und verbessert werden,
4. dass eine nachhaltige Wassernutzung auf der Grundlage eines langfristigen Schutzes der vorhandenen Ressourcen gefördert wird,

5. dass eine Verbesserung der aquatischen Umwelt, u.a. durch spezifische Maßnahmen zur schrittweisen Reduzierung von Einleitungen, Emissionen und Verlusten von gefährlichen Schadstoffen gewährleistet wird.

Insbesondere ist Grundwasser sowie Quellwasser so reinzuhalten, dass es als Trinkwasser verwendet werden kann. Grundwasser ist weiters so zu schützen, dass eine schrittweise Reduzierung der Verschmutzung des Grundwassers und Verhinderung der weiteren Verschmutzung sichergestellt wird. Oberflächengewässer sind so reinzuhalten, dass Tagwässer zum Gemeingebrauch sowie zu gewerblichen Zwecken benutzt und Fischwässer erhalten werden können.

Mit einer Novelle des Wasserrechtsgesetzes im Jahre 1990 reagierte man mit § 33 b (1) auf die ökologischen Einflüsse von Nährstoffen, wie z.B. auf die eutrophierende Wirkung von Phosphor und Stickstoff. In dieser wird eine weitgehende Eliminierung dieser Nährstoffe gefordert:

Bei der Bewilligung von Abwassereinleitungen in Gewässer oder in eine bewilligte Kanalisation hat die Behörde jedenfalls die nach dem Stand der Technik möglichen Auflagen zur Begrenzung von Fracht und Konzentration schädlicher Abwasserinhaltsstoffe vorzuschreiben.

Der Stand der Technik sowie die maximal zulässigen Werte für Stoffkonzentrationen im Ablauf einer Kläranlage werden in der Abwasser-Emissionsverordnung (AEV) des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft festgelegt. Dabei wird zwischen der 1., 2. und 3. AEV unterschieden. Kainz et al. (2012) formulieren diese zusammenfassend wie folgt:

- Die 1. Abwasser-Emissionsverordnung für kommunales Abwasser (Mai 1996) gilt für Abwasserreinigungsanlagen von Siedlungen, Gemeinden, Wassergenossenschaften und Wasserverbänden mit einem Schmutzfrachtanfall von mehr als 50 EW<sub>60</sub>. Die Verordnung unterscheidet vier Anlagengrößenbereiche mit jeweils unterschiedlichen Emissionsanforderungen.
- Die 2. Abwasser-Emissionsverordnung für kommunales Abwasser (Entwurf 1995) gilt für Abwasserreinigungsanlagen von Einzelobjekten (ausgenommen solche in Extremlagen) und Siedlungen mit einem Schmutzfrachtanfall bis 50 EW<sub>60</sub> (die Reinigungsanforderungen des Entwurfes der 2. AEV für kommunales Abwasser wurden in die ÖNORM B 2502 Teil 1 und Teil 2 eingearbeitet).
- Die 3. Abwasser-Emissionsverordnung für kommunales Abwasser (Dezember 1993) gilt für Abwasserreinigungsanlagen von Einzelobjekten in Extremlagen (z.B. Schutzhütten, Jagdhütten)

Die derzeit geforderten maximal zulässigen Ablaufkonzentrationen für Kläranlagen nach der Rechtsvorschrift für 1. AEV (Fassung vom 18.09.2014) sind in nachstehender *Tabelle 1* abgebildet.

**Tabelle 1: Maximal zulässige Stoffkonzentrationen im Ablauf einer Kläranlage, Kainz et al. (2012)**

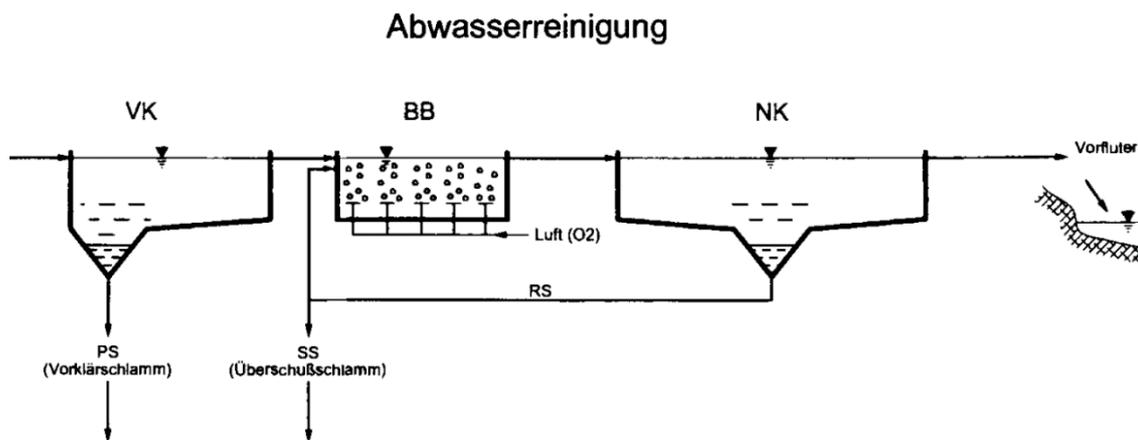
	Gr.-Kl. I	Gr.-Kl. III	Gr.-Kl. III	Gr.-Kl. IV
	50-500 EW <sub>60</sub>	501-5.000 EW <sub>60</sub>	5.001-50.000 EW <sub>60</sub>	>50.000 EW <sub>60</sub>
<b>BSB<sub>5</sub></b> <b>[mg/l]</b>	25	20	20	15
<b>CSB</b> <b>[mg/l]</b>	90	75	75	75
<b>TOC</b> <b>[mg/l]</b>	30	25	25	25
<b>NH<sub>4</sub>-N</b> <b>[mg/l]</b>	10	5	5	5
<b>Gesamt-P</b> <b>[mg/l]</b>	-	2*	1	1

\*ab 1.000EW<sub>60</sub>

Als Mitglied der Europäischen Union muss in Österreich allerdings auch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie aus dem Jahr 2001 realisiert werden. Diese wurde 2003 mit einer Novelle im Wasserrechtsgesetz in nationales Recht umgesetzt. Primäre Anforderungen dieser Richtlinie sind eine flussgebietsbezogene<sup>iv</sup> Betrachtung, Monitoring der Qualität von Fließgewässern, Erreichen eines guten Zustandes (guter chemischer & guter ökologischer Zustand) von Fließgewässern und Seen sowie ein Verschlechterungsverbot von Wasserkörpern. (Kainz et al., 2012)

## 2.3 Verfahren in der Abwasserreinigung

Kläranlagen sind das Herzstück der Abwasserreinigung. Durch die Kanalisation werden private, gewerbliche und industrielle Abwässer gesammelt und zur Kläranlage befördert. In *Abbildung 1* ist das Fließschema der Abwasserreinigung einer konventionellen Kläranlage dargestellt.



**Abbildung 1: Schema der mechanisch-biologischen Abwasserreinigung, Hellmann & Riegler (2003)**

VK...Vorklärung	PS... Primärschlamm (Vorklärschlamm)
BB... Belebungsbecken	SS... Sekundärschlamm (Überschussschlamm)
NK... Nachklärung	RS... Rücklaufschlamm

Die Abwasserreinigung lässt sich grob in drei Teilbereiche einteilen:

- Mechanische Reinigung
- Biologische Reinigung
- Chemische Reinigung

Welche Kombination an Verfahren angewendet wird, hängt von der Beschaffenheit des Abwassers sowie der Kläranlage ab. Dabei bestimmende Faktoren sind die Abwassermenge, die Herkunft (kommunal oder industriell), der vorhandene Platz sowie im Falle eines Umbaus die bereits vorhandene Anlagensituation. (Kainz et al., 2012)

Im folgenden Abschnitt werden die gängigsten Verfahren der kommunalen Abwasserreinigung und der Klärschlammbehandlung beschrieben.

### 2.3.1 Mechanische Reinigung

Beim Eintritt in eine Kläranlage wird das Abwasser mit Hilfe eines Zulaufhebwerkes, meist Schneckenpumpen, auf eine Höhe über dem Niveau des Kläranlagengeländes angehoben. Damit ist ein kostengünstiger Betrieb der Kläranlage, aufgrund des freien Gefälles, möglich. Anschließend wird mit der mechanischen Abwasserreinigung begonnen, die sich aus Rechen, Sand- und Fettfang sowie der Vorklärung zusammensetzt. (Hellmann & Riegler, 2003)

### 2.3.1.1 Rechen

Rechenanlagen haben die Aufgabe grobe Inhaltsstoffe (Dosen, Holzstücke, Flaschen, Reinigungstücher o.ä.) aus dem Abwasser zu entfernen. Dies dient dem Schutz der Kläranlage (hauptsächlich der Pumpen), da diese Inhaltsstoffe Betriebsstörungen verursachen können. Früher wurden dafür einfache Stabrechen eingesetzt, heute werden üblicherweise Umlaufrechen, Stufenrechen, Korbrechen oder Siebe nachgeschaltet, um eine bessere Reinigungsleistung zu erzielen (siehe *Abbildung 2*). Das anfallende Rechengut wird anschließend in Containern gesammelt und durch Verbrennung entsorgt. (Kainz et al., 2012)

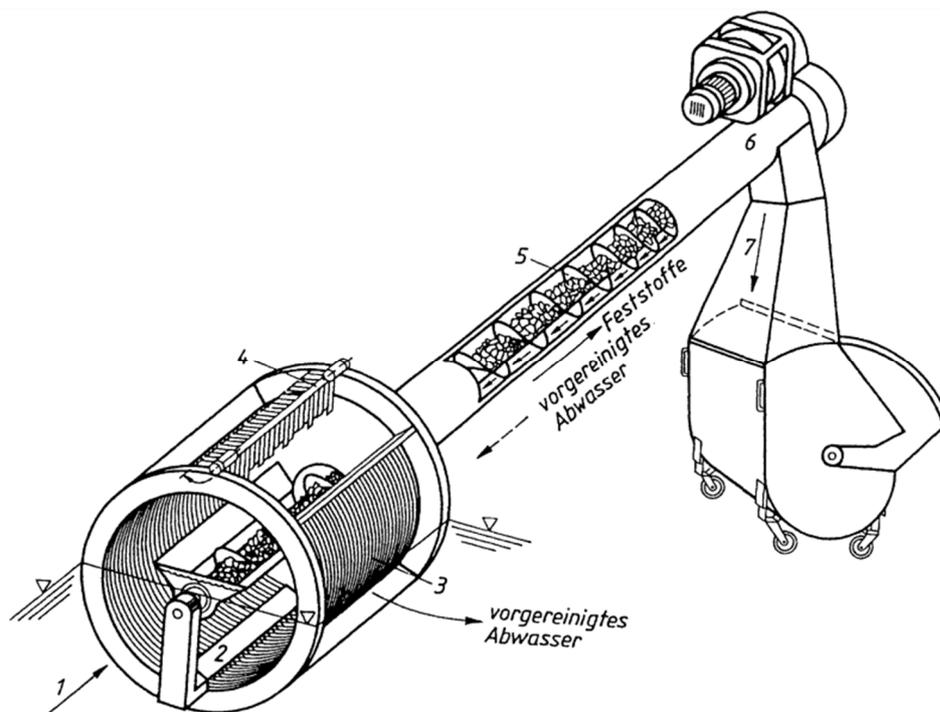


Abbildung 2: Feinrechen bzw. Siebrechen nach Huber, Bischof & Hosang (1989)

### 2.3.1.2 Sand- und Fettfang

Der Sand- und Fettfang dient ebenfalls dem Schutz von nachgeschalteten Anlagentechnologien. Abwasser, vor allem Mischwasser, enthält große Mengen an Sand. Dieser ist biologisch nicht abbaubar und kann zu Betriebsstörungen, aufgrund von Ablagerungen oder Verschleiß, führen. Bei der Trennung des Sandes von den übrigen organischen Feststoffen wird das hohe spezifische Gewicht und die dadurch resultierende, höhere Absinkgeschwindigkeit ausgenutzt. D.h. die Fließgeschwindigkeit im Sandfang wird so gewählt, dass körnige Sinkstoffe sedimentieren<sup>v</sup> können. (Bischof & Hosang, 1989) Vor der Entsorgung des Sandes wird dieser in einer Sandwascheinrichtung von organischen Stoffen gereinigt und anschließend deponiert.

Eine Wiederverwertung des Sandes ist aus hygienischen Gründen nicht möglich. (Kainz et al., 2012)

Fette und Öle sind zwar zu 100% organische Stoffe, können aber aufgrund ihrer physikalischen Beschaffenheit (geringere Dichte als Wasser) zu Verstopfungen im weiteren Anlagenverlauf führen. Zudem können sie die biologische Reinigung hemmen, indem sie durch Ablagerung die Nährstoffaufnahme der Mikroorganismen verringern. Für die Fettabscheidung wird die ruhige Oberfläche des Sandfangs genutzt, wodurch Fette, Öle und leichte Schwebstoffe auftreiben. (Pöppinghaus et al., 1994)

Früher wurden für diese Prozesse Lang- und Rundsandfangbecken eingesetzt. Heute üblicher ist der belüftete Sandfang, bei dem durch seitliches Einblasen von Druckluft eine Umwälzströmung mit einer Umfangsgeschwindigkeit von ca. 0,3 m/s erzeugt wird (siehe *Abbildung 3*). Die Fett- und Ölabscheidung erfolgt bei dieser Bauform an einer Tauchwand, die einen Bereich mit geringen Turbulenzen schafft. (Kainz et al., 2012)

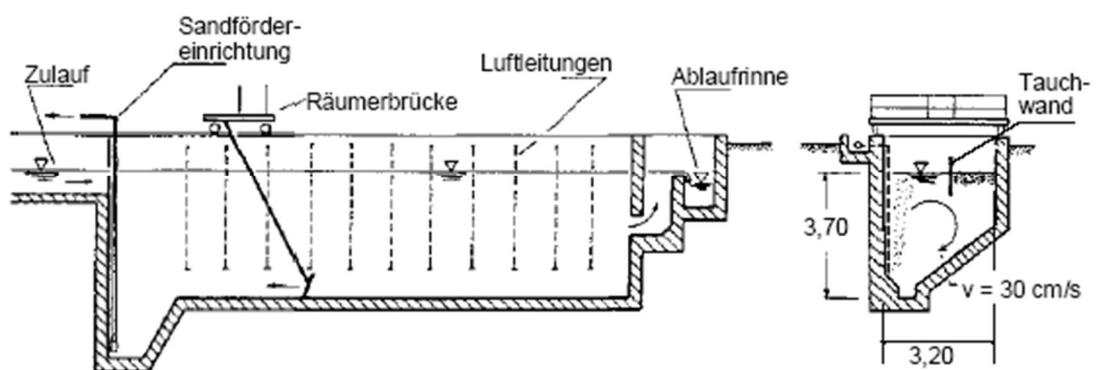


Abbildung 3: Belüfteter Sandfang, Kainz et al. (2012)

### 2.3.1.3 Vorklärung

Die Vorklärung hilft bei der Feststoffentfernung und bringt gleichzeitig eine Entlastung der biologischen Reinigungsstufe mit sich. Sie findet in einem Absetzbecken statt, in dem absetzbare, überwiegend organische Bestandteile aussedimentieren oder aufschwimmen und dadurch aus dem Abwasser entfernt werden können (siehe *Abbildung 4*). Dieser Schlamm wird als Vorklärschlamm

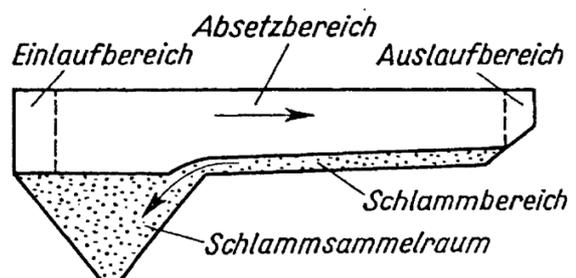


Abbildung 4: Darstellung der verschiedenen Beckenbereiche eines Absetzbeckens, Bischof & Hosang (1989)

oder Primärschlamm bezeichnet. Die Effektivität eines Absetzbeckens hängt primär von der Absetzzeit ab. (Kainz et al., 2012) Aus der Absetzkurve in *Abbildung 5* lässt sich erkennen, dass absetzbare Schwebestoffe nach 1 Stunde zu ca. 92%, nach 1,5 Stunden zu ca. 97% und innerhalb von 2 Stunden zu 100% aussedimentiert sind. Trotzdem wird die Absetzzeit meistens auf 2,5 Stunden bemessen, da die tatsächliche Absetzzeit geringer ist als die berechnete. Das Verhältnis der beiden Absetzzeiten wird als hydraulischer Wirkungsgrad eines Absetzbeckens bezeichnet. (Bischof & Hosang, 1989)

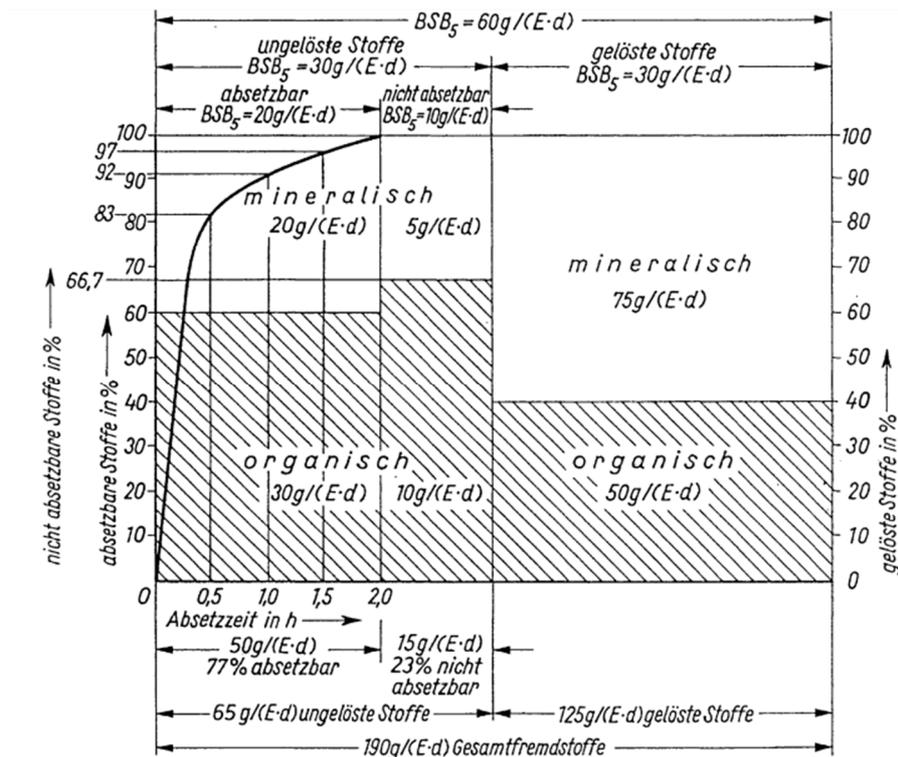


Abbildung 5: Absetzkurve städtischer Abwässer, Bischof & Hosang (1989)

### 2.3.2 Biologische Reinigung

Für die biologische Reinigung wird das natürliche Phänomen der Selbstreinigungskraft von Flüssen auf industrieller Basis angewandt. Biologisch abbaubare Stoffe werden von Bakterien aus der Gruppe der Mikroorganismen in Energie und Zellmasse umgewandelt und können anschließend mechanisch aus dem Abwasser abgetrennt werden. (Bischof & Hosang, 1989)

Unter den unterschiedlichen biologischen Reinigungsverfahren, wie Belebungsverfahren, Membranbelebungsverfahren, Festbettverfahren, Tropfkörper, Rotationstauschkörper, Tauchkörper und Teichanlagen hat sich das Belebungsverfahren durchgesetzt. (Kainz et al., 2012)

### 2.3.2.1 Belebungsverfahren

Das Belebungsverfahren setzt sich im Wesentlichen aus zwei Abschnitten zusammen (siehe *Abbildung 6*):

1. Belebungsbecken
2. Absetzbecken (Nachklärung)

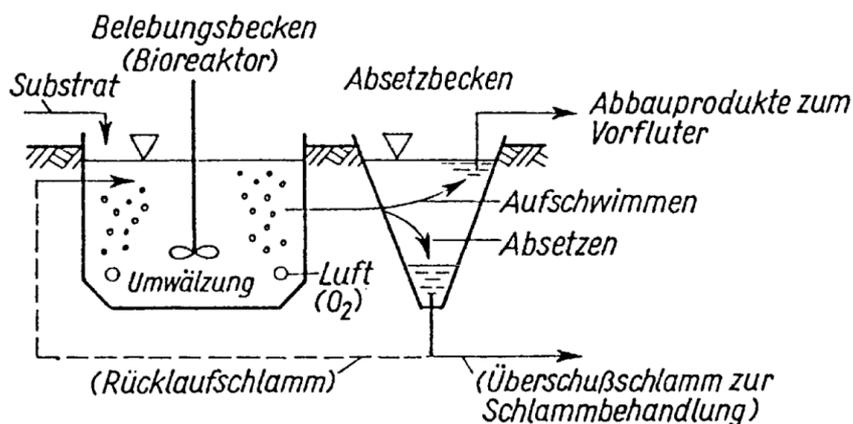


Abbildung 6: Systemskizze des Belebungsverfahrens, Bischof & Hosang (1989)

Im Belebungsbecken werden die noch enthaltenen organischen Kohlenstoffverbindungen durch aerobe<sup>vi</sup> Mikroorganismen umgewandelt. Damit dies geschieht müssen laut Resch & Schatz (2010) nachstehende Anforderungen erfüllt sein:

- Ausreichende Anreicherung von Biomasse (gemessen als  $TS_{BB}^1$ ) für die angestrebte Reinigungsleistung.
- Ausreichende Luftzufuhr zur Deckung des Sauerstoffverbrauches und Anpassung an schwankende Belastungsverhältnisse.
- Ausreichende Durchmischung zur Vermeidung von Ablagerungen und Sicherstellung der notwendigen Reaktionskontakte.

Unter diesen Bedingungen adsorbieren<sup>vii</sup> Mikroorganismen biologisch abbaubare Inhaltsstoffe, schließen diese mit Hilfe von Enzymen auf und nehmen sie in das Innere ihrer Zelle auf. Dort werden die Inhaltsstoffe unter Sauerstoffverbrauch zu H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Nitrate und Sulfate umgewandelt.

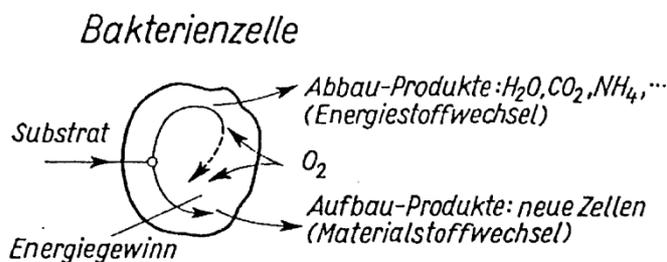


Abbildung 7: Stoffwechsel der Bakterien, Bischofsberger & Hegemann (2005)

<sup>1</sup> Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken

Diese Inhaltsstoffe verbleiben im Abwasser als Gas oder Salz (Energiestoffwechsel) (siehe *Abbildung 7*). Desweiteren wird durch Zellaufbau und Zellteilung neue Zellsubstanz gebildet (Materialstoffwechsel), wodurch die Mikroorganismen zu einer flockigen Masse (Belebtschlamm) agglomerieren. (Bischof & Hosang, 1989)

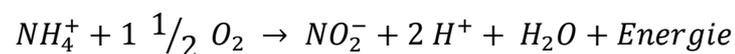
In einem nachgeschalteten Absetzbecken wird der Belebtschlamm erneut mechanisch (Sedimentation) vom Abwasser abgetrennt. Ein Teil des Belebtschlammes wird dem Belebungsbecken allerdings wieder zugeführt, um eine Anreicherung des Schlammes und eine Intensivierung der Abbauprozesse zu erreichen (Rücklaufschlamm).

Der restliche Teil des Schlammes wird aus dem System Belebungsbecken – Absetzbecken abgezogen, eingedickt und der Schlammbehandlung zugeführt. Dieser wird als Sekundärschlamm oder Überschussschlamm bezeichnet. (Kainz et al., 2012)

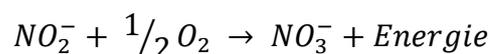
### 2.3.2.2 Nitrifikation

Wie bereits erwähnt, können zu viele Nährstoffe im Abwasser zu einer Eutrophierung des Vorfluters führen. Daher muss Stickstoff gegebenenfalls gezielt mittels Nitrifikation und Denitrifikation aus dem Abwasser entfernt werden (siehe *Abbildung 8*). Bereits in der Kanalisation oder im Vorklärbecken wird organisch gebundener Stickstoff im Abwasser zu Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) umgewandelt. (Bischof & Hosang, 1989) Die Elimination des Stickstoffs mittels spezieller Mikroorganismen erfolgt dann zweistufig in der Kläranlage:

1. Ammonium wird durch Nitrosomonase zu Nitrit oxidiert:



2. Nitrit wird mit Hilfe von Nitrobacter zu Nitrat oxidiert:



Diese Umwandlung findet meistens parallel zum aeroben Abbau organischer Stoffe im Belebungsbecken statt. Die dadurch erzielbare Stickstoffentfernung reicht aber zur Einhaltung der Grenzwerte in Österreich nicht aus. Aus diesem Grund kommt zusätzlich häufig die mikrobielle Denitrifikation zum Einsatz. (Kainz et al., 2012)

### 2.3.2.3 Mikrobielle Denitrifikation

Kainz et al. (2012) beschreiben die mikrobielle Denitrifikation mit Hilfe eines mikrobiologisch nicht ganz korrektem, aber leicht verständlichem Gedankenexperiment wie folgt:

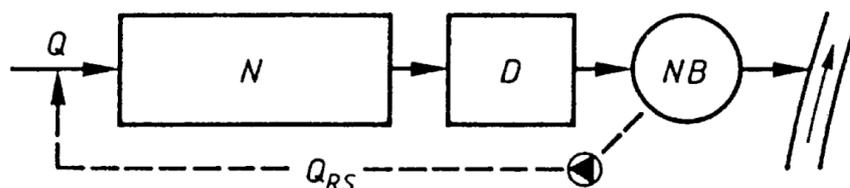
Viele der im Belebtschlamm vorhandenen Mikroorganismen stellen bei fehlendem gelösten Sauerstoff, aber Vorkommen von chemisch gebundenem Sauerstoff (anoxisches<sup>viii</sup> Milieu) in Form von Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) ihr Enzymsystem so um, dass sie den benötigten Sauerstoff durch

Aufspaltung von Nitrat beziehen können. Der dabei frei werdende Stickstoff entweicht gasförmig in die Luft und wird somit aus dem Abwasser entfernt. Die Denitrifikation erfolgt durch jene Mikroorganismen, die die Kohlenstoffverbindungen abbauen. Unter diesen Milieubedingungen erfolgt der Stoffwechsel dieser Mikroorganismen langsamer als wenn gelöster Sauerstoff vorhanden ist.

Daher sind für eine schnelle und wirksame Denitrifikation folgende Punkte erforderlich:

- Kein freier gelöster Sauerstoff darf vorhanden sein, da sonst die Organismen diesen bevorzugen würden.
- Der Stickstoff muss als Nitrat oder Nitrit vorliegen, eine Nitrifikation ist somit Voraussetzung für eine mikrobielle Denitrifikation.
- Eine hohe Konzentration an Mikroorganismen muss vorhanden sein.
- Ein hoher Sauerstoffbedarf muss gegeben sein. Mikroorganismen müssen mit gut abbaubaren Schmutzstoffen in Verbindung gebracht werden.

Diese Anforderungen können durch eine Teilung des Belebungsbeckens in einem zweiten Abschnitt realisiert werden (siehe *Abbildung 8*). (Kainz et al., 2012)



**Abbildung 8:** Eine Möglichkeit der Anordnung von Nitrifikation und Denitrifikation, Bischof & Hosang (1989)

N... Nitrifikation	Q... Zulauf
D... Denitrifikation	Q <sub>RS</sub> ... Rücklaufschlamm
NB... Nachklärbecken	

Weitere Anordnungsmöglichkeiten der beiden Prozesse zur Nitrifikation und Denitrifikation sind z.B.: simultan oder alternierend. Welche dieser Methoden gewählt wird hängt von der Stickstoffbelastung des Abwassers, dem Platzangebot auf der Kläranlage sowie der erforderlichen Reinigungsleistung und Reinigungsgeschwindigkeit ab. (Bischof & Hosang, 1989)

### 2.3.3 Chemische Reinigung

Um gesetzliche Emissionsgrenzwerte einzuhalten, müssen gegebenenfalls bestimmte Nährstoffe mittels weiterführender Abwasserreinigung aus dem Abwasser entfernt werden. Für die Abtrennung von Phosphor kommt am häufigsten eine chemische Reinigungsstufe zum Einsatz. (Hellmann & Riegler, 2003)

### 2.3.3.1 Phosphorelimination

Phosphor muss, wie Stickstoff, aufgrund seiner eutrophierenden Eigenschaft größtenteils aus dem Abwasser entfernt werden. (Pöppinghaus et al., 1994) Mit der mechanisch-biologischen Reinigung werden ca. 20-40% des Phosphors aus kommunalem Abwasser entfernt. Durch eine Kombination aus anaeroben<sup>ix</sup>, anoxischen und aeroben Milieubedingungen ist eine Steigerung der Abtrennung des Phosphors möglich, dies reicht aber zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nicht aus. Eine chemische Fällung, durch Zugabe von Eisen- und/oder Aluminiumsalzen in das Belebungsbecken (Simultanfällung), ist erforderlich. Dabei werden gelöste Phosphate in ungelöste Metallphosphatverbindungen überführt und mit dem Klärschlamm gemeinsam ausgetragen. (Resch & Schatz, 2010)

### 2.3.4 Schlammbehandlung

Der bei der Abwasserreinigung entstehende Klärschlamm geht, wenn er nicht möglichst zügig weiterverarbeitet wird, in eine saure Gärung über. Dabei nimmt die Entwässerbarkeit rasant ab und es bilden sich übelriechende Stoffe. Desweiteren ist der Klärschlamm reich an pathogenen<sup>x</sup> Keimen und Wurmeiern und deshalb hygienisch bedenklich. Eine Behandlung des Klärschlammes ist aufgrund des hohen Wassergehalts mit hohem Aufwand verbunden, weshalb darauf zu achten ist das Wasser abzutrennen. (Pöppinghaus et al., 1994)

Aufgrund dieser Voraussetzungen ergeben sich nach Kainz et al. (2012) folgende Ziele der Schlammbehandlung:

- Verringerung der anfallenden Schlammmenge
- Veränderung der Eigenschaften des Schlammes so, dass er nicht mehr fault
- Entsorgungsmöglichkeit ohne Umweltbelästigung und Umweltbelastung

Die Schlammbehandlung setzt sich zusammen aus:

- Schlammvoreindickung
- Schlammstabilisierung (aerob/anaerob)
- Schlammmentwässerung
- Schlamm Trocknung
- Schlamm entsorgung

Das Fließschema der Schlammbehandlung ist in *Abbildung 9* dargestellt.

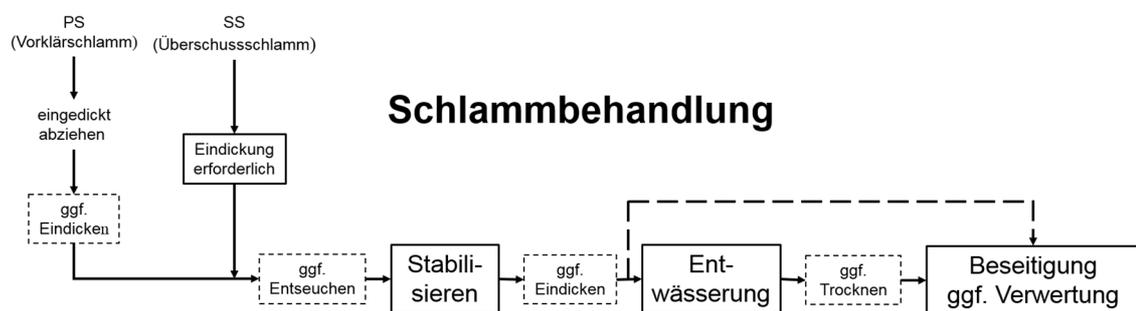


Abbildung 9: Fließschema der Schlammbehandlung, Hellmann & Riegler (2003)

### 2.3.4.1 Schlammvoreindickung

Unter Schlammeindickung wird die Aufkonzentration der Schlammfeststoffe in einem immer noch flüssigen Milieu (Trockensubstanz<sup>xi</sup> (TS) meist weniger als 10%) verstanden. Sie erfolgt vor einer anaeroben Schlammstabilisierung, damit die benötigten Reaktorvolumina kleiner ausfallen.

Primärschlämme, die in der Vorklärung anfallen, werden häufig bereits im Schlammtrichter des Vorklärbeckens eingedickt und können direkt der Schlammstabilisierung zugeführt werden.

Sekundärschlämme, die während der biologischen und ggf. chemischen Abwasserreinigung anfallen, weisen einen sehr geringen Feststoffgehalt von etwa 0,7-1,2% Trockensubstanz auf. Eine Reduzierung des Wassergehalts kann mittels statischer oder maschineller Eindicker realisiert werden. (Hellmann & Riegler, 2003) Für die statische Voreindickung wird der Klärschlamm 1-3 Tage lang in trichterförmigen oder zylindrischen Behältern gelagert und das Trübwasser abgezogen. Rührstäbe (Krählwerk) können die Aufkonzentrierung des Schlammes verbessern. (Resch & Schatz, 2010) Für Anlagen größer als 10.000 EW wird für die Abtrennung des Wassers heute zumeist eine maschinelle Schlammmentwässerung gewählt. Dafür werden Siebmaschinen in Form von Bandgeräten oder Trommeleindickern sowie Zentrifugen eingesetzt. Für die Eindickung

mittels Siebmaschinen ist oft eine Flockung<sup>xii</sup> mittels Konditionierungsmittel Voraussetzung. (Hellmann & Riegler, 2003)

### 2.3.4.2 Schlammstabilisierung

Grundsätzlich wird bei der Schlammstabilisierung zwischen aeroben und anaeroben Verfahren unterschieden. Welches Verfahren gewählt wird hängt von der Kläranlagengröße, der Zusammensetzung des Abwassers und der Anforderung an die Reinigungsleistung ab.

Zur Bewertung des Stabilisierungsgrades wird für beide Verfahren der Glühverlust angewendet. Dieser wird bestimmt indem vorgetrocknetes Material für etwa 1 h bei 550°C geglüht wird, bis keine Gewichtsabnahme mehr zu beobachten ist. Der Gewichtsverlust (Glühverlust) entspricht dem Gehalt an organischen Substanzen und der Glührückstand dem mineralischen Anteil. Bei frischem Klärschlamm ist das Verhältnis zwischen organischen und mineralischen Substanzen ca. 70:30. (Pöppinghaus et al., 1994) In *Tabelle 2* ist der Stabilisierungsgrad im Verhältnis zum Glühverlust dargestellt.

**Tabelle 2: Stabilisierungsgrad von Klärschlamm in Relation zum Glühverlust, Resch & Schatz (2010)**

Glühverlust	Stabilisierungsgrad
< 55%	gut stabilisiert
55% - 65%	teilstabilisiert
> 65 %	nicht stabilisiert

#### Aerobe Schlammstabilisierung

Für die aerobe Schlammstabilisierung wird der Klärschlamm belüftet und durch aerobe Mikroorganismen soweit abgebaut, dass keine Faulung mehr eintreten kann. (Kainz et al., 2012) Das Verfahren ist gekennzeichnet durch gute Reinigungsleistung, geringe Wartungs- und Baukosten sowie einer großen Prozessstabilität. Allerdings ist der Energiebedarf für die Belüftung und die Umwälzung sehr hoch, weshalb dieses Verfahren meist für kleinere Kläranlagen (< 20.000 EW) angewendet wird. (Resch & Schatz, 2010)

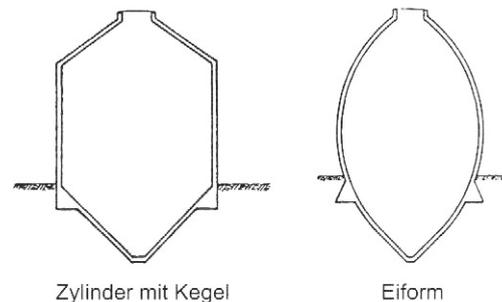
Die aerobe Schlammstabilisierung kann separat oder gemeinsam mit der Abwasserreinigung im Belebungsbecken stattfinden. Kläranlagen mit aerober Stabilisierung besitzen allerdings keine Vorklärbecken. (Müller et al., 2008/2010)

#### Anaerobe Schlammstabilisierung

Bei der anaeroben Schlammstabilisierung wird der Klärschlamm in einem geschlossenen Faulbehälter (Faulturm) unter Luftabschluss ausgefault. (Kainz et al., 2012) Trotz der höheren Investitionskosten für einen Faulbehälter, hat sich dieses Verfahren, vor allem aufgrund der Erzeugung des wertvollen methanhaltigen Faulgases (=Klärgas),

durchgesetzt. Mit Hilfe des Klärgases kann auf größeren Kläranlagen der Wärmebedarf des Faulungsprozesses ganzjährig gedeckt werden. Häufig ist sogar der Betrieb eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) zur Stromproduktion und Abwärmenutzung möglich. In Einzelfällen wird das Faulgas auf Erdgasqualität aufgereinigt und in das öffentliche Gasnetz eingespeist oder als Treibstoff verwertet. (Hellmann & Riegler, 2003)

Faulbehälter stellen aufgrund ihrer Form auf Kläranlagen meist auffällige Bauwerke dar. Die häufigsten Bauformen sind die Zylinderform (oben und unten mit zwei angesetzten Kegel) und die Eiform (siehe *Abbildung 10*).



**Abbildung 10: Bauformen von Faulbehältern (Schnitt), Kainz et al. (2012)**

Damit die Mikroorganismen in einem Faulbehälter ihre Funktion erfüllen, müssen bestimmte Bedingungen eingehalten werden. Die grundsätzlichen Anforderungen sind eine ausreichende Menge an Nährstoffen, Dunkelheit, Luftabschluss, Temperaturen über 4°C, eine ausreichende Reaktionszeit und ein schwach alkalischer pH-Bereich. Die meisten Faulbehälter werden im Bereich zwischen 30°C und 37°C betrieben, da sich die Faulzeit mit ansteigender Temperatur verkürzt (siehe *Tabelle 3*). (Pöppinghaus et al., 1994)

**Tabelle 3: Faulzeit in Abhängigkeit der Temperatur, Schröder & Zitzelsberger (2005)**

Temperatur	Faulzeit
8°C	120 Tage
10°C	90 Tage
15°C	60 Tage
20°C	45 Tage
25°C	30 Tage
30°C	27 Tage
35°C	25 Tage

Sind all diese Bedingungen erfüllt, bauen verschiedene Bakteriengruppen den Klärschlamm in den folgenden vier parallel ablaufenden Phasen ab:

- Hydrolysephase: Enzyme setzen hochmolekulare, oft ungelöste Stoffe (Polymere) in gelöste Molekülbruchstücke um.
- Versäuerungsphase: Die Bestandteile des Vorklärschlammes (Eiweiß, Fette, Kohlenhydrate) werden durch verschiedene Gattungen von fermentativen Bakterien in organische Säuren, Essigsäure, Alkohole, Wasserstoff H<sub>2</sub> und Kohlendioxid CO<sub>2</sub> umgewandelt.
- Acetogene Phase: Methanbakterien können von den oben genannten Zwischenprodukten aber nur Essigsäure, H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> direkt zu Methan umsetzen,

weshalb die organischen Säuren und Alkohole mittels acetogenen Bakterien weiter umgewandelt werden.

- Methanogene Phase: Aus Essigsäure,  $H_2$ , und  $CO_2$  wird von methanogenen Mikroorganismen Methan  $CH_4$  gebildet. (Pöppinghaus et al., 1994)

Neben der Erschließung einer Energiequelle hat die anaerobe Schlammstabilisierung noch zwei weitere Vorteile. Aufgrund der Umsetzung des Klärschlammes in Faulgas reduziert sich die Klärschlammmenge, welche weiter behandelt und verarbeitet werden muss. Desweiteren erleichtert sich die anschließende Entwässerung des Klärschlammes, da sich mit der Verringerung des organischen Anteils eine Erhöhung des mineralischen Anteils ergibt. (Müller et al., 2008/2010)

### 2.3.4.3 Schlammmentwässerung

Im Anschluss an die Schlammstabilisierung und nach einer weiteren möglichen Eindickung (vgl. 2.3.4.1 *Schlammvoreindickung*), folgt die Schlammmentwässerung, um die Klärschlammmenge und somit auch die Entsorgungskosten zu reduzieren. Auf kleinen Kläranlagen geschieht das gelegentlich statisch in Schlammstapelbehältern oder in Schlammteichen. Für Kläranlagen ab 10.000 – 20.000 EW werden in der Regel Maschinen zur Schlammmentwässerung eingesetzt. Dafür wird der Klärschlamm durch die Zugabe von Fäll- und Flockungsmittel (z.B.: Kalk-Eisen-Gemisch) konditioniert und somit leichter entwässerbar. Zentrifugen, Siebbandpressen, Schneckenpressen und Kammerfilterpressen sind die gängigsten Bauarten von Entwässerungsmaschinen. In *Abbildung 11* ist eine Kammerfilterpresse schematisch dargestellt. (Resch & Schatz, 2010)

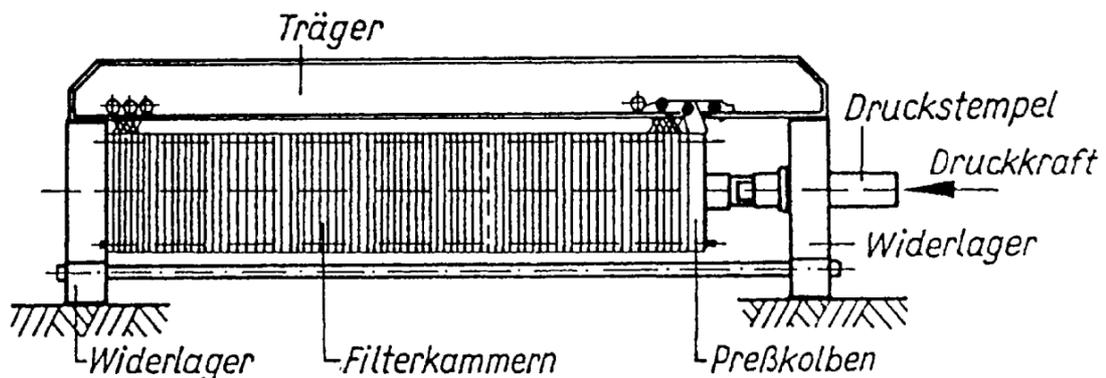


Abbildung 11: Schema einer Kammerfilterpresse, Bischof & Hosang (1989)

### 2.3.4.4 Schlamm-trocknung

Ob Klärschlamm getrocknet wird, hängt von seinem weiteren Entsorgungsweg ab. Spezifische Standortfaktoren, wie die Verfügbarkeit von Wärme oder das Platzangebot, spielen ebenfalls eine Rolle. Neben einer weiteren Mengenreduzierung, durch Verdampfen oder Verdunsten des Wassers, findet eine Heizwertsteigerung statt. Drei Gruppen von Trocknungsverfahren werden in der kommunalen Klärschlammbehandlung angewandt:

- Solartrocknung mit und ohne Zusatzwärme
- Nieder- und Mitteltemperaturtrocknung ( $T < 120^{\circ}\text{C}$ )
- Hochtemperatur oder thermische Trocknung

In *Abbildung 12* ist als Beispiel das Schema einer solaren Klärschlamm-trocknung abgebildet. Der Klärschlamm wird dabei in einem Glashaus ausgebreitet und durch die Wärme der Sonneneinstrahlung getrocknet. Es werden dafür keine zusätzlichen Kollektoren benötigt, jedoch ist der Flächenbedarf beträchtlich, zusätzlich muss der Klärschlamm regelmäßig gewendet werden. (Müller et al., 2008/2010)

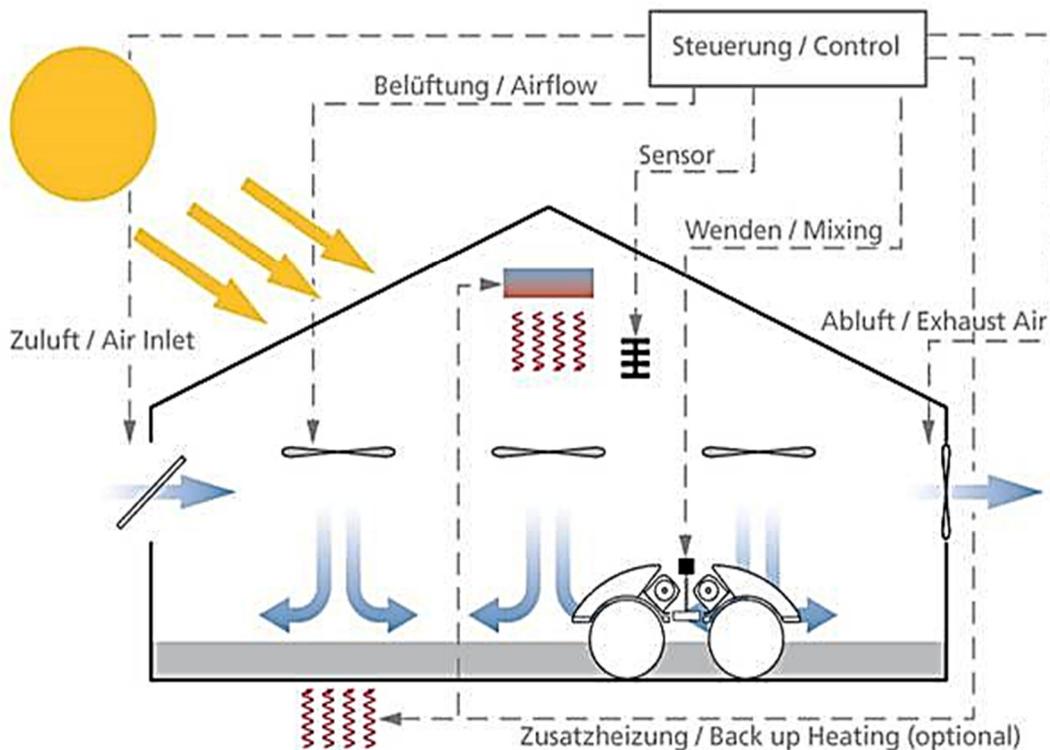


Abbildung 12: Schema der solaren Klärschlamm-trocknung, Zell (2014)

### 2.3.4.5 Schlamm Entsorgung

Im Jahr 2010 wurde Klärschlamm in Österreich, wie in *Abbildung 12* dargestellt entsorgt bzw. verwertet. Dabei umfasst die Sonstige Klärschlammentsorgung bzw. –verwertung die Bereiche Kompostierung, Landschaftsbau, Zwischenlagerung, Bauzuschlagstoff und Kleinmengenabgaben. Eine Untersuchung der Entwicklung der unterschiedlichen Verwertungs- und Entsorgungspfade zeigt, dass der Anteil der Verbrennung zunimmt, während der Anteil an deponiertem Klärschlamm seit 1995 stetig sinkt. (Überreiter et al., 2012) Diese Entwicklung lässt sich zum einen mit dem Inkrafttreten der Deponieverordnung im Jahr 2004 (Verbot der Ablagerung von organischen, reaktiven Abfällen) und zum anderen mit dem Rückgang der Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft erklären. (Egle et al., 2014b) Im Klärschlamm können neben den Wertstoffen (Stickstoff und Phosphor) auch Schadstoffe wie Schwermetalle, organische Verbindungen und Arzneimittelrückstände enthalten sein. Deshalb ist zum vorbeugenden Bodenschutz die thermische Verwertung des Klärschlammes vorzuziehen. (Resch & Schatz, 2010) Zusätzlich kann im Anschluss an eine Monoverbrennung des Klärschlammes, Phosphor aus der Produktasche gewonnen werden. Diese Art der Phosphorgewinnung ist heute zwar teurer als der Phosphatimport (hauptsächlich aus Nordafrika, China, Mittlerer Osten und USA), wird aber aufgrund der Endlichkeit von Phosphor in Zukunft zunehmend relevanter werden. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1, 2013)

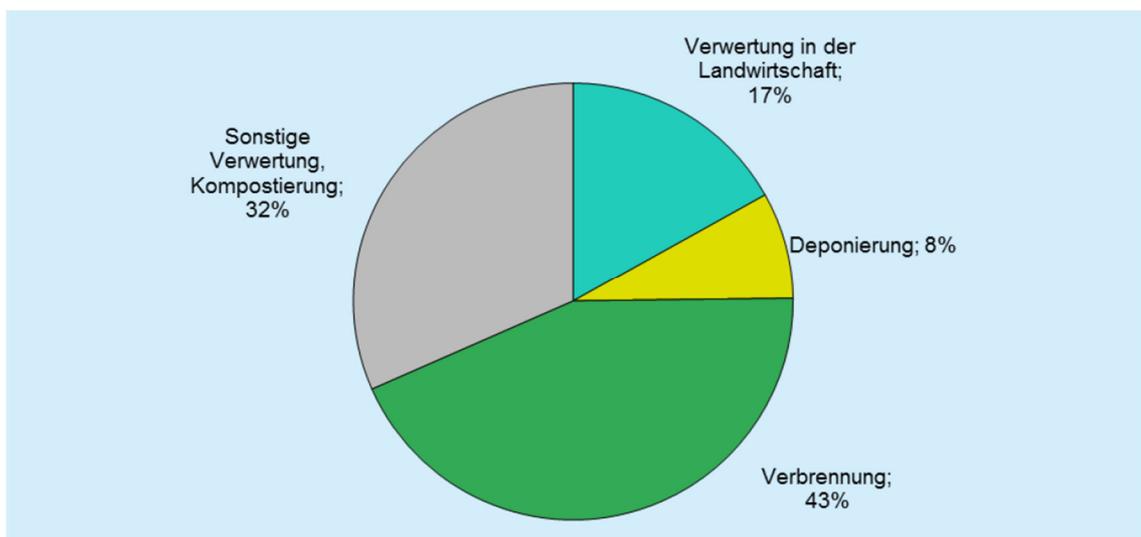
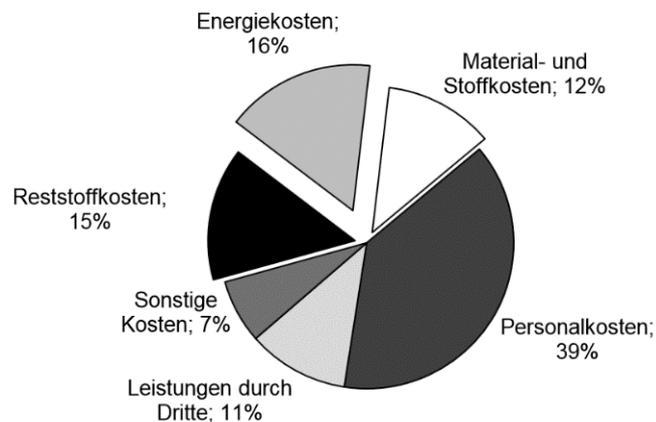


Abbildung 13: Verwertungs- und Entsorgungswege des Klärschlammes in Österreich 2010, Überreiter et al. (2012)

### 3 Energie in der Abwasserreinigung

Umweltschutz und Kosteneinsparungen werden auch für Kläranlagen immer relevanter, da diese häufig die größten Verbraucher von elektrischer Energie unter den kommunalen Einrichtungen (z.B.: Schulen, Straßenbeleuchtung) sind. (Agis, 2001)

Da bei bestehenden Kläranlagen an der baulichen Ausstattung nur mit vergleichsweise hohem Aufwand etwas verändert werden kann, sind primär die Betriebskosten auf Einsparungspotentiale zu untersuchen. (Müller et al., 2008/2010) Die prozentuelle Verteilung der Betriebskosten, basierend auf Daten von 101 kommunalen Kläranlagen in Österreich aus dem Abwasser-Benchmarking-Projekt des ÖWAV (österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband) (Lindtner & Vohryzka, 2015), sind in *Abbildung 14* dargestellt.



**Abbildung 14: Betriebskostenverteilung österreichischer Kläranlagen, Lindtner & Vohryzka (2015)**

Der Energiekostenanteil (16%) bietet einfach erzielbare Einsparungsmöglichkeiten, da die Ausgaben in diesem Bereich beträchtlich und einige konkrete Maßnahmen durchführbar sind. (Müller et al., 2008/2010)

Diese Energiepotentiale sollen laut Müller et al. (2008/2010) unter Einhaltung der Reinigungsanforderungen, von Betreibern und Planern folgendermaßen zugänglich gemacht werden:

- Energiesparmaßnahmen
- Sorgfältige Auswahl der geeigneten und energieeffizientesten Verfahren
- Nutzung der Energieträger Klärgas und Klärschlamm sowie Wärme im Abwasser
- Strompreis senken (Verhandlung mit Elektrizitätswerk, Lastmanagement)

Dazu werden in den folgenden zwei Kapiteln die Energieverbraucher und Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz der gängigsten Verfahren zur kommunalen Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung ausgeführt.

### 3.1 Energieverbraucher

Den Energieverbrauch von Abwasserreinigungsanlagen zu quantifizieren und vergleichbar zu machen stellt keine leichte Aufgabe dar. Unterschiedliche Faktoren beeinflussen die erforderliche Leistung der verschiedenen Verfahrensschritte. Die anfallende Schmutzfracht spielt sowohl für den Energiebedarf der biologischen Abwasserreinigung als auch für die Klärschlammbehandlung eine bedeutende Rolle. Der Energieverbrauch von Abwasserpumpen wird hingegen durch die anfallende Abwassermenge dominiert. (Agis, 2001)

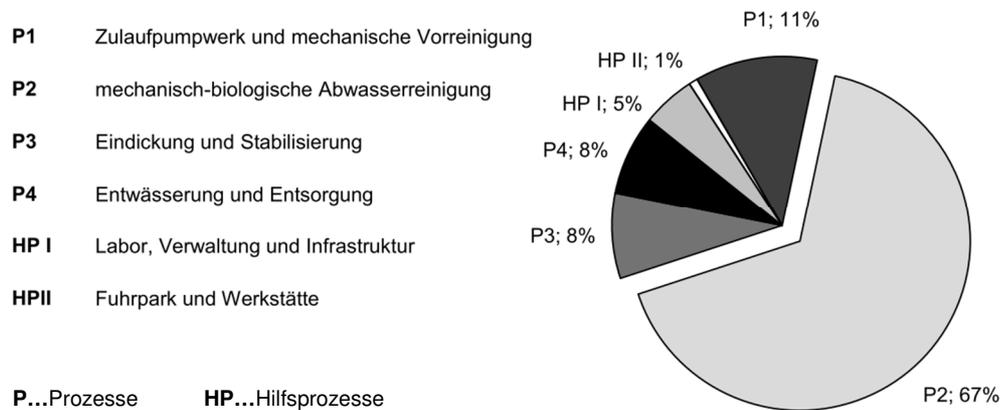
Nach Kroiss & Svardal (2009) beruht der Hauptenergiebedarf von Kläranlagen auf der organischen Schmutzfracht, welche sich deshalb als Bezugsgröße durchgesetzt und bewährt hat. Damit ist gleichzeitig ein direkter Bezug zwischen dem Verursacher und dem Nutzen einer Kläranlage (Reinigung des Abwassers) hergestellt. In der Praxis wird dafür die mittlere jährliche CSB-Zulauffracht (chemischer Sauerstoffbedarf) gemessen und über den Einwohnergleichwert von 120 g/EW/d in Relation gesetzt. Diese Festlegung lässt einen ersten Vergleich des spezifischen Verbrauchs an Strom von den Kläranlagen des ÖWAV-Abwasser-Benchmarking-Projektes zu (siehe *Abbildung 15*). Der elektrische Energieverbrauch resultiert dabei aus dem Stromverbrauch aus dem Netz zuzüglich der Nutzung des erzeugten Stroms aus Klärgas. Ausreißer mit einem spezifischen Energieverbrauch von weniger als 19kWh/EW-CSB120/a und mehr als 200kWh/EW-CSB120/a wurden vernachlässigt. (Lindtner & Vohryzka, 2015)



**Abbildung 15: Energieverbrauch der am Benchmarking teilgenommenen Kläranlagen, Lindtner & Vohryzka (2015)**

Es ist in *Abbildung 15* der Trend zu erkennen, dass Kläranlagen mit aerober Klärschlammstabilisierung mehr elektrische Energie verbrauchen als Anlagen mit

Faulung. Dies lässt sich anhand der Verfahrensführung erklären, da die Belüftung der biologischen Reinigungsstufe mit Abstand der größte Stromverbraucher einer Kläranlage ist (siehe *Abbildung 16*) und bei anaerober Schlammstabilisierung der Schlamm deutlich kürzer im Belebungsbecken verweilt.



**Abbildung 16: Verteilung des Energieverbrauchs, Lindtner & Vohryzka (2015)**

Als zweitgrößte Stromverbraucher von Kläranlagen gelten die kontinuierlich laufenden Pumpwerke (Zulauf, Zwischenhebwerke, Rücklaufschlamm, interne Kreisführung). Einzeln benötigen sie zwar meistens weniger als 10% des gesamten Stromverbrauchs, in Summe kann ihr Verbrauch jedoch bis zu 50% des Gesamtstrombezugs ausmachen.

Die drittgrößte Verbrauchergruppe von elektrischer Energie der Kläranlage sind üblicherweise kontinuierlich laufende Rührwerke, wie sie zum Beispiel für die Denitrifikation oder den Faulturm eingesetzt werden. (Haber Kern et al., 2006)

Diese drei Komponenten verursachen bei energetisch optimierten Anlagen über 80% des Stromverbrauches. Weitere wesentliche Verbraucher sind nach Haber Kern et al. (2006):

- Sandfangbelüftung
- Klärschlammmentwässerung
- Sandfilter
- Betriebswasserpumpen
- Bei kleineren Anlagen auch Elektroheizungen

Thermische Energie spielt hauptsächlich auf Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung, vor allem zur Erwärmung des Klärschlammes und für die Faulbehälterheizung, eine wichtige Rolle. Da aufgrund der damit verbundenen Klärgasproduktion und der Verwertung des Klärgases mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Strom und Wärme erzeugt wird, letztere zumeist im Überschuss, muss bei Wärme in der Regel kein Fokus auf Einsparungen gelegt werden. Kommen für die Beheizung der Betriebsgebäude oder für eine Klärschlamm-trocknung allerdings Primärenergieträger wie

Erdgas, Erdöl oder Fernheizung zum Einsatz, hat die Optimierung des Wärmebedarfs höhere Priorität. (Lindtner, 2008)

## 3.2 Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz

Haberkern et al. (2006) gliedern die wichtigsten Einflussfaktoren der Energieeffizienz von Kläranlagen in folgende Ansatzpunkte:

- Stromverbrauch durch Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung
- Faulgaserzeugung/-verwertung bei Anlagen mit Faulung
- Wärmebedarf bei Anlagen mit Faulung und Klärschlamm-trocknung

Ausgehend von dieser Gliederung werden anschließend Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz der gängigsten Verfahren von kommunalen Abwasserreinigungsanlagen diskutiert.

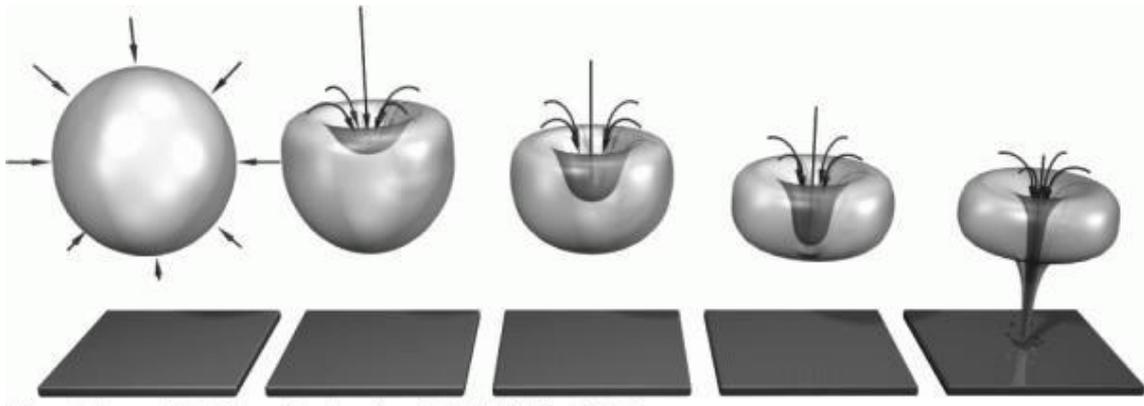
### 3.2.1 Stromverbrauch durch Abwasserreinigung und

#### Klärschlammbehandlung

Wie in Kapitel 3.1 *Energieverbraucher* erläutert, ist die Belüftung der biologischen Reinigungsstufe der größte Stromverbraucher einer Kläranlage. Einerseits muss durch die Belüftung eine intensive Umwälzung des Abwassers zu gewährleistet sein, andererseits soll aus verfahrenstechnischer und energetischer Sicht nicht zu viel Sauerstoff eingetragen werden. Eine Möglichkeit der Energieeinsparung ist daher das Belebungsbecken mit separatem Rührwerk auszustatten, wodurch die Mindestluftmenge unabhängig von der erforderlichen Umwälzenergie wird. (Müller et al., 2008/2010) Desweiteren kommt es infolge des kontinuierlichen Betriebs der Belüftungselemente häufig zu einer Abnutzung und damit zu einer Verringerung der Effizienz. Regelmäßige Reinigung und Austausch veralteter Belüftungssysteme können, ohne Änderungen am Prozessablauf, zu einer Steigerung der Energieeffizienz führen. (Haberkern et al., 2006)

Bei Pumpen, die in Summe den zweitgrößten elektrischen Energieverbraucher der Kläranlage darstellen, kommt es ebenfalls zu einem Interessenskonflikt zwischen hohem Wirkungsgrad und Verstopfungsanfälligkeit. (Haberkern et al., 2006) Auf Sicherheitsreserven ist in der Pumpenauslegung zu verzichten, da Pumpen nur bei bestimmten Lastverhältnissen den größtmöglichen Wirkungsgrad erreichen. Daher ergeben sich häufig bereits Energieeinsparungsmöglichkeiten bei einer Überprüfung der Lastsituation von Pumpen. Häufig nehmen die Wirkungsgrade von (Kreisel-)Pumpen durch Abrieb oder schlimmer, durch Beschädigungen an den Laufrädern, ab.

Beschädigungen können aufgrund von Kavitation entstehen, worunter die Bildung von Dampfblasen und deren anschließender Zerfall verstanden wird (siehe *Abbildung 17*). Durch die so entstehenden Kräfte kommt es zum Materialabtrag am Laufrad der Pumpe. Kavitation tritt aufgrund der Fehlauslegungen von Leitungen und Pumpen auf. (Müller et al., 2008/2010) Das Ersetzen der Laufräder oder der Pumpen und eine regelmäßige Wartung können zu Einsparungen des Stromverbrauchs führen, ohne in die Betriebsführung einzugreifen. (Haber Kern et al., 2006)



**Abbildung 17: Die Zerstörungswirkung von Kavitationsblasen, Wess (2004)**

Die Effizienz von Rührwerken, die drittgrößten Stromverbraucher auf einer Abwasserreinigungsanlage, ist durch die Geometrie und das Volumen der umzuwälzenden Becken als auch durch die Anordnung und die Bauart der Rührer bestimmt. Eine potentielle Strom einsparung ohne Eingriff in den Prozessablauf kann durch eine Überprüfung des Einbauorts sowie der Effizienz der Rührer und gegebenenfalls einer Anpassung dieser erreicht werden. (Müller et al., 2008/2010) Zusätzlich kann die Möglichkeit eines Intervallbetriebs der Rühraggregate untersucht werden. (Haber Kern et al., 2006) Grundsätzlich ist es aus energetischer Sicht günstiger wenige große Becken umzuwälzen als mehrere kleine Becken. (Müller et al., 2008/2010)

Eine Möglichkeit der Stromgewinnung auf Kläranlagen bietet Photovoltaik (PV). Die Voraussetzungen dafür sind günstig, da Kläranlagen eine lange Lebensdauer aufweisen und große Dach- und Beckenflächen besitzen.

Eine weitere Option der Eigenstromerzeugung bieten Abwasserkraftwerke. Die verfügbare Absturzhöhe ist jedoch meist gering weshalb diese Technologie auf Einzelfälle im voralpinen oder alpinen Raum begrenzt ist. (Müller et al., 2013)

Für eine fortwährende Optimierung des Stromverbrauches empfiehlt Fricke (2009) die Schaffung von Transparenz. Durch kontinuierliche Kontrolle der großen Stromverbraucher mittels Stromzähler und Messung des Druckverlustes der

Belüftungseinrichtung mittels Manometer, sollen Energieeinsparungsmöglichkeiten aufgezeigt und Betriebsstörungen früh erkannt werden.

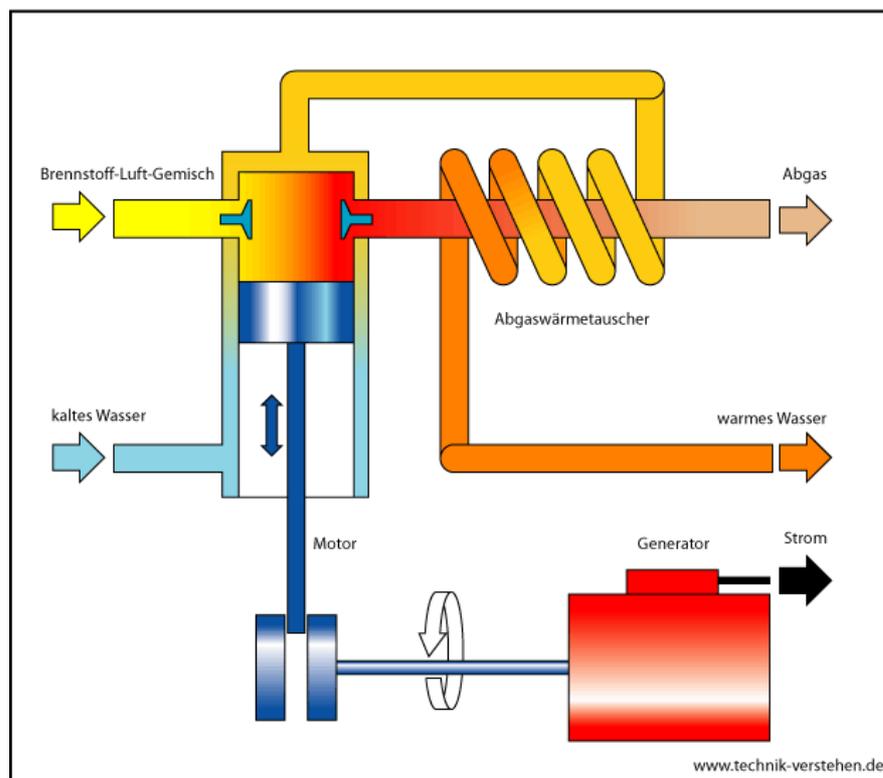
### 3.2.2 Faulgaserzeugung/-verwertung bei Anlagen mit Faulung

Bei der Faulgaserzeugung gibt es folgende drei betriebliche Maßnahmen zur Steigerung der Klärgasausbeute und der dadurch erzeugbaren nachhaltigen Energie:

- Voreindickung: Durch das Abtrennen von Wasser reduziert sich das Volumen des Klärschlammes und in weiterer Folge der Energiebedarf anschließender Prozesse. Der Wärmebedarf für die Aufheizung des Klärschlammes oder der Strombedarf einer nachgeschalteten Schlammentwässerung können dadurch beispielsweise gesenkt werden. Eine scheinbar geringe Aufkonzentration von 4% auf 5% Trockensubstanz im Klärschlamm ergibt eine Volumenreduktion um 20%. Aufgrund von Hemmungserscheinungen während des biologischen Abbaus darf eine Feststoffkonzentration von 7% TS vor dem Faulturm allerdings nicht überschritten werden. (Müller et al., 2008/2010)
- Desintegration: Darunter wird das Zerkleinern des Klärschlammes mit Hilfe äußerer Kräfte verstanden. Durch Desintegration wird die Struktur der Schlammflocken aufgeschlossen und ein effektiverer Abbau ist möglich. Mechanische Verfahren, wie Ultraschall-, Hochdruck- oder Prallstrahlverfahren, werden neben chemischer Desintegration mittels Ozon und thermischer Desintegration, bei Temperaturen über 100°C und unter einem Druck von ca. 10bar, eingesetzt. Die höhere Klärgasausbeute (bis zu 30%) muss aber in einem zweckmäßigen Verhältnis zur zusätzlich eingesetzten Energie stehen. (Müller et al., 2008/2010)
- Co-Fermentation: Unter Co-Fermentation wird das Mitbehandeln von organischen Abfällen, wie zum Beispiel Bioabfall oder Reststoffe aus der Lebensmittelherstellung und Gastronomie, verstanden. Die Klärgasproduktion kann dadurch deutlich erhöht werden. (Müller et al., 2008/2010) Desweiteren sind Faultürme häufig aufgrund von planerischen Reserven oder Verfahrensumstellungen nicht voll ausgelastet und weisen freie Kapazitäten auf. Daher ist zumeist nicht das Faulturmvolume der limitierende Faktor einer Co-Fermentation, sondern die Rückbelastung der Kläranlage mit Prozessabwasser und die steigenden Entsorgungskosten des Klärschlammes. Außerdem kommt es zu einem betrieblichen Risiko durch Störungen und einem zusätzlichen Aufwand bezüglich der Logistik. (Haberkern et al., 2006) Trotzdem sollten Potentiale für eine Co-Fermentation überprüft werden, da Kläranlagenstandorte über ganz

Österreich verteilt sind (kurze Transportwege) und fachkompetentes Personal vor Ort zur Verfügung steht. (Müller et al., 2008/2010)

Für die Faulgasverwertung mittels Blockheizkraftwerk oder Mikrogasturbine (MGT) bietet die Struktur des Energiebedarfs einer Kläranlage günstige Verhältnisse. Durch diese Technologien, auch Kraft-Wärme-Kopplungen genannt, wird die Energie teilweise in Kraft umgewandelt, die einen Generator zur Stromerzeugung antreibt (siehe *Abbildung 18*). Der übrige Teil der Energie wird in Wärme umgesetzt, die mittels Rückkühlung der Abgase und Motorenkühlung zugänglich gemacht wird. Der so produzierte Strom und auch der größte Teil der Wärme können auf der Anlage selbst wieder eingesetzt werden. Die Wärmeerzeugung mittels Gasbrenner ist nicht sinnvoll, da dazu in der Regel nicht das gesamte Klärgas benötigt wird und kein Strom erzeugt wird. (Müller et al., 2008/2010)



**Abbildung 18: Funktionsweise eines Blockheizkraftwerks, Lehmacher (2005)**

Verbesserungspotentiale bei der Faulgasverwertung mittels BHKW ergeben sich aufgrund folgender zwei Ansatzpunkte:

- In einer Studie aus Österreich wurde im Zuge einer Detailanalyse von 21 Kläranlagen festgestellt, dass es häufig zu einer mangelhaften Nutzung des Klärgases kommt. Da Klärgas gewissermaßen kostenlos anfällt und nicht aufwendig produziert werden muss, wird es häufig nicht als hochwertige Energiequelle angesehen und nicht überall und vollständig zur Stromerzeugung eingesetzt. (Agis, 2001)

- Häufig sind die eingesetzten Blockheizkraftwerke veraltet und entsprechen nicht dem Stand der Technik. Weiterentwicklungen haben es in den letzten Jahren möglich gemacht, BHKWs mit höherem elektrischem Wirkungsgrad zu bauen, was zu einer Reduktion der anfallenden Wärme führt. Da Wärme meistens im Überschuss vorhanden ist, passt dies zu den Anforderungen der Energiestruktur einer Kläranlage und ist somit erwünscht. Eine Modernisierung des BHKWs kann deshalb vielfach zu einem ökologischen und ökonomischen Mehrwert führen. (Müller et al., 2008/2010)

Eine weitere Faulgasverwertungsmöglichkeit bietet das Aufbereiten und anschließende Einspeisen des Klärgases in das öffentliche Erdgasnetz. Aufbereiten bedeutet, dass das Gas gereinigt wird, bis es der Qualität von Erdgas entspricht, d.h. einen Methangehalt von >96% aufweist. (Schurig & Schäfer, 2010) Die durchschnittliche Ausgangszusammensetzung von Klärgas ist in *Tabelle 4* dargestellt.

**Tabelle 4: Zusammensetzung von Klärgas, Reppich et al. (2009)**

Methan (CH <sub>4</sub> )	40-75Vol.-%
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	25-50Vol.-%
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	0-0,5Vol.-%
Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	0-0,05Vol.-%
Wasserdampf	1-5Vol.-%
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	0-5Vol.-%
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	0-5Vol.-%
Siloxane <sup>xiii</sup>	0-50mg/m <sup>3</sup>

Eine Aufbereitung setzt sich aus einer Entschwefelung, gegebenenfalls einer Entfernung sonstiger Spurenkomponenten (Siloxane), einer Trocknung und dem Verfahren zur Gasaufbereitung (CO<sub>2</sub>-Abtrennung) zusammen. (Schurig & Schäfer, 2010) Die häufigsten und erprobtesten Verfahren der CO<sub>2</sub>-Abtrennung sind Druckwechseladsorption, Druckwasserwäsche und Aminwäsche. (Reppich et al., 2009) Eine Aufbereitung verursacht Investitions- sowie Betriebskosten und erfordert einen beträchtlichen Energieaufwand, weshalb sie nur dann sinnvoll ist, wenn die anfallende Wärme der Klärgasverwertung mittel KWK größtenteils nicht genutzt werden kann oder eine Faulung ansonsten nicht eingesetzt wird. (Müller et al., 2008/2010)

Kommt eine Klärgasaufbereitung zur Anwendung, ist bei ihrer Ausführung vor allem auf den Methanschluß (Methanverlust über Abluft) zu achten. Methan besitzt in einem Zeitraum von 100 Jahren das 21-fache Treibhauspotential von CO<sub>2</sub>. Ein Methanschluß von 5% würde deshalb einen größeren Treibhauseffekt ausüben, als durch die Klärgasverwertung an CO<sub>2</sub> eingespart worden wäre. Ein Methanschluß von weniger als 1% sollte bei einer Klärgasaufbereitung angestrebt werden. (Müller et al., 2008/2010)

### 3.2.3 Wärmebedarf bei Anlagen mit Faulung und Klärschlamm-trocknung

Im Regelfall herrscht auf einer Abwasserreinigungsanlage mit anaerober Klärschlammstabilisierung kein wesentliches Wärmedefizit bzw. nur an wenigen kalten Tagen. Bei Kläranlagen ohne Faulung oder in Einzelfällen in denen das Klärgas extern verwertet wird, ist bei einem größeren Wärmedefizit die Rückgewinnung von Wärme aus internen Prozessen zu überprüfen. (Levy, 2009)

Die Wärme aus der Warmwasserproduktion von Haushalten und Gewerbe, die heutzutage größtenteils ungenutzt in den Kanal abfließt, kann durch Abwasserenergienutzung zurückgewonnen werden. Mit Hilfe von Wärmetauschern wird dabei dem Abwasser Wärmeenergie entzogen und mittels Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Im Vergleich zu anderen Wärmequellen, wie Außenluft, Erdreich und Grundwasser, verfügt Abwasser meist über höhere Temperaturen und steht ganzjährig zur Verfügung. Da Kältemaschinen nach dem gleichen Prinzip arbeiten wie Wärmepumpen, kann eine Abwasserenergienutzungsanlage auch zur Bereitstellung von Kühlenergie genutzt werden. (Zach et al., 2012) In *Abbildung 19* ist eine solche Anlage in der Ausführung als Wärmepumpe dargestellt.

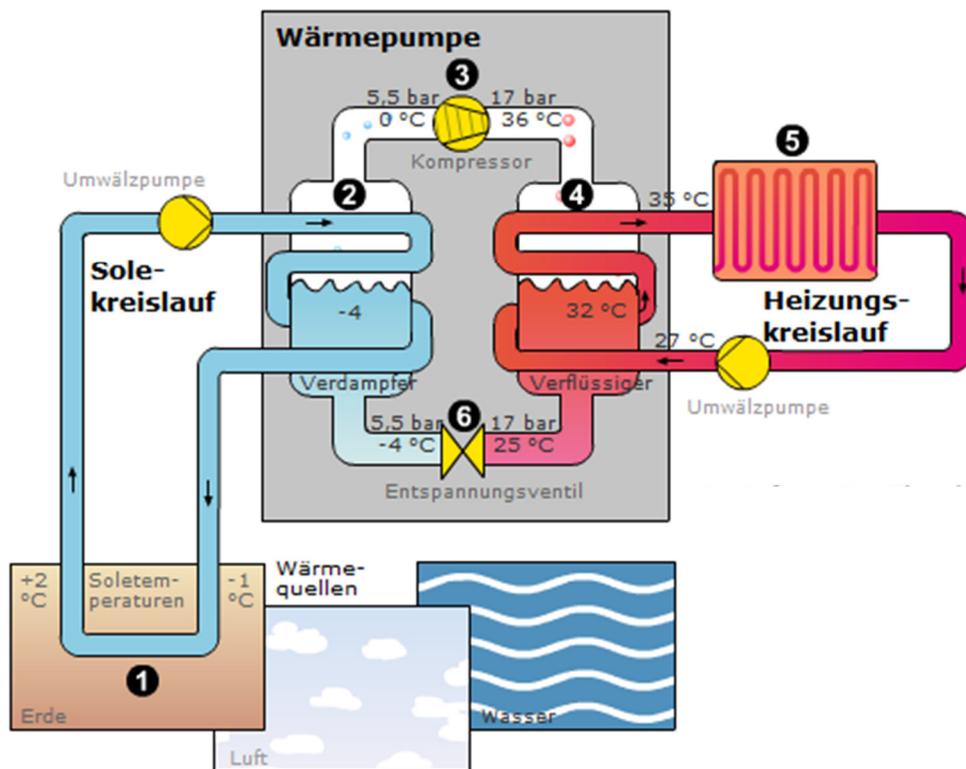


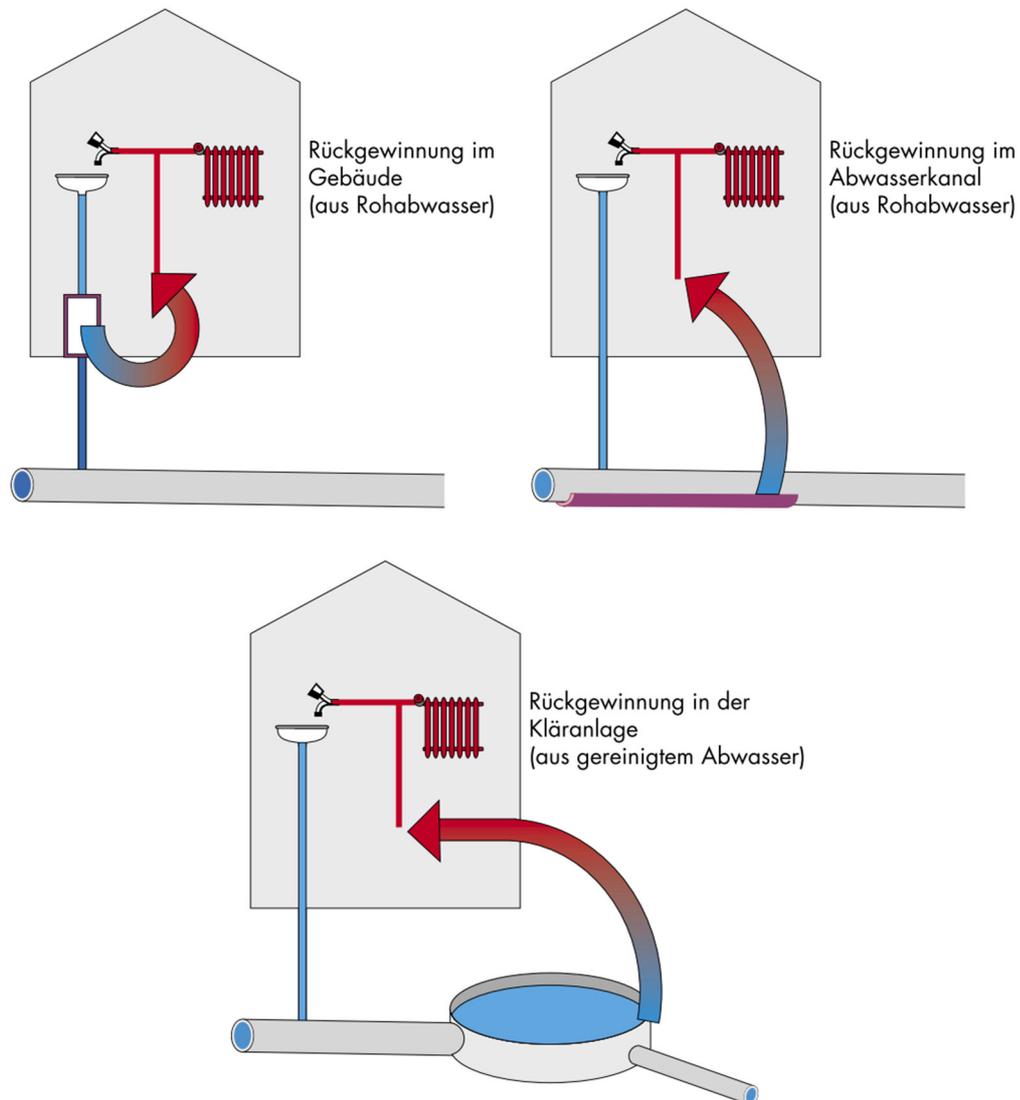
Abbildung 19: Funktionsweise einer Wärmepumpe, Glen Dimplex Deutschland GmbH

Bei den in *Abbildung 19* nummerierten Punkten laufen folgende Prozesse ab:

- 1.) Über einen Wärmetauscher wird Wärme aus verschiedenen Quellen (Erde, Luft, Wasser, Abwasser) der Umwelt entzogen.
- 2.) Mittels Verdampfer (Wärmetauscher) wird die Wärme auf ein Arbeitsmedium (Kältemittel) übertragen. Dadurch geht das Arbeitsmedium in den gasförmigen Zustand über.
- 3.) Ein Verdichter (Kompressor) bringt unter Einsatz von Strom das Arbeitsmedium auf einen höheren Druck, wodurch die Temperatur ansteigt.
- 4.) Ein Verflüssiger (Wärmetauscher) überträgt die Kondensationswärme auf das Heizungswasser und verflüssigt das Kältemittel wieder.
- 5.) Über eine Heizung wird die so erzeugte Wärme abgegeben. (Glen Dimplex Deutschland GmbH)

In der Funktion als Kältemaschine ist der Nutzen der Anlage nicht die Abgabe der Wärme an Punkt 5, sondern der Entzug der Wärme aus der Umwelt an Punkt 1. Anstelle des Abwassers würde sich an Punkt 1 das zu kühlende Medium befinden und an Punkt 5 das Abwasser. Der Verdampfer gewinnt so seine Verdampfungsenergie durch die Kühlung und gibt diese über die Wärmepumpe an das Abwasser ab, wodurch es zur Erwärmung dessen kommt.

Ob eine Erwärmung oder eine Abkühlung des Abwassers erwünscht oder unerwünscht ist, hängt vom Einbauort und Verwendungszweck der Abwasserenergieanlage ab. Prinzipiell gibt es drei Möglichkeiten für den Einbauort (siehe *Abbildung 20*).



**Abbildung 20: Mögliche Standorte zur Energierückgewinnung aus Abwasser, Müller et al. (2008/2010)**

Die hausinterne Wärmerückgewinnung bringt die Vorteile von kurzen Versorgungsstrecken und hohen Abwassertemperaturen mit sich. Die Nachteile der geringen und unregelmäßigen Abwassermenge überwiegen allerdings, weshalb sich die hausinterne Wärmerückgewinnung auf Gebäude mit hohem Warmwasserverbrauch, wie zum Beispiel Schwimmbäder, Spitäler, Wohnbauten fokussiert und in dieser Arbeit nicht näher betrachtet wird. (Müller et al., 2008/2010)

Die Wärmerückgewinnung im Abwasserkanal führt zu einer Abkühlung des Abwassers vor der Kläranlage. Der Hauptprozess einer Kläranlage, die biologische Reinigung, ist temperaturabhängig. Durch eine Abkühlung kann es zu einer verminderten Aktivität der

Mikroorganismen und zu einer daraus resultierenden Verschlechterung der Reinigungsleistung kommen. Dies betrifft im Wesentlichen die Nitrifikation zur Stickstoffentfernung. Wird eine Abwasserenergienutzungsanlage vor der Kläranlage zum Kühlen eingesetzt, hat die dadurch auftretende Erwärmung des Abwassers keine negativen Auswirkungen auf die Kläranlage. (Zach et al., 2012)

Bei einer Abwasserenergienutzung nach der Kläranlage ist es umgekehrt. Durch menschliche Einflüsse weisen Gewässer bereits heute höhere Temperaturen auf, wodurch die heimische Fischfauna beeinträchtigt wird. Eine weitere Erwärmung, aufgrund der Nutzung von Abwasserenergie zum Kühlen, ist deshalb unerwünscht. Eine zusätzliche Abkühlung durch Wärmerückgewinnung hat hingegen keine negativen Auswirkungen auf den Vorfluter. Daher ist Abwasserenergienutzung nach der Kläranlage zum Heizen sinnvoller als zum Kühlen. (Koch et al., 2010)

Die rechtlichen Voraussetzungen für die Genehmigung einer thermischen Nutzung von Abwasser sind im Wasserrechtsgesetz aus dem Jahr 1959 geregelt. Darin lautet es in §32, Abs. 3:

Eine Bewilligung bedarf auch die ohne Zusammenhang mit einer bestimmten Einwirkung der geplanten Errichtung oder Änderung von Anlagen zur Reinigung öffentlicher Gewässer oder Verwertung fremder Gewässer.

Unter die Verwertung fremder Gewässer fallen auch Abwasserenergieanlagen. Eine wasserrechtliche Bewilligung wird basierend auf Gutachten über die Auswirkungen der Anlage auf den Kanal und die Kläranlage von der zuständigen Behörde gegebenenfalls vergeben. (Zach et al., 2012)

Ein Kriterium für die Abwasserenergienutzung ist eine minimale Abwassermenge von 10l/s (ungefähres Nachtminimum von 5.000 Einwohnern) an der Energieentnahmestelle. Die Effizienz und somit auch die Wirtschaftlichkeit von Abwasserenergieanlagen ergeben sich aus der Abstimmung der einzelnen Bestandteile aufeinander. Wärmetauscher, Wärmepumpen, Wärmeverteiler- und Wärmeabgabesystem müssen an die Medientemperatur und Übertragungsleistung angepasst werden, denn nur dann lassen sich Abwasserenergieanlagen mit hohen Leistungszahlen betreiben. Als Leistungszahl ist das Verhältnis von Wärme- und Kälteleistung zum eingesetzten Strom unter bestimmten Laborbedingungen definiert. (Zach et al., 2012) Annähern lässt sich die Leistungszahl (COP=Coefficient of Performance) über den idealen Carnot-Prozess und den exergetischen Wirkungsgrad zur Berücksichtigung von thermischen, mechanischen und elektrischen Verlusten:

$$COP = \frac{T}{\Delta T} \times 0,5$$

COP... Leistungszahl

$\Delta$ ... Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Seite

0,5 ... Exergetischer<sup>xiv</sup> Wirkungsgrad

Aus dieser Formel ist ersichtlich, dass eine Wärmepumpe umso effizienter arbeitet je geringer der Temperaturunterschied zwischen der warmen und kalten Seite ist, d.h. je geringer das Temperaturniveau gehoben werden muss. (Baehr, 2002)

Abwasser weist in der Heizperiode eine durchschnittliche Temperatur von 10-15°C auf, bei starker Schneeschmelze sinkt die Temperatur auf bis zu 8°C. Wirtschaftlich lässt sich damit die Temperatur mit Hilfe einer Wärmepumpe auf etwa 60-65°C heben. Dieses Temperaturniveau eignet sich für das Aufheizen des Klärschlammes vor der Faulung und für den Einsatz eines Niedertemperaturheizsystems (NT) für Gebäudeheizungen. Fernwärmeheizungen haben eine Vorlauftemperatur von 80-130°C, weshalb Abwasserenergie diese nicht ergänzen kann. Bei einer Verwendung zweistufiger Wärmepumpen mit Hochtemperaturkältemittel (HT) können Temperaturen von bis zu 95°C erzielt werden, allerdings unter deutlicher Verschlechterung der Leistungszahl. (Zach et al., 2012)

Da Kläranlagen in der Regel kein Wärmedefizit aufweisen und die wirtschaftlich erreichbaren Temperaturen der Abwasserwärme bei 60-65°C liegen, müssen sich Wärme- bzw. Kälteabnehmer mit genügend großem Energiebedarf in der Umgebung der Anlage befinden oder geplant sein. Dies ist die wichtigste Voraussetzung für das wirtschaftliche Betreiben einer Abwasserenergieanlage und muss durch raumplanerische Maßnahmen sichergestellt werden. Am besten eignen sich für die Wärmeabnahme Betriebe mit ganzjährigem Wärmebedarf auf niedrigem Temperaturniveau, wie Bäder, Gewächshäuser, Molkereien oder spezielle Industriebetriebe. (Zach et al., 2012)

Eine Klärschlamm-trocknung mittels Niedertemperaturtrockner bietet ebenfalls ein ideales Anwendungsgebiet der Abwasserenergienutzung. Dabei kann die Kläranlage den gesamten Wärmebedarf mit Hilfe des Abwassers abdecken.

Niedertemperaturwärme kann aber auch mittels Solarthermie aus der Wärme der Sonneneinstrahlung gewonnen werden. Kläranlagen sind aufgrund ihrer langen Lebensdauer sowie großen Dach- und Beckenflächen prädestiniert für die Nutzung der Sonnenenergie. (Müller et al., 2008/2010)

## 4 Methodik

Diese Arbeit wird im Zuge des *Abwasserenergieprojekts – Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energiekonzepte* verfasst. Die energetische Optimierung einer Kläranlage auf ökonomischer Basis mittels Prozess-Netzwerk-Synthese (PNS) wird behandelt. Ausgehend von der Ressourcenverfügbarkeit sowie unter Berücksichtigung der Energienachfrage, wird ein Technologienetzwerk erstellt und unter definierten Rahmenbedingungen Optimierungsvorschläge ermittelt. Das Vorgehen innerhalb des Projektes sowie das Prinzip der Optimierung werden in den anschließenden Kapiteln erläutert.

### 4.1 Vorgehen im Abwasserenergieprojekt

Wie in 1.2 *Abwasserenergieprojekt* erwähnt wird im Zuge des Abwasserenergieprojekts die Nutzung von Abwasserwärme auf technologische Machbarkeit, CO<sub>2</sub>-Reduktion und Wirtschaftlichkeit untersucht. Anhand von drei Fallbeispielen wird eine systematische Analyse dieser Themen, unter Berücksichtigung raumstruktureller Bedingungen, durchgeführt. Als Standorte für die drei Fallstudien wurden Freistadt in Oberösterreich, Hall in Tirol und Gleisdorf in der Steiermark ausgewählt. Die Optimierung der Kläranlage Freistadt ist Gegenstand dieser Arbeit.

#### 4.1.1 Datenerhebung

Im Zuge eines Vor-Ort-Besuchs wurde die Kläranlagen Freistadt detailliert untersucht und aufgrund der Datenverfügbarkeit sowie der Unterstützung des Kläranlagenpersonals als Beispielkläranlage ausgewählt.

Anhand dieses Protokolls wurde ein Fragebogen erstellt, der alle In- und Outputströme sowie Investitions- und Betriebskosten bestehender Technologien abfragt. Diese Daten bilden die Grundlage der softwarebasierten Optimierung mittels PNS. Unklarheiten wurden mit dem Geschäftsführer der Kläranlage besprochen sowie fehlende Informationen per E-Mail eingeholt.

#### 4.1.2 World Cafè

Es wurde ein Workshop organisiert, um lokale Rahmenbedingungen und Begrenzungen für die Nutzung überschüssiger Energie berücksichtigen zu können und um Szenarien für die Optimierungsberechnung festzulegen. Diese lokalen Akteure umfassten in Freistadt:

- Mitglieder des Vorstandes der Kläranlage
- Geschäftsführer und Betriebsleiter des Reinhaltungsverbandes
- Vertreter der Standortgemeinde Freistadt (Bürgermeister, Amtsleiter und dessen Stellvertreter, Bauamtsleiter sowie Stadtrat für Raumordnung)

Dieser Workshop wurde als World Cafè durchgeführt. World Cafè ist eine simple, effektive und flexible Methode den Dialog einer größeren Gruppe zu moderieren. Mit gezielten Fragen wird versucht eine konstruktive Gesprächssituation zu schaffen, welche auf beschreibbaren Papiertischdecken festgehalten wird. (Brown & Isaacs, 2001) In einer Reflexionsphase wurden anschließend die Arbeitsaufgaben für das Projektteam definiert.

Als Diskussionsanregung wurden vom Projektteam 5 Plakate zu den folgenden Themen erstellt und vorgetragen (siehe *Anhang 1*):

- Heizen und Kühlen mit Abwasserwärmepumpen
- Möglichkeiten der Klärschlammverwertung
- Solarenergie
- Nutzungspotentiale von Klärgas
- Wärme-/Kältenutzung außerhalb der Kläranlage

Anhand dieser Plakate wurden nachstehende Fragestellungen bearbeitet:

- Welchen Beitrag soll die Kläranlage Freistadt in der regionalen Energieversorgung in Zukunft leisten?
- Welche Potentiale für die Nutzung der Abwasserenergie sehen Sie für die Kläranlage Freistadt?
- Wie können die vorhandenen Energiepotentiale am besten genutzt werden?
- Wer kann zur Umsetzung dieser Visionen in welcher Form beitragen?

Aus dieser Diskussion ergaben sich folgende zu analysierende Szenarien für das Projektteam:

- Berücksichtigung der zukünftigen INKO Betriebsansiedelung Freistadt Süd als potentielle Niedertemperaturwärme- und Kühlenergieabnehmer
- Klärgasreinigung und anschließendes Einspeisen in das öffentliche Erdgasnetz
- Aufzeigen von Alternativen zur landwirtschaftlichen Klärschlamm Entsorgung unter Berücksichtigung der Erhaltung des Phosphors

## 4.2 Prozess-Netzwerk-Synthese

Die Prozess-Netzwerk-Synthese ist ein softwarebasiertes Werkzeug zur Optimierung eines Technologienetzwerkes. (Friedler et al., 1992) Ursprünglich wurde es vom Institut für technische Chemie einer ungarischen Universität in Vezprém entwickelt, um chemische Prozesse zu untersuchen und vorherzusagen. Mit Hilfe des Optimierungsprogramms können aber auch strukturelle Alternativen und verschiedene Technologienetzwerke entwickelt werden, wie zum Beispiel für die Optimierung regionaler und urbaner Energiesysteme. Durchgeführt wird einer Prozess-Netzwerk-Synthese mit Hilfe des Computerprogramms PNS Studio. (Kalauz et al., 2012)

Der erste Schritt für die Optimierung einer Kläranlage mittels Prozess-Netzwerk-Synthese ist der Aufbau des Technologienetzwerkes. Für dieses wird festgelegt von welchen Rohmaterialien, Technologien (Operating Units) sowie Zwischen- und Endprodukten die Interaktion analysiert wird. Nach der Erhebung der Daten und einer Implementierung dieser in das PNS Studio, liefert dies unterschiedliche Lösungsstrukturen für das gegebene Optimierungsproblem. (Friedler et al., 1992)

### 4.2.1 Algorithmus

Die Basis einer solchen Optimierung bilden folgende kombinatorische Regeln:

- Simple Graphen können eine Prozessstruktur nicht eindeutig wiedergeben, daher werden für die Prozess-Netzwerk-Synthese zweiteilige Graphen, auch process graph oder P-graph genannt, verwendet. Diese können die syntaktischen und semantischen Zusammenhänge der Prozesse explizit darstellen (siehe *Abbildung 21*).

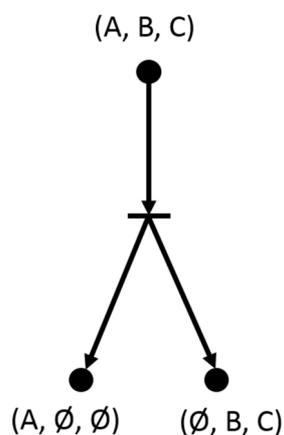


Abbildung 21: Darstellung eines P-Graph, Friedler et al. (1992)

In *Abbildung 21* repräsentieren Kreise Rohmaterialien, Zwischenprodukte sowie Produkte und werden als M-typ Daten bezeichnet. Operating Units (O-typ Daten) werden durch horizontale Balken dargestellt. (Friedler et al., 1992)

- Damit eine Prozessstruktur kombinatorisch möglich ist muss sie folgende 5 fundamentale Axiome erfüllen:
  1. Jedes M-typ Endprodukt ist im Graphen enthalten.
  2. Alle Daten in Form des M-typs sind Rohmaterialien, wenn sie kein Output aus einer Operating Unit innerhalb der untersuchten Struktur sind.
  3. O-typ Daten repräsentieren Operating Units innerhalb des Syntheseproblems.
  4. Von allen O-typ Daten innerhalb einer Struktur führt mindestens ein Pfad zu einem M-typ Endprodukt.
  5. M-typ Daten sind ein In- oder Output von mindestens einer Operating Unit innerhalb der Struktur. (Friedler et al., 1992)
- Der kombinatorische Lösungsalgorithmus der Prozess-Netzwerk-Synthese setzt sich aus drei Schritten zusammen:
  1. Erstellen der Maximalstruktur (Maximum Structure Generation (MSG)) die alle realisierbaren Lösungsstrukturen beinhaltet.
  2. Erstellen der Lösungsstrukturen (Solution Structure Generation (SSG)), wodurch alle kombinatorisch realisierbaren Lösungsstrukturen bestimmt werden.
  3. Berechnung einer Optimalstruktur durch den mathematischen Optimierungsalgorithmus (Accelerated Branch-and-Bound Algorithm (ABB)). Der Optimierungsalgorithmus startet mit der Lösungsfindung am Produktlevel und arbeitet sich, über die Maximalstruktur, zu den Rohmaterialien vor. An jedem Zweig der Maximalstruktur entscheidet der Algorithmus durch welche Technologie ein vorab definiertes Material produziert werden soll (siehe *Abbildung 22*). (Varga et al., 2010) Ist die Basis einer Optimierung ökonomisch, ist das Ergebnis entweder die kostengünstigste Optimalstruktur oder die, die den größten Gewinn erzielt. (Süle et al., 2011) Der ABB Algorithmus hat gegenüber anderen Lösungsalgorithmen den Vorteil, dass er nicht nur eine Optimalstruktur berechnet, sondern auch die n-besten Lösungsstrukturen ermittelt. Die Variable n wird vom Benutzer angegeben. (Bertok et al., 2012) Dies ermöglicht einen Vergleich zwischen den unterschiedlichen realisierbaren Lösungsstrukturen.

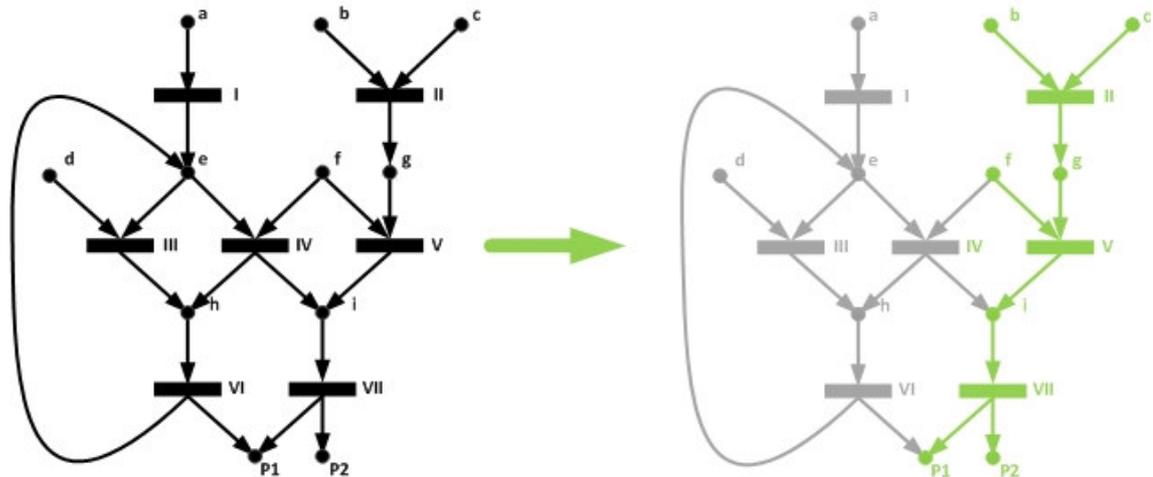


Abbildung 22: Von der Maximalstruktur zur Optimalstruktur, Kollmann et al. (2015)

#### 4.2.2 Erstellen eines Technologienetzwerkes

Um ein Technologienetzwerk im PNS Studio vollständig zu definieren, werden Informationen zu den einzelnen Rohmaterialien, Technologien sowie Zwischen- und Endprodukten benötigt. Anhand dieser werden Massen- und Energiebilanz sowie eine wirtschaftliche Bilanz erstellt. (Maier, 2012) Die benötigten Informationen zu den M- und O-typ Daten umfassen Folgendes:

- M-typ Daten müssen Angaben über ihre Art (z.B.: Masse, Volumen, Länge, Energie) sowie gegebenenfalls ihren Preis pro Einheit enthalten (siehe *Abbildung 23*). Zusätzlich können ein minimaler oder ein geforderter Stofffluss (Flow) und eine kurze Beschreibung angegeben werden. Grundsätzlich wird bei M-typ Daten zwischen Rohmaterialien, Zwischenprodukten und Endprodukten unterschieden. Die Angaben zum Preis folgen Vorzeichenrichtlinien: Entstehen Kosten besitzen Preise ein positives Vorzeichen; werden Einnahmen erzielt, wird dies durch ein negatives Vorzeichen gekennzeichnet. Da Zwischenprodukte, aufgrund der Betriebs- und Investitionskosten ihrer produzierenden Technologie, bereits Herstellungskosten innerhalb der untersuchten Struktur verursachen, wird ihnen kein Preis zugewiesen werden. (Kindermann & Kollmann, 2015)

Material1 - Material properties (new)		Material1 - Material properties (new)	
Name	Material1	Name	Material1
Type	product	Type	intermediate
Quantity type	mass	Quantity type	mass
Required flow	0 t/yr (default)	Maximum available flow	10000000 t/yr (default)
Required flow Mu	t/yr	Maximum flow Mu	t/yr
Maximum flow	10000000 t/yr (default)	Description	Description
Maximum flow Mu	t/yr		
Price	0 €/t (default)		
Price Mu	€/t		
Description	Description		

**Name**  
Name of the material. It must be unique in the problem definition.

Convert values automatically

Save Cancel Delete

**Abbildung 23: Eingabemaske von M-typ Daten im PNS Studio für Rohmaterialien und Endprodukte (links) und Zwischenprodukte (rechts)**

- O-typ Daten (Operating Units) werden primär über ihre In- und Outputströme pro Zeiteinheit definiert, da diese die Leistung einer Technologie bestimmen (siehe *Abbildung 24*). Weitere wichtige Informationen für die Charakterisierung von Technologien sind laut Maier (2012) die Betriebsstunden pro Jahr, der Abschreibungszeitraum der Anlage, die minimale und maximale Auslastung der Anlage, die Betriebskosten pro Zeiteinheit sowie die Investitionskosten.

OperatingUnit1 - Operating Unit properties (new)	
<b>Basic</b>	
Name	OperatingUnit1
Working hours per year	8000 h/yr (default)
Payout period	10 yr/payout period (default)
<b>Capacity constraints</b>	
Capacity constraints	
Lower bound	0 (default)
Upper bound	10000000 (default)
<b>Cost parameters</b>	
Operating cost	
Investment cost	
Overall cost	
<b>Input and output streams</b>	
Input materials	-
Output materials	-
<b>Description</b>	
Description	Description

**Name**  
Name of the operating unit. It must be unique in the problem definition.

Convert values automatically

Save Cancel Delete

**Abbildung 24: Eingabemaske für Technologien aus dem PNS Studio**



Das Technologienetzwerk der aktuellen Ausführung der Kläranlage Freistadt ist vereinfacht in *Abbildung 26* dargestellt. Die Einteilung der Komponenten in Rohmaterialien, Technologien, Zwischen- und Endprodukte wurde grafisch, für ein besseres Verständnis, um die Flächenverfügbarkeit ergänzt. Desweiteren fließt Strom vereinfacht dargestellt nur in die Technologie der Abwasserreinigung ein, da dieser für den Betrieb jeder Technologie benötigt wird.

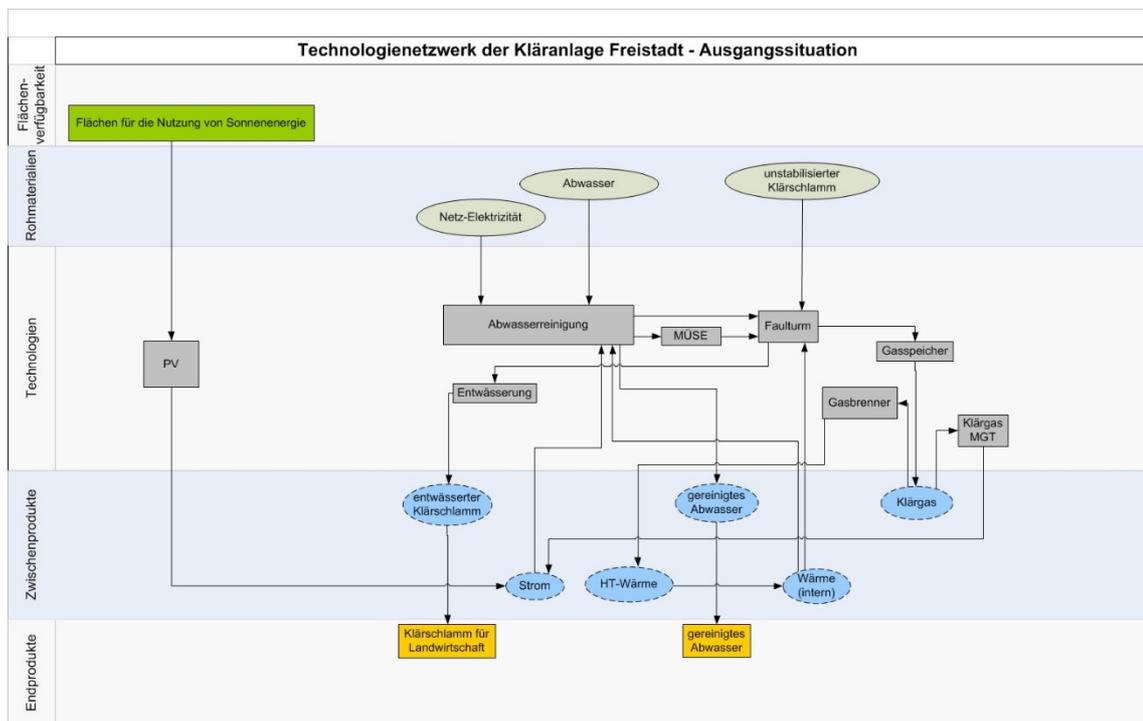


Abbildung 26: Technologienetzwerk der Ausgangssituation der Kläranlage Freistadt

## 5.1 Rahmenbedingungen der Optimierung

Um das Optimierungsproblem einer Kläranlage korrekt zu erfassen, müssen folgende Rahmenbedingungen von allen Komponenten der Prozess-Netzwerk-Synthese erfüllt werden:

- Eine multiperiodische Berechnung wird durchgeführt, um Schwankungen der Ressourcenverfügbarkeit korrekt abbilden und den heterogenen<sup>xv</sup> Bedarf an Energie übers Jahr berücksichtigen zu können. Die Einteilung in drei Perioden wurde anhand des Heizenergieverbrauchs im oberösterreichischen Zentralraum dafür folgendermaßen erstellt (Linz AG):

Winter: 1. Dezember – 31. März

Übergangsperiode: 1. April – 31. Mai und

1. Oktober – 30. November

Sommer: 1. Juni – 30. September

- Alle betrachteten Technologien werden auf 8.000 Betriebsstunden pro Jahr bemessen.
- Technologische und ökonomische Parameter werden in unterschiedlichen Kapazitätsklassen untersucht, wodurch die Änderung der Fixkosten und gegebenenfalls der technischen Effizienz von unterschiedlichen Technologiegrößen berücksichtigt wird.
- Technologien verfügen über keine Investitionskosten, wenn sie auf der Kläranlage Freistadt bereits vorhanden und im Einsatz sind.
- Investitions- und Betriebskosten werden ohne Umsatzsteuer erhoben.
- Der Wertverlust aufgrund von Abnutzung wird für die einzelnen Technologien anhand konstanter Abschreibung berücksichtigt. Die Nutzungsdauern der einzelnen Technologien sind in *Tabelle 5* dargestellt. Ist keine andere Information vorhanden, wird die Annahme getroffen, dass Beton- und Metallbauten auf 30 Jahre und bewegte Maschinen auf 10 Jahre abgeschrieben werden (eigene Annahme).

**Tabelle 5: Nutzungsdauer der Technologien**

<b>Technologie</b>	<b>Nutzungsdauer</b>
Faulturm	30 Jahre
Entwässerung	10 Jahre
Maschinelle Überschussschlamm Entwässerung	10 Jahre
Gasspeicher	30 Jahre
Gasbrenner	20 Jahre*
Mikrogasturbine	10 Jahre
BHKW	15 Jahre*
Biogasaufbereitung	10 Jahre
Gaseinspeisestation	10 Jahre
Wärmetauscher	20 Jahre*
Wärmepumpe	20 Jahre*
Druckluftabwärmerückgewinnung	20 Jahre*
Klärschlamm-trocknung mittels Wärmepumpe	10 Jahre
Solare Klärschlamm-trocknung	10 Jahre
Monoklärschlamm-verbrennung	20 Jahre*
PV	25 Jahre*
Solarthermie	20 Jahre*

\* Die Quellen der Daten sind in *Tabelle 6* angegeben.

## 5.2 Das Technologienetzwerk der Optimierung

Das für die energetische Optimierung der Kläranlage Freistadt herangezogene Technologienetzwerk ist vereinfacht in *Abbildung 27* dargestellt.

Anschließend sind die Auslegungsdaten sowie Rahmenbedingungen der einzelnen Komponenten (fett gedruckt), die der Optimierungsberechnung mit Hilfe der PNS zugrunde liegen, angeführt. Desweiteren sind die Quellen der Daten der Berechnung tabellarisch angegeben.

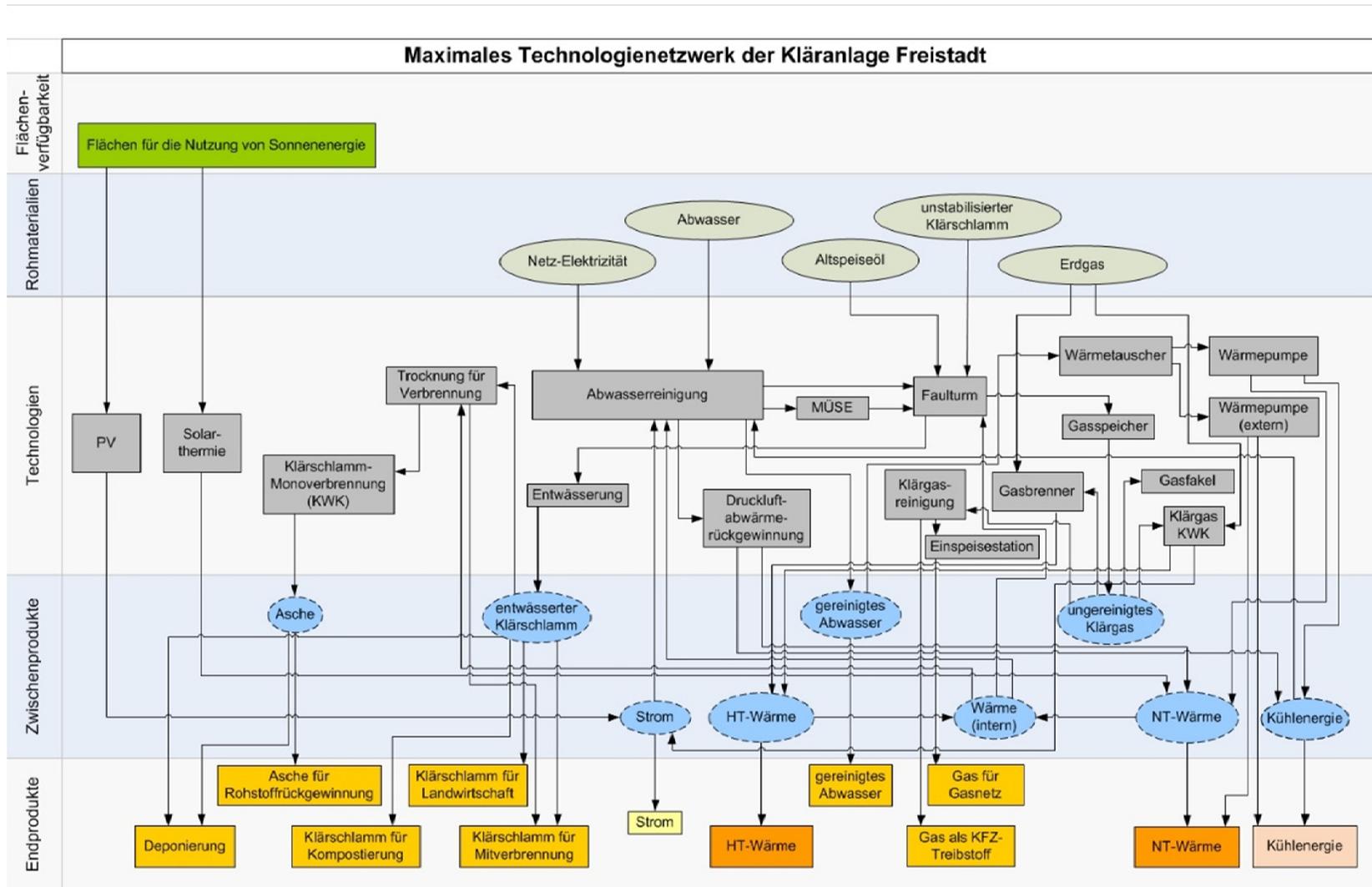


Abbildung 27: Maximales Technologienetzwerk zur Optimierung der Kläranlage Freistadt

## 5.2.1 Rohmaterialien

Das primäre Rohmaterial einer Kläranlage ist das **Abwasser**. In Freistadt fließen ca. 4.600m<sup>3</sup> Abwasser pro Tag über das Kanalnetz zur Kläranlage zu und werden dort gereinigt. Dem Abwasser ist in der Berechnung kein Preis zugewiesen, da es ein Abfallprodukt ist und die Gemeinde für die Errichtung und Erhaltung des Kanalnetzes aufkommt.

Als weiteres Rohmaterial bezieht die Kläranlage Freistadt Strom aus dem öffentlichen Netz, da der elektrische Selbstversorgungsgrad im Mittel lediglich 37% beträgt. Der eigens erzeugte **Strom** setzt sich zusammen aus der Verbrennung des Klärgases in einer Mikrogesturbinen und einer Photovoltaikanlage.

Der thermische Selbstversorgungsgrad der Kläranlage Freistadt entspricht 100% in allen Perioden. Die Wärme wird durch die Verbrennung des Klärgases mit Mikrogesturbinen und Gasbrenner gewonnen. Die Möglichkeit des Bezugs von **Erdgas** aus dem öffentlichen Netz ist dennoch erforderlich, falls das Klärgas nicht ausreicht oder aufgrund einer Aufreinigung nicht mehr zur Verfügung stehen sollte.

Als potentiell Rohmaterial für eine Co-Fermentation wird **Altspeiseöl** aus dem Bereich organischer Abfälle berücksichtigt. Heutzutage wird das Altspeiseöl im Bezirk Freistadt kostenlos von Altstoffsammelzentren entgegengenommen (in 25 von 27 Gemeinden) und vom Landesabfallverwertungsunternehmen in ein Abfalllogistikzentrum nach Wels transportiert. Von dort wird es als Rohmaterial für die Biodieselherstellung verkauft. Alternativ könnte es in der Kläranlage Freistadt als Co-Ferment im Faulturn zur zusätzlichen Klärgasproduktion eingesetzt werden.

Als weiteres Co-Ferment wird **unstabilerter Klärschlamm** betrachtet. Bereits heute nimmt die Kläranlage Freistadt unstabilerter Klärschlamm von Kleinkläranlagen aus der Umgebung, wie zum Beispiel der Ortschaften Lichtenau und Harrachstal, an. Für die Entgegennahme des Klärschlammes verrechnet die Kläranlage Freistadt Entsorgungskosten, um die zusätzlichen Kosten der Verarbeitung und der weiteren Entsorgung zu decken.

Bei den zur Verfügung stehenden **Flächen für die Nutzung von Sonnenenergie** wird zwischen Dach- und Beckenflächen sowie Rasenfläche unterschieden. Bei der Nutzung von Dach- und Beckenflächen stehen Photovoltaik- und Solarthermieanlagen in Konkurrenz zueinander. Für die Nutzung der Rasenfläche ergibt sich eine zusätzliche Konkurrenz zur solaren Klärschlamm-trocknung.

## 5.2.2 Technologien

Die gesamte **Abwasserreinigung** der Kläranlage stellt in der Optimierungsberechnung eine Technologie dar. Eine detaillierte energetische und verfahrenstechnische Untersuchung der Reinigungsprozesse wurde vom Projektteam des Instituts für Siedlungswasserbau der BOKU Wien durchgeführt und ist nicht Teil dieser Arbeit.

Der Primärschlamm aus dem Vorklärbecken der Abwasserreinigung wird auf der Kläranlage Freistadt direkt in den Faulturm geleitet, da er bereits eingedickt aus dem Vorklärbecken abgezogen wird. Der Überschussschlamm aus dem Nachklärbecken wird zuvor mittels **maschineller Überschussschlammwässerung (MÜSE)** aufkonzentriert.

Der **Faulturm** der Kläranlage Freistadt hat eine Größe von 1.000m<sup>3</sup> und wird auf durchschnittlich 36°C aufgeheizt. Die Verweilzeit des Klärschlammes im Faulturm beträgt im Mittel 41 Tage, woran zu erkennen ist, dass im Faulturm freies Potential für eine Co-Fermentation vorhanden ist.

Der stabilisierte Klärschlamm aus dem Faulturm wird auf der Kläranlage Freistadt mittels **Kammerfilterpresse entwässert** und für die landwirtschaftliche Verwertung als Düngemittel zwischengelagert.

Im Anschluss an die Entwässerung wird die Option einer **Klärschlamm-trocknung** untersucht. Dafür wird in der Optimierungsberechnung zwischen Niedertemperatur-trocknung mittels Abwasserwärmerückgewinnung sowie solarer Klärschlamm-trocknung unterschieden. Die Hochtemperatur-trocknung mittels Klärgas wird für die Kläranlage Freistadt nicht untersucht, da diese aufgrund der Kläranlagen-größe keine wirtschaftliche Option darstellt.

Eine mögliche Entsorgung des Klärschlammes in einer **Monoverbrennungsanlage** wird ebenfalls untersucht. Als Verbrennungstechnik wird der Einsatz des sludge2energy Verfahrens (Wirbelschichtverfahren) der Christoph Groupe Ges.mbB überprüft. Bei dieser Technologie wird in einer Brennkammer mit Hilfe von Anströmböden ein Wirbelbett aus Quarzsand erzeugt. Die Luftgeschwindigkeit wird so gewählt, dass sich ein vollständiges Fluidisieren<sup>xvi</sup> einstellt. Im Anschluss an die Klärschlamm-trocknung tritt der Klärschlamm in die Wirbelschicht ein und wird über das gesamte Wirbelbett verteilt, zerrieben und gezündet. (Bischof & Hosang, 1989) Die Abwärme des Abgases kann mit Hilfe von Abhitze-kesseln und Mikrogasturbine zur Stromerzeugung und Wärmebereitstellung (u.a. für die Klärschlamm-trocknung) verwertet werden, wodurch die Anlage energieautark<sup>xvii</sup> betrieben werden kann. Überschüssige Energie kann gegebenenfalls auf der Kläranlage verwertet werden. Da sich die Technologie zur Monoklärschlamm-verbrennung noch in Entwicklung befindet, ist nicht klar, ob oder wie

viel überschüssige Energie anfallen wird, weshalb diese in der Optimierungsberechnung nicht berücksichtigt wird.

Das Klärgas aus dem Faultrum wird in einem 100m<sup>3</sup> großen **Gasspeicher** zwischengespeichert.

Die Klärgasverwertung auf der Kläranlage Freistadt geschieht derzeit mittels **Gasbrenner** und einer **Kraft-Wärme-Kopplung** in Form einer Mikrogasturbine. Zusätzlich wird die Option der Klärgasverwertung mittels Blockheizkraftwerk in der Optimierungsberechnung untersucht. All diese Technologien erzeugen Hochtemperaturwärme mit Hilfe des Klärgases.

Als alternative Klärgasverwertungsmöglichkeit wird die **Klärgasreinigung** anhand des Druckwechseladsorptionsverfahrens überprüft.

Um gereinigtes Klärgas in das öffentliche Erdgasnetz einspeisen zu können, wird eine **Gaseinspeisestation** benötigt, da gewährleistet sein muss, dass das Gas mit einem höheren Druck als der Leitungsdruck des Gasnetzes eingespeist wird. Desweiteren wird mit einer Gaseinspeisestation die Gaszusammensetzung und –menge überprüft.

Wird nicht das gesamte Klärgas benötigt und ist der Gasspeicher ausgelastet, muss überschüssiges Klärgas mittels **Gasfackel** entsorgt werden. Das Klärgas darf aufgrund des hohen Treibhauspotentials von Methan, auf keinen Fall in die Erdatmosphäre entsorgt werden.

Zur Bereitstellung von zusätzlicher Wärme und gegebenenfalls Kälte wird die Möglichkeit der Abwasserenergienutzung mittels **Wärmetauscher** und **Wärmepumpen** nach der Kläranlage Freistadt überprüft. Da Wärmepumpen effizienter arbeiten (höhere Leistungszahl), wenn sie Niedertemperaturwärme erzeugen, wird nur diese Option in dieser Arbeit berücksichtigt. Bei der Ausführung der Wärmepumpe wird unterschieden zwischen Abwasserenergieboxen zur kläranlageninternen Nutzung der Wärme und Kälte, Wärmepumpen auf der Kläranlage zur externen Nutzung der Wärme und Kälte sowie Wärmepumpen bei den Energieabnehmern vor Ort, die mittels kalter Fernwärme von der Abwasserenergie versorgt werden. Da die Abwasserwärmerückgewinnung nach der Kläranlage untersucht wird, können Plattenwärmetauscher eingesetzt werden. Damit die Menge an bereitgestellter Energie an den Bedarf angepasst ist, wird in der Berechnung in den Winter- sowie Übergangsperiode Niedertemperaturwärme und in der Sommerperiode Kühlenergie mit den Wärmepumpen erzeugt.

Zusätzlich wird in Freistadt die Möglichkeit der **Druckluftabwärmerückgewinnung** untersucht. Die Kompressoren zur Druckluftherzeugung für die biologische Reinigungsstufe strahlen aufgrund von Reibung Verlustwärme ab, die mittels Luft-

Wasser-Wärmepumpen zu nutzbarer Niedertemperaturwärme umgewandelt werden kann.

Zur Gewinnung von elektrischer Energie werden auf der Kläranlage Freistadt bereits mehrere **Photovoltaikanlagen** betrieben. Die Umsetzung weiterer Photovoltaikanlagen auf den vorhandenen Freiflächen wird dennoch überprüft.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung der Sonnenenergie ist die **Solarthermie**. Dabei wird mit Hilfe von Sonnenkollektoren Niedertemperaturwärme gewonnen.

Die unterschiedlichen Kapazitätsklassen der der Technologien, die in der Optimierungsberechnung berücksichtigt werden, sind *Anhang 2* dargestellt.

### 5.2.3 Zwischenprodukte

Zwischenprodukte werden von Technologien innerhalb der untersuchten Struktur erzeugt und können auf unterschiedliche Arten weiterverwertet werden.

Das **gereinigte Abwasser** aus der Kläranlage stellt ein Zwischenprodukt dar, da es neben der direkten Einleitung in den Vorfluter zur Abwasserwärmerückgewinnung eingesetzt werden kann.

Der **entwässerte Klärschlamm** kann einerseits mit Hilfe der Klärschlamm-trocknung weiterverarbeitet oder andererseits entsorgt werden. Als mögliche Entsorgungspfade stehen die Landwirtschaft, Mitverbrennung, Kompostierung oder Deponierung zur Verfügung.

Wird die Option der Klärschlammverwertung mittels Monoverbrennungsanlage von der Optimierungsberechnung gewählt, kann die dadurch entstehende **Asche** entweder auf einer Deponie entsorgt oder zur Phosphorrückgewinnung eingesetzt werden.

Das Zwischenprodukt **Klärgas** kann mittels Gasbrenner, Kraft-Wärme-Kopplung oder Klärgasreinigung weiterverarbeitet oder über eine Gasfackel entsorgt werden.

Bei der Bereitstellung von Wärme wird zwischen Niedertemperaturwärme und Hochtemperaturwärme unterschieden. Niedertemperaturwärme ist in der Berechnung definiert als Wärme im Bereich von 50-80°C und Hochtemperaturwärme im Bereich von 80-130°C.

**Niedertemperaturwärme** kann für den internen Wärmebedarf und für die externe Verwendung durch angepasste Heizungssysteme eingesetzt werden.

**Hochtemperaturwärme** kann ebenfalls für den internen Wärmebedarf verwendet oder in das örtliche Fernwärmenetz integriert werden.

**Kühlenergie** kann auf der Kläranlage, zum Beispiel zur Kühlung der Büroräume oder gegebenenfalls des Kompressorraums, verwendet oder externen Abnehmern angeboten werden.

Das Zwischenprodukt **Strom** wird für den Betrieb von jeder Technologie auf der Kläranlage benötigt, weshalb hier darauf verzichtet wird alle potentiellen Stromverbraucher anzuführen. Alternativ zur internen Nutzung, kann Strom in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden.

## 5.2.4 Endprodukte

Das **gereinigte Abwasser** ist das primäre Endprodukt einer Kläranlage. In Freistadt wird es in die Feldaist, ein Bach der im weiteren Verlauf in die Donau mündet, abgeleitet.

Der derzeitige Entsorgungsweg des Klärschlammes der Kläranlage Freistadt ist die Ausbringung in der **Landwirtschaft**, d.h. Landwirte werden dafür bezahlt, dass sie den entwässerten Klärschlamm bei der Kläranlage abholen und auf ihren Feldern als Düngemittel ausbringen. Das Ausbringen ist nur in den Monaten April und November möglich, weshalb Lagerplatz auf der Kläranlage erforderlich ist.

Eine weitere Möglichkeit der Klärschlamm Entsorgung ist die **Kompostierung**. Die Kompostierungsanlage in Freistadt ist im Frühling sowie im Sommer in Betrieb, weshalb auch hierfür Lagerflächen auf der Kläranlage benötigt werden.

Die **Klärschlammdeponierung** als Klärschlamm Entsorgungsweg ist in Österreich auf Massenabfalldeponien erlaubt, aber aufgrund der Deponieverordnung aus dem Jahr 2004 und dem Verlust des Phosphors (siehe 2.3.4.5 *Schlamm Entsorgung*) zu vermeiden.

Für die Klärschlamm Entsorgung durch **Mitverbrennung** gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen kann der Klärschlamm im entwässerten Zustand (20-30% TS) einer Müllverbrennungsanlage beigemischt werden. Der hohe Wassergehalt ist dort erwünscht, da durch das Entziehen der Verdampfungsenergie aus dem Verbrennungsraum die Temperatur im Verbrennungssofen konstant gehalten wird. (Müller et al., 2008/2010) Zum anderen kann getrockneter Klärschlamm (90% TS, höheren Heizwert) als Ersatzbrennstoff in einem Zementwerk eingesetzt werden.

Bei einer Klärschlammverwertung mittels Monoverbrennungsanlage entsteht **Asche** als Endprodukt, welche für eine spätere **Phosphorrückgewinnung** gelagert oder andernfalls entsorgt werden kann. Die Phosphorrückgewinnung wird in Österreich noch nicht praktiziert, da derzeit der Phosphorimport preiswerter ist (siehe 2.3.4.5 *Schlamm Entsorgung*).

Die gegebenenfalls durch Wärmepumpen und Solarthermie gewonnene **Niedertemperaturwärme** kann an lokale Abnehmer verkauft werden, da weiter entfernte Verbraucher zumeist nicht mehr wirtschaftlich versorgt werden können. In Freistadt soll die Versorgung mit Niedertemperaturwärme zum Heizen eines zukünftigen Betriebsansiedlungsgebietes in der Nähe der Kläranlage untersucht werden. Zusätzlich kann die Niedertemperaturwärme auf der Kläranlage zur Deckung des Wärmebedarfs oder zur Klärschlamm-trocknung eingesetzt werden.

Die aus dem Klärgas gewonnene **Hochtemperaturwärme** kann in das 2km entfernte Fernwärmenetz eingespeist, auf der Kläranlage verbraucht oder ebenfalls lokalen Abnehmern zu Verfügung gestellt werden. Ein Bedarf an Hochtemperaturwärme in der Nähe der Kläranlage Freistadt ist allerdings nicht bekannt.

Mit der **Kühlenergie**, die im Sommer mit Hilfe von Wärmepumpen produziert werden kann, wird ebenfalls die Versorgung des zukünftigen Betriebsansiedlungsgebiets in der Nähe der Kläranlage überprüft.

Wird nicht das gesamte **Klärgas** auf der Kläranlage benötigt, kann es auf Erdgasqualität aufbereitet und entweder in das **öffentliche Gasnetz** eingespeist oder als **Treibstoff** eingesetzt werden.

Überschüssiger **Strom** wird von der Kläranlage Freistadt ohne Einspeisevertrag in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Da der Strom durch die Photovoltaikanlage und das Klärgas gewonnen wird, erhält die Kläranlage Freistadt einen Mischtarif als Einspeisevergütung.

### 5.2.5 Sonstiges

Für die **Nutzung von Sonnenenergie** werden **freie Flächen** auf Gebäuden, Becken oder auf dem Erdboden benötigt. Da diese nicht unlimitiert zur Verfügung stehen, wird die Flächenverfügbarkeit als Ressource behandelt und begrenzt.

Für die Bereitstellung von Wärme und Kälte für lokale externe Abnehmer werden die Kosten für die Errichtung von **Leitungen** berücksichtigt. Dabei wird zwischen Niedertemperaturleitungen, Hochtemperaturleitungen und kalter Fernwärmeleitung (kein Wärmeverlust in der Leitung) unterschieden.

Wird der Klärschlamm extern mittels Mitverbrennung, Kompostierung oder Deponierung entsorgt fallen **Transportkosten** für die Kläranlage an, die in der Optimierungsberechnung pro Kilometer berücksichtigt werden.

## 5.2.6 Quellenverzeichnis der Daten für die Optimierungsberechnung

Tabelle 6: Quellenangaben der Daten der einzelnen Komponenten

<b>Rohmaterialien</b>	
<b>Komponenten</b>	<b>Quelle</b>
Abwassermenge	Kerschbaummayr (2014)*
Netz-Elektrizität	Kerschbaummayr (2014)*
Erdgaspreis	Zach (2015)*
Altspeiseöl	Kragl (2015)*
unstabiler Klärschlamm	Kerschbaummayr (2014)*
<b>Technologien</b>	
<b>Komponenten</b>	<b>Quelle</b>
Kläranlage	Kerschbaummayr (2014)*
MÜSE	Kerschbaummayr (2014)*
Faulturm	Kerschbaummayr (2014)*
Entwässerung	Kerschbaummayr (2014)*
Hochtemperaturtrockner	Callegari (2015)*
Niedertemperaturtrockner	Adelberger (2014b)*
Solare Trocknung	Kretschmer (2015)*
Monoverbrennung	Pichler (2014)* Schellenberg (2014)*
Gasspeicher	Kerschbaummayr (2014)*
Gasfakel	Kerschbaummayr (2014)*
Gasbrenner	Kerschbaummayr (2014)*
Mikrogasturbine	Kerschbaummayr (2014)*
Blockheizkraftwerk	ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (2011)
Klärgasreinigung	Klinski (2006)
Gaseinspeisestation	Klinski (2006)
Wärmetauscher	Adelberger (2014c)*
Wärmepumpen	Adelberger (2014c)
Druckluftabwärmerückgewinnung	Adelberger (2014a)*
Photovoltaik	Kerschbaummayr (2014)*
Solarthermie	Maier (2014)*
<b>Endprodukte</b>	
<b>Komponenten</b>	<b>Quelle</b>
Hochtemperaturwärme	Stöglehner (2015)*
Niedertemperaturwärme	Maier (2015)*
Kühlenergie	Maier (2015)*
Strom	Kerschbaummayr (2014)*
Klärgas für Gasnetz	Energie (2014)*
Klärgas als Treibstoff	Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touringclub - ÖAMTC (2015)
Klärschlamm für Landwirtschaft	Kerschbaummayr (2014)*

Klärschlamm für Kompostierung	Lindtner & Haslinger (2012)
Klärschlammdeponierung	Lindtner & Haslinger (2012)
Klärschlamm für Mitverbrennung	Callegari (2015)*
Asche für Rohstoffrückgewinnung	Pichler (2014)*
<b>Sonstiges</b>	
Flächen	Kerschbaummayr (2014)*
Leitungen	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010)
Transport	Maier (2015)*

\*Die Daten wurden der internen Erhebung der Projektpartner des Abwasserenergieprojektes entnommen.

## 6 Ergebnisse der Optimierungsberechnung der Kläranlage Freistadt

Sind alle Daten der Komponenten des maximalen Technologienetzwerks in die Optimierungssoftware PNS Studio implementiert, errechnet das Programm die wirtschaftlichste Technologiestruktur (Optimalstruktur). Diese enthält Informationen über die Menge der eingesetzten Rohmaterialien und der erzeugten Produkte. Die Größe sowie die Auslastung der für die Umsetzung benötigten Technologien werden ebenfalls angegeben. Desweiteren informiert das Ergebnis darüber, wie viel die errechnete Optimalstruktur kosten bzw. erwirtschaften würde.

### 6.1 Basisszenario

Das Basisszenario zeigt, welche Optimalstruktur gewählt wird, wenn die Produkte zu marktüblichen bzw. kostendeckenden Preisen angeboten werden. Die herangezogenen Preise sind in *Tabelle 7* dargestellt.

**Tabelle 7: Produktpreise des Basisszenarios**

Produkt	Preis*
Hochtemperaturwärme	57€/MWh
Niedertemperaturwärme	40€/MWh
Kühlenergie	58€/MWh
Strom	54€/MWh
Klärgas für Gasnetz	0,45€/m <sup>3</sup>
Klärgas als Treibstoff	0,78€/m <sup>3</sup>
Klärschlamm für Landwirtschaft	30€/t
Klärschlamm für Kompostierung	60€/t
Klärschlammdeponierung	68€/t
Klärschlamm für Mitverbrennung	59€/t
Asche für Rohstoffrückgewinnung	10€/t

\* Die Quellen der Daten sind in *Tabelle 6* angegeben.

Die mit Hilfe der Prozess-Netzwerk-Synthese ermittelte Optimalstruktur des Basisszenarios ist in *Abbildung 28* vereinfacht dargestellt.



## 6.2 Szenario 1: Wärmeversorgung des INKO-Betriebsansiedlungsgebiets

Der Bau der Schnellstraße S10 dient der Entlastung der Bundesstraße B310, die durch das Zentrum von Freistadt führt. Zusätzlich bietet der Ausbau die Möglichkeit zur Erschließung neuer Betriebsstandorte. Im Zuge des Projektes *Interkommunale Wirtschaftsachse S10* wurde, in Kooperation mit acht Gemeinden entlang der neuen Mühlviertel Schnellstraße und der Wirtschaftskammer Freistadt, Freistadt Süd als bester gemeinsamer Standort für ein zukünftiges Betriebsansiedlungsgebiet ausgewählt. Das Institut für Raumplanung und ländliche Neuordnung der BOKU Wien (Projektpartner im *Abwasserenergieprojekt*) hat für dieses Betriebsansiedlungsgebiet eine Grobkalkulation der erforderlichen Leitungslängen sowie des kurz-, mittel- und langfristigen Wärme- und Kühlenergiebedarfs für Raumheizung und -kühlung erstellt (siehe *Abbildung 29* und *Tabelle 8*).

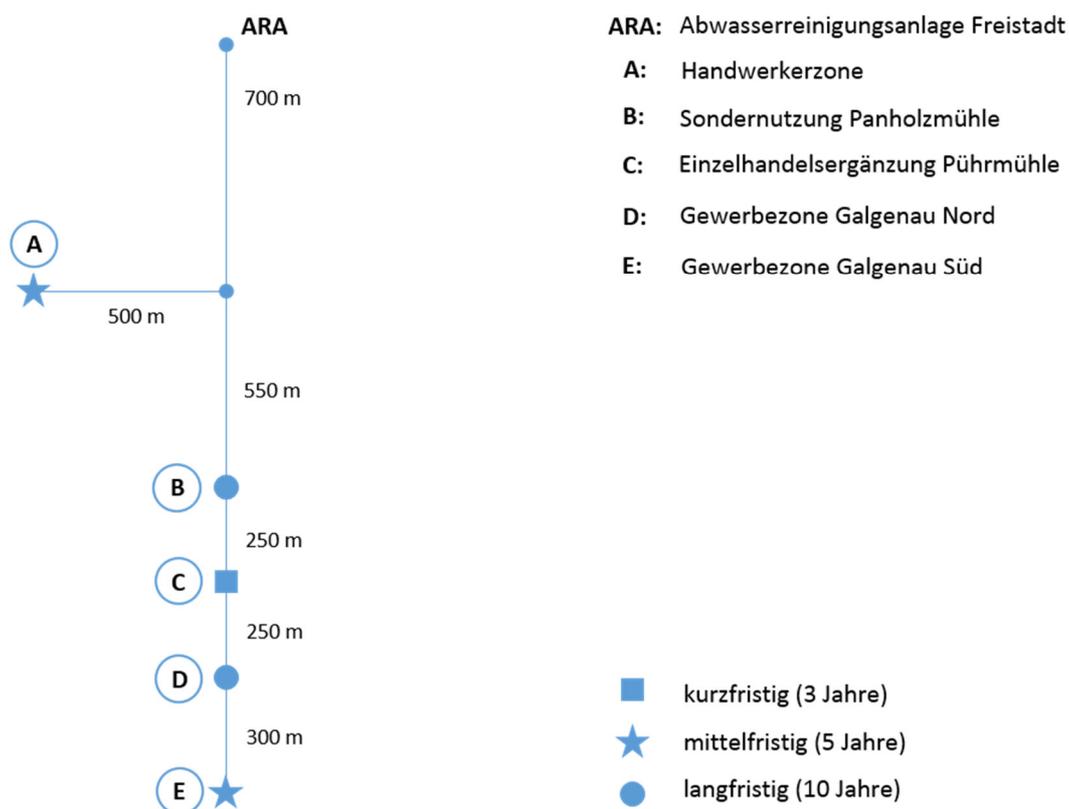


Abbildung 29: Grobkalkulation der Leitungsdistanzen der INKO-Betriebsansiedlung

**Tabelle 8: Grobkalkulation des Wärme- und Kühlenergiebedarfs für Raumheizung und -kühlung der INKO-Betriebsansiedelung**

	Wärmebedarf Winter [MWh/a]	Wärmebedarf Übergang [MWh/a]	Kühlenergiebedarf Sommer [MWh/a]
Einzelhandelsergänzung Pühtmühle	624	296	49
<b>kurzfristig</b>	624	296	49
Handwerkerzone	1.672	794	410
Gewerbezone Galgenau Süd	620	294	152
<b>kurz- und mittelfristig</b>	2.916	1.384	611
Sondernutzung Panholzmühle	823	391	202
Gewerbezone Galgenau Nord	835	396	205
<b>kurz-, mittel- und langfristig</b>	4.574	2.171	1.018

Da es für Niedertemperaturwärme noch keinen marktüblichen Preis gibt, wurde mit Hilfe der Prozess-Netzwerk-Synthese eine Sensibilitätsanalyse des Wärmepreises erstellt. Diese zeigt auf, welchen Preis die Kläranlage Freistadt für die Niedertemperaturwärme der Abwasserenergienutzung verrechnen muss, um den zeitversetzt anfallenden Wärme- und Kühlenergiebedarf für Raumheizung und -kühlung des INKO-Betriebsgebiets zu versorgen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in *Tabelle 9* dargestellt.

**Tabelle 9: Ergebnisse der Preisanalyse für Niedertemperaturwärme**

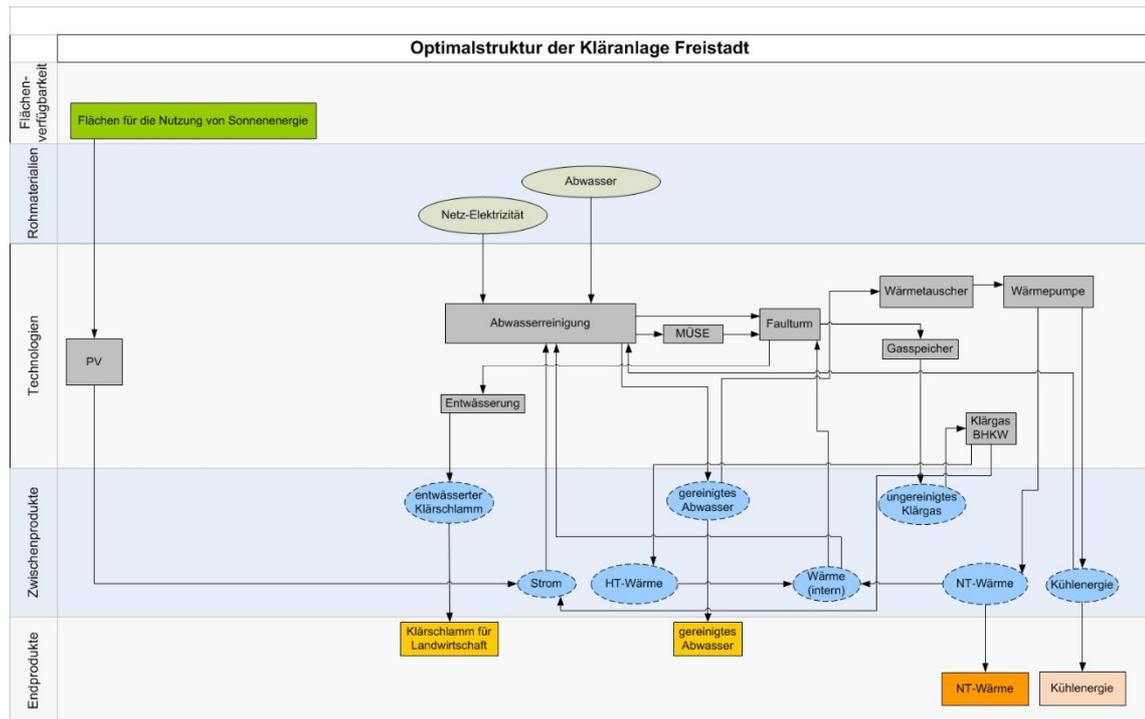
Bedarf	Preis für Niedertemperaturwärme
kurzfristig	62€/MWh
kurz-, und mittelfristig	48€/MWh
kurz-, mittel- und langfristig	42€/MWh*

\* Es wird nicht der gesamte Bedarf gedeckt.

Aus den Ergebnissen in *Tabelle 9* ist ersichtlich, dass Niedertemperaturwärme bei steigendem Bedarf günstiger angeboten werden kann. Dies resultiert daraus, dass sich die Fixkosten zur Bereitstellung der Energie (z.B.: Abwasserenergieanlage, Leitungsbau, Personal) auf eine größere Energiemenge verteilen und somit eine MWh günstiger zur Verfügung gestellt werden kann.

Werden die resultierenden Niedertemperaturpreise mit dem Preis für Fernwärme in Freistadt verglichen (57€/MWh), zeigt sich, dass ab einem bestimmten Bedarf die Abwasserenergiewärme günstiger angeboten werden kann.

In *Abbildung 30* ist eine vereinfachte Darstellung der Optimalstruktur zur Versorgung des kurzfristigen Bedarfs abgebildet.



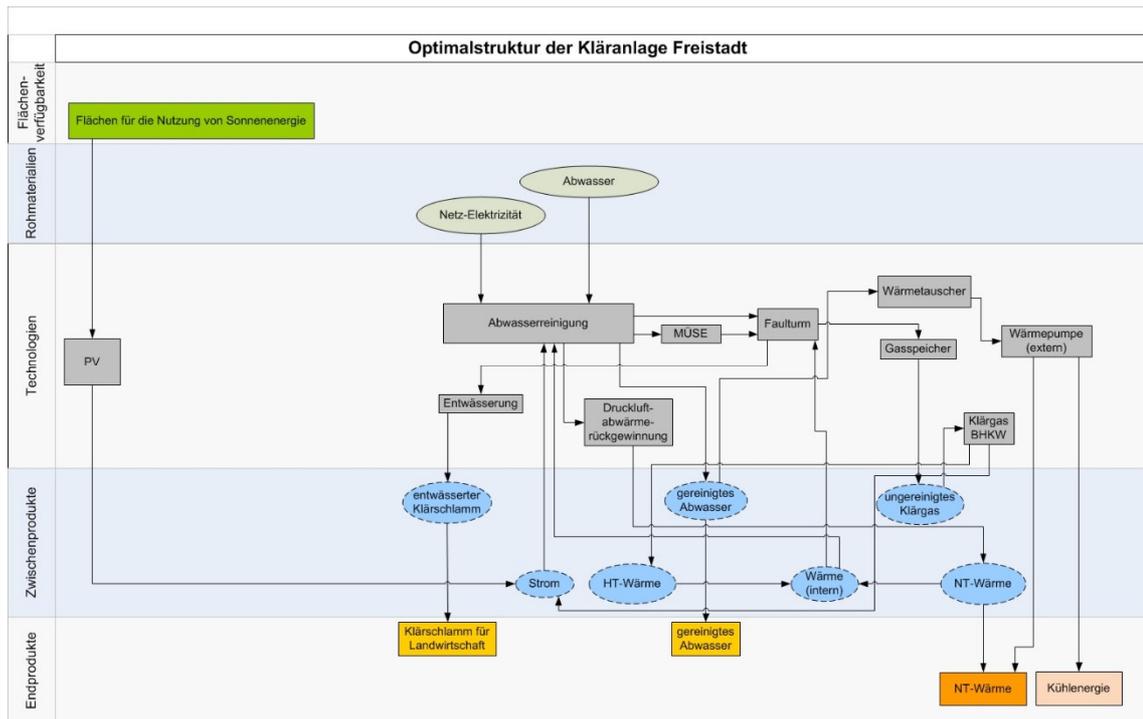
**Abbildung 30: Optimalstruktur zur Versorgung des kurzfristigen Bedarfs der INKO-Betriebsansiedlung**

Diese Struktur zeigt, dass für die Versorgung des kurzfristigen Bedarfs an Nieder-temperaturwärme und Kühlenergie der Einzelhandelsergänzung Pühmühle eine Wärmepumpe auf der Kläranlage Freistadt errichtet wird. Die Klärgasverwertung findet mittels BHKW statt. Das dadurch entstehende Wärmedefizit auf der Kläranlage, kann ebenfalls mit Hilfe der Wärmepumpe gedeckt werden. Die bestehende Photovoltaikanlage wird zur Stromproduktion eingesetzt.

Die Klärschlammverarbeitung findet ebenfalls anhand maschineller Überschussschlammmentwässerung, Faulturm und Entwässerung statt. Als günstige Option wird der Klärschlamm in der Landwirtschaft entsorgt.

Die Optimalstruktur zur Versorgung des kurz- und mittelfristigen sowie des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs der INKO-Betriebsansiedlung ist in *Abbildung 31* dargestellt. Da in der vereinfachten Darstellung nicht zwischen der Größe und Anzahl an Technologien unterschieden wird, ist diese für beide Bedarfssituationen gültig.

Eine detaillierte Aufstellung der Ergebnisse mit Informationen zu Stoff- und Energieflüssen sowie zu Auslegungsparametern der Technologien ist im *Anhang 3* dargestellt. Die Gesamtkosten zur Umsetzung der vorgeschlagenen Optimalstruktur sind ebenfalls angegeben.



**Abbildung 31: Optimalstruktur zur Versorgung des kurz- und mittelfristigen sowie des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs der INKO-Betriebsansiedlung**

Die Versorgung des kurz- und mittelfristigen sowie des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs erfolgt mittels externer Wärmepumpen, die ihre Energie aus kalter Fernwärme beziehen. Dadurch können die Verluste der Wärmeleitungen umgangen werden. Bei der Versorgung des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs deckt die PNS als wirtschaftlichste Variante nicht den gesamten Energiebedarf für Raumheizung und -kühlung. Für die Klärgasverwertung wird erneut ein BHKW für die Strom- und Wärmeerzeugung gewählt. Das dadurch entstehende Wärmedefizit wird mit Hilfe der Druckluftabwärmereückgewinnung gedeckt. Anhand der bestehenden Photovoltaikanlage wird zusätzlicher Strom gewonnen.

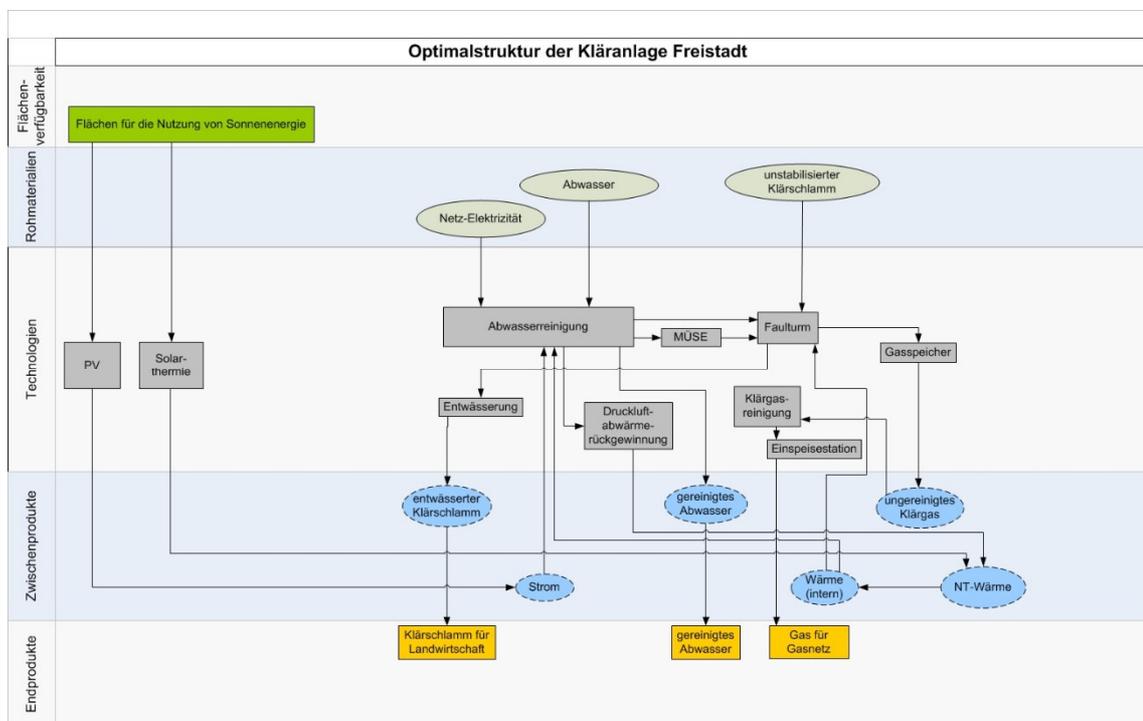
Die Klärschlammverwertung wird im Vergleich zur derzeitigen Verwertung der Kläranlage Freistadt nicht verändert. Anschließend an die MÜSE, den Faulturm und die Entwässerung wird der Klärschlamm in der Landwirtschaft entsorgt.

## 6.3 Szenario 2: Klärgasreinigung und anschließendes Einspeisen in das öffentliche Erdgasnetz

Das im Zuge der anaeroben Schlammstabilisierung anfallende Klärgas wird derzeit auf der Kläranlage Freistadt mittels Mikrogasturbine und Gasbrenner zu Strom und Wärme verwertet. Durch die Möglichkeit der Abwasserwärme- und Druckluftabwärme-

rückgewinnung sowie Solarthermienutzung könnte der Wärmebedarf der Kläranlage Freistadt gedeckt werden und das anfallende Klärgas für eine externe Verwertung eingesetzt werden. Da die Kläranlage Freistadt an das öffentliche Erdgasnetz angeschlossen ist, wurde anhand der PNS überprüft, ob sich die Aufbereitung und Einspeisung des Klärgases in das Netz lohnt bzw. ab welcher Einspeisevergütung es rentabel wird.

Gemessen am marktüblichen Einspeisetarif von 0,45€/m<sup>3</sup> für aufbereitetes Klärgas, sind die Gasaufbereitungskosten höher als der erzielbare Gewinn. Ab einem Einspeisetarif von 0,99€/m<sup>3</sup> kann die Kläranlage Freistadt das Klärgas zu wirtschaftlichen Bedingungen aufbereiten und in das öffentliche Erdgasnetz einspeisen. Die Optimalstruktur der resultierenden Umsetzungsmethode ist in *Abbildung 32* dargestellt.



**Abbildung 32: Optimalstruktur zur Klärgasnetzspeisung der Kläranlage Freistadt**

Die Optimalstruktur zeigt, dass zusätzlicher unstabiler Klärschlamm zur Steigerung der Klärgasausbeute im Faulturm co-fermentiert wird. Das gesamte Klärgas wird über die Klärgasreinigung und die Einspeisestation in das öffentliche Gasnetz integriert. Das dadurch entstehende Wärmedefizit wird mit Hilfe der Druckluftabwärmereückgewinnung und einer Solarthermieanlage gedeckt. Die bestehende Photovoltaikanlage wird zur Stromgewinnung eingesetzt.

Der Klärschlamm wird, wie es bereits auf der Kläranlage Freistadt praktiziert wird, im Anschluss an eine Entwässerung in der Landwirtschaft entsorgt.

Eine detaillierte Aufstellung der Ergebnisse mit Informationen zu Stoff- und Energieflüssen sowie zu Auslegungsparametern der Technologien ist im *Anhang 3*

dargestellt. Die Gesamtkosten zur Umsetzung der vorgeschlagenen Optimalstruktur sind ebenfalls angegeben.

## 6.4 Szenario 3: Alternativen zur landwirtschaftlichen Klärschlamm Entsorgung mit Option der Phosphorrückgewinnung

Für die Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, jedoch ist keines vollständig ausgereift. In der Optimierungsberechnung der Kläranlage Freistadt wurde die Monoverbrennung von Klärschlamm für eine anschließende Phosphorrückgewinnung aus der Asche berücksichtigt. Da es derzeit keine Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Österreich gibt, wurde die Errichtung einer Monoverbrennungsanlage untersucht. Die Auswertung erster Daten hat gezeigt, dass auf der Kläranlage Freistadt nicht genügend Klärschlamm zur Verfügung steht, um eine Monoverbrennungsanlage wirtschaftlich zu betreiben. Deshalb wurde eine statische Berechnung durchgeführt, um aufzuzeigen wie viel entwässerter Klärschlamm von anderen Kläranlagen erforderlich ist, damit es zu keiner Erhöhung der Entsorgungskosten des Klärschlammes für die Kläranlage Freistadt kommt. Das Ergebnis ist in *Tabelle 10* dargestellt.

**Tabelle 10: Klärschlamm m e n g e n u n d - k o s t e n e i n e r M o n o v e r b r e n n u n g s a n l a g e**

<b>Monoverbrennungsanlage 2MW</b>	
Klärschlammmenge Freistadt	1.829t/a
zusätzlich benötigt	18.171t/a
Kosten 2-MW-Anlage gesamt	753.668€/a
derzeitige Entsorgungskosten	37.560€/a
Kosten ohne eigene Entsorgung	698.798€/a
nötiger Ertrag für Klärschlamm	38,5€/t

Die Kläranlage Freistadt müsste 18.171t entwässerten Klärschlamm pro Jahr um 38,5€/t entgegennehmen, damit der Betrieb einer Monoverbrennungsanlage zu denselben Konditionen wie heute möglich wäre. Diese Klärschlammmenge entspricht einem Einwohneräquivalent von ca. 260.000EW, was die regional zur Verfügung stehende Klärschlammmenge übersteigt (Belastung der Kläranlagen im Bezirk Freistadt: 55.340EW). Daher stellt eine Monoverbrennungsanlage noch keine alternative Klärschlamm Entsorgungsmöglichkeit mit der Option einer Phosphorrückgewinnung für die Kläranlage Freistadt dar.

## 7 Zusammenfassung

Anhand der energetischen Analyse der Kläranlage Freistadt mit Hilfe der Prozess-Netzwerk-Synthese wurde gezeigt zu welchen Bedingungen die Produkte einer Abwasserreinigungsanlage (Abwasser, Klärgas, Klärschlamm) effektiv weiterverarbeitet werden können.

Das Abwasser, das in der Regel ungenutzt in den Vorfluter entsorgt wird, kann mittels Wärmepumpen zur Abwasserenergienutzung eingesetzt werden. Niedertemperaturwärme und Kühlenergie können dadurch lokalen Abnehmern zur Verfügung gestellt werden. Anhand einer Sensibilitätsanalyse des Niedertemperaturwärmepreises wurde gezeigt, dass der Bedarf an Energie in der näheren Umgebung der Kläranlage ausschlaggebend ist, ob Abwasserenergie konkurrenzfähig ist und anstelle von fossilen Energieträgern angeboten werden kann. Die Ergebnisse veranschaulichen, dass zum Einen der kurz- und mittelfristige sowie zum Anderen der kurz-, mittel- und langfristige Energiebedarf für Raumheizung und -kühlung der zukünftigen INKO-Betriebsansiedelung durch Abwasserenergienutzung preiswerter als mit herkömmlichen Energieträgern versorgt werden kann. Voraussetzung ist allerdings, dass das Heizungssystem von potentiellen Abnehmern für den Einsatz von Niedertemperaturwärme geeignet ist.

Als alternative Klärgasverwertungsmethode wurde die Einspeisung des Klärgases in das öffentliche Erdgasnetz untersucht. Diese Analyse hat gezeigt, dass eine Klärgasaufbereitung für die Kläranlage Freistadt, aufgrund der geringen Menge an Klärgas, nicht rentabel ist. Die Verbrennung des Klärgases mittels Kraft-Wärme-Kopplung ist für Kläranlagen dieser Größenordnung besser geeignet. Zusätzlich kann der elektrische und thermische Selbstversorgungsgrad der Kläranlage erhöht werden.

Da sich die Lebensmittelindustrie zunehmend gegen eine Entsorgung des Klärschlammes in der Landwirtschaft ausspricht, wurde in der Optimierungsberechnung die Klärschlammmonoverbrennung für eine anschließende Phosphorrückgewinnung untersucht. Es wurde gezeigt, dass auf der Kläranlage Freistadt zu wenig Klärschlamm für den wirtschaftlichen Betrieb einer Monoverbrennungsanlage vorhanden ist. Diese Art der Klärschlamm Entsorgung würde eine überregionale Kooperation voraussetzen.

Die Abwasserwärmerückgewinnung stellt somit die einzige zu wirtschaftlichen Bedingungen umsetzbare Verwertung eines Produkts der Kläranlage Freistadt dar. Die damit verbundene Reduzierung des Verbrauchs fossiler Rohstoffe sowie die Verwendung einer dezentralen, krisensicheren sowie kostenfreien Energiequelle, wird dazu führen, dass Abwasserenergienutzung mittels Wärmepumpen in Zukunft an Bedeutung gewinnt.

## 8 Ausblick

Die Laufzeit des *Abwasserenergieprojekts – Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energiekonzepte* endet 2016. In Zuge dessen werden, neben der Kläranlage Freistadt, zwei weitere Kläranlagen (Hall in Tirol und Gleisdorf) mit Hilfe der Prozess-Netzwerk-Synthese der energetischen Optimierungsberechnung unterzogen. Desweiteren wird für die drei Kläranlagen vom Projektteam des Siedlungswasserbauinstituts der BOKU Wien eine energetische Bilanz erstellt und die Ergebnisse mit Optimalwerten verglichen, um Energieeinsparungspotentiale während der Abwasserreinigung aufzuzeigen. Das Institut für Raumplanung und ländliche Neuordnung der BOKU Wien erstellt für die nähere Umgebung der drei Kläranlagen eine räumliche Betrachtung und Analyse der Energieverbrauchsdaten unter Berücksichtigung künftiger Entwicklungen mit Hilfe der Energiezonenplanung.

Anhand der Ergebnisse dieser Analysen werden Umsetzungskonzepte und Leitlinien zur Abwasserenergienutzung auf Kläranlagen entwickelt, die helfen sollen Hemmnisse von Entscheidungsträgern, Bauherren sowie Planern zu überwinden. Weiters wird versucht, durch gezielte Disseminationsaktivitäten (Website, Workshops, Beratung) den Bekanntheitsgrad der Abwasserwärmerückgewinnung zu steigern. Ein österreichisches Kompetenzzentrum für Abwasserenergienutzung soll entstehen.

Aktuelle Entwicklungen sowie detaillierte Informationen zum Abwasserenergieprojekt können der Webseite [www.abwasserenergie.at](http://www.abwasserenergie.at) entnommen werden.

## Glossar

- i **Vorfluter:** natürlicher oder künstlicher Wasserlauf, der Wasser und [vorgereinigtes] Abwasser aufnimmt und weiterleitet. Bibliographisches Institut AG (2009)
- ii **Infiltrieren:** Eindringen; Einsickern. Bibliographisches Institut AG (2009)
- iii **Eutrophierung:** Unerwünschte Zunahme von Nährstoffen in Gewässern. Bibliographisches Institut AG (2009)
- iv **Flussgebietseinheit:** Haupteinheit für die Bewirtschaftung von Einzugsgebieten festgelegtes Land- oder Meeresgebiet, das aus einem oder mehreren benachbarten Einzugsgebieten und den ihnen zugeordneten Grundwässern und Küstengewässern besteht. Europäisches Parlament und Rat (2000)
- v **Sedimentieren:** Ablagern. Bibliographisches Institut AG (2009)
- vi **Aerob:** Sauerstoff zum Leben brauchend. Bibliographisches Institut AG (2009)
- vii **Adsorbieren:** Gase oder gelöste Stoffe an festen Körpern anlagern. Bibliographisches Institut AG (2009)
- viii **Anoxisch:** In der Abwassertechnik üblicher Begriff zur Beschreibung Biozönose, in deren (wässriger) Umgebung kein gelöster Stoff, aber chemisch gebundener Sauerstoff, zum Beispiel in Form von Nitrat, vorhanden ist, beispielsweise bei der biologischen Denitrifikation. Bischofsberger & Hegemann (2005)
- ix **Anaerob:** Ohne Sauerstoff lebend. Bibliographisches Institut AG (2009)
- x **Patogen:** Krankheitserregend. Bischofsberger & Hegemann (2005)
- xi **Trockensubstanz (Trockenmasse):** Die nach einem Trocknungsverfahren erhaltene Masse in mg, g, kg, auch als Trockensubstanz bezeichnet. Bischofsberger & Hegemann (2005)
- xii **Flockung:** Bildung abscheidbarer Flocken durch Aggregation kleiner Teilchen; der Vorgang wird üblicherweise durch mechanische, physikalische, chemische oder biologische Mittel unterstützt. Bischofsberger & Hegemann (2005)
- xiii **Siloxane:** Gruppenbezeichnung für zum Teil hochpolymere offenkettige oder cyclische Verbindungen mit alternierenden Si-O-Verbindungen. Neumüller (2003)
- xiv **Exergie:** Exergie ist Energie, die sich unter Mitwirkung einer vorgegebenen Umgebung in jede andere Energieform vollständig umwandeln lässt. Baehr (2002)
- xv **Heterogen:** andersgeartet, ungleichartig. Bibliographisches Institut AG (2009)

<sup>xvi</sup> **Fluidisieren:** Begriff aus der Wirbelschicht-Technologie. Bei einer Wirbelschicht handelt es sich um eine Schüttung von Feststoffpartikeln, die durch eine aufwärtsgerichtete Strömung eines Fluids in einen fluidisierten Zustand versetzt wird.  
L.B. Bohle

Fluid: zusammenfassende Bezeichnung für Flüssigkeiten, Gase und Plasmen.  
Bibliographisches Institut AG (2009)

<sup>xvii</sup> **Autarkie:** Unabhängigkeit von äußeren Dingen, Einflüssen und Affekten.  
Bibliographisches Institut AG (2009)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der mechanisch-biologischen Abwasserreinigung, Hellmann & Riegler (2003) .....	17
Abbildung 2: Feinrechen bzw. Siebrechen nach Huber, Bischof & Hosang (1989)	18
Abbildung 3: Belüfteter Sandfang, Kainz et al. (2012) .....	19
Abbildung 4: Darstellung der verschiedenen Beckenbereiche eines Absetzbeckens, Bischof & Hosang (1989) .....	19
Abbildung 5: Absetzkurve städtischer Abwässer, Bischof & Hosang (1989).....	20
Abbildung 6: Systemskizze des Belebungsverfahrens, Bischof & Hosang (1989) .	21
Abbildung 7: Stoffwechsel der Bakterien, Bischofsberger & Hegemann (2005) ...	21
Abbildung 8: Eine Möglichkeit der Anordnung von Nitrifikation und Denitrifikation, Bischof & Hosang (1989) .....	23
Abbildung 9: Fließschema der Schlammbehandlung, Hellmann & Riegler (2003)	25
Abbildung 10: Bauformen von Faulbehältern (Schnitt), Kainz et al. (2012) .....	27
Abbildung 11: Schema einer Kammerfilterpresse, Bischof & Hosang (1989) .....	28
Abbildung 12: Schema der solaren Klärschlamm-trocknung, Zell (2014) .....	29
Abbildung 13: Verwertungs- und Entsorgungswege des Klärschlamm in Österreich 2010, Überreiter et al. (2012).....	30
Abbildung 14: Betriebskostenverteilung österreichischer Kläranlagen, Lindtner & Vohryzka (2015) .....	31
Abbildung 15: Energieverbrauch der am Benchmarking teilgenommenen Kläranlagen, Lindtner & Vohryzka (2015).....	32
Abbildung 16: Verteilung des Energieverbrauchs, Lindtner & Vohryzka (2015) ..	33
Abbildung 17: Die Zerstörungswirkung von Kavitationsblasen, Wess (2004) .....	35
Abbildung 18: Funktionsweise eines Blockheizkraftwerks, Lehmacher (2005).....	37
Abbildung 19: Funktionsweise einer Wärmepumpe, Glen Dimplex Deutschland GmbH.....	40
Abbildung 20: Mögliche Standorte zur Energierückgewinnung aus Abwasser, Müller et al. (2008/2010) .....	41
Abbildung 21: Darstellung eines P-Graph, Friedler et al. (1992).....	46
Abbildung 22: Von der Maximalstruktur zur Optimalstruktur, Kollmann et al. (2015).....	48
Abbildung 23: Eingabemaske von M-typ Daten im PNS Studio für Rohmaterialien und Endprodukte (links) und Zwischenprodukte (rechts).....	49
Abbildung 24: Eingabemaske für Technologien aus dem PNS Studio .....	49
Abbildung 25: Luftbild der Kläranlage Freistadt .....	50
Abbildung 26: Technologienetzwerk der Ausgangssituation der Kläranlage Freistadt.....	51
Abbildung 27: Maximales Technologienetzwerk zur Optimierung der Kläranlage Freistadt.....	54
Abbildung 28: Technologienetzwerk der Ausgangssituation der Kläranlage Freistadt.....	64

---

Abbildung 29: Grobkalkulation der Leitungsdistanzen der INKO- Betriebsansiedelung .....	65
Abbildung 30: Optimalstruktur zur Versorgung des kurzfristigen Bedarfs der INKO-Betriebsansiedelung .....	67
Abbildung 31: Optimalstruktur zur Versorgung des kurz- und mittelfristigen sowie des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs der INKO- Betriebsansiedelung .....	68
Abbildung 32: Optimalstruktur zur Klärgasnetzeinspeisung der Kläranlage Freistadt.....	69
Abbildung 33: Präsentationsposter zum Thema Heizen und Kühlen mit Abwasserwärmepumpen .....	84
Abbildung 34: Präsentationsposter zum Thema Solarenergie .....	85
Abbildung 35: Präsentationsposter über die Möglichkeiten der Klärschlammverwertung .....	86
Abbildung 36: Präsentationsposter über die Nutzungspotentiale von Klärgas.....	87
Abbildung 37: Präsentationsposter zum Thema Wärme-/Kältenutzung außerhalb der Kläranlage .....	88

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maximal zulässige Stoffkonzentrationen im Ablauf einer Kläranlage, Kainz et al. (2012).....	16
Tabelle 2: Stabilisierungsgrad von Klärschlamm in Relation zum Glühverlust, Resch & Schatz (2010) .....	26
Tabelle 3: Faulzeit in Abhängigkeit der Temperatur, Schröder & Zitzelsberger (2005) .....	27
Tabelle 4: Zusammensetzung von Klärgas, Reppich et al. (2009) .....	38
Tabelle 5: Nutzungsdauer der Technologien .....	52
Tabelle 6: Quellenangaben der Daten der einzelnen Komponenten.....	61
Tabelle 7: Produktpreise des Basisszenarios .....	63
Tabelle 8: Grobkalkulation des Wärme- und Kühlenergiebedarfs für Raumheizung und -kühlung der INKO-Betriebsansiedlung .....	66
Tabelle 9: Ergebnisse der Preisanalyse für Niedertemperaturwärme .....	66
Tabelle 10: Klärschlammengen und -kosten einer Monoverbrennungsanlage.....	70
Tabelle 11: In der Optimierungsberechnung berücksichtigte Kapazitätsklassen der Technologien.....	89
Tabelle 12: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse des Basisszenarios .....	91
Tabelle 13: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse zur Versorgung des kurzfristigen Bedarfs.....	92
Tabelle 14: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse zur Versorgung des kurzfristigen Bedarfs .....	93
Tabelle 15: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse zur Versorgung des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs .....	94
Tabelle 16: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse zur Versorgung der Klärgaseinspeisung .....	95

## Literaturverzeichnis

**Adelberger, Gottfried** (persönliche Mitteilung, 05.11.2014a).

**Adelberger, Gottfried** (persönliche Mitteilung, 05.11.2014b).

**Adelberger, Gottfried** (persönliche Mitteilung, 12.11.2014c).

**Agis, Hermann (2001).** *Energieoptimierung von Kläranlagen - Pilotprojekt - Detailuntersuchung von 21 Anlagen: Endbericht Teil A.* Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft & Kommunalkredit Austria.

**ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen**

**Energieverbrauch (2011).** *BHKW-Kenndaten 2011 - Module, Anbieter und Kosten.* Essen: energieDRUCK - Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch.

**Baehr, Hans Dieter (2002).** *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen.* 11. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 3-540-43256-6.

**Bertok, Botond; Barany, Mate & Friedler, Ferenc (2012).** *Generating and Analyzing Mathematical Programming Models of Conceptual Process Design by P-graph Software.* I&EC research - Industrial & Engineering Chemistry Research. S. 166–171.

**Bever, Jürgen; Stein, Andreas & Teichmann, Hans (2002).** *Weitergehende Abwasserreinigung.* 4. Auflage. München: Deutscher Industrieverlag. ISBN: 3835665278.

**Bibliographisches Institut AG (2009).** *Duden - Die deutsche Rechtschreibung.* Mannheim: Dudenverlag. ISBN: 978-3-411-04015-5.

**Bischof, Wolfgang & Hosang, Wilhelm (1989).** *Abwassertechnik.* 9. Auflage. Stuttgart: B.G. Teubner. ISBN: 3-519-45216-2.

**Bischofsberger, Wolfgang & Hegemann, Werner (2005).** *Lexikon der Abwassertechnik.* 7. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag. ISBN: 3-8027-2844-0.

**Brown, Juanita & Isaacs, David (2001).** *The World Café: Living Knowledge Through Conversations That Matter.* The Systems Thinker. Vol.: 12. Nr.: 5.

**Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2012).** *Abwasserkennzahlen.* URL:

<http://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasserqualitaet/abwasserreinigung/masseinheiten.html>. [Stand: 23.04.2015].

**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010).**

*Integriertes Klimaschutzkonzept der Stadt Willich - Klimabericht*. Emsdetten.

**Callegari, Christian** (persönliche Mitteilung, 12.01.2015).

**DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 (2013).** *Stand und Perspektiven der*

*Phosphorrückgewinnung aus Abwasser - Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm*. Korrespondenz Abwasser Abfall. Vol.: 60. Nr.: 10.

**Egle, Lukas; Rechberger, Helmut & Zessner, Matthias (2014a).**

*Phosphatrückgewinnung aus dem Abwasser - Endbericht*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

**Egle, Lukas; Rechberger, Helmut & Zessner, Matthias (2014b).** *Phosphorbilanz*

*Österreich - Grundlagen für ein nachhaltiges Phosphormanagement - gegenwärtige Situation und zukünftige Entwicklung - Endbericht*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

**Energie, Steiermark** (persönliche Mitteilung, 22.05.2014).

**Europäisches Parlament und Rat (2000).** *Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines*

*Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*.

**Fricke, Klaus (2009).** *Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen*. Dessau-Roßlau:

Umweltbundesamt.

**Friedler, F.; Tarján, K.; Huang, Y. W. & Fan, L. T. (1992).** *Graph-theoretic*

*approach to process synthesis: axioms and theorems*. Chemical Engineering Science. Vol.: 47. Nr.: 8. S. 1973–1988.

**Fritsch, Gunter & Hömpler, Jürgen (2001/2009).** *Immobilisierung von*

*Schwermetallen auf Rieselflächen der Berliner Forsten*. URL: <http://www.berliner-rieselfelder.de/geschichte/geschichte01.html#RieselSchema>. [Stand: 12.06.2015].

**Glen Dimplex Deutschland GmbH.** *Technik erklärt: Wärmepumpe*. URL:

<http://www.dimplex.de/professional/technik-erklart/waermepumpen/so-funktioniert-eine-waermepumpe.html>. [Stand: 27.04.2015].

**Haberkern, Bernd; Maier, Werner; Schneider, Ursula & Arbeitsgemeinschaft**

**- Ingenieurberatung für Abwassertechnik (2006).** *Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen*. Dessau-Roßlau.

- Hellmann, Dieter-Heinz & Riegler, Günther (2003).** *Maschinentechnik in der Abwasserreinigung - Verfahren und Ausrüstung*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. ISBN: 3-527-30606-4.
- Kainz, Harald; Renner, Helmut; Kauch, Ernst Peter & Gruber, Günter (2012).** *Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft - Trinkwasser, Abwasser, Abfall und Recycling*. 5. Auflage. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH. ISBN: 978-3-7068-42679.
- Kalauz, Károly; Süle, Zlotán; Bertók, Bontond; Friedler, Ferenc & Fan, L.T. (2012).** *Extending Process-Network Synthesis Algorithms with Time Bounds for Supply Network Design*. Chemical Engineering Transactions - AIDIC. Vol.: 29. S. 259–264.
- Kerschbaummayr, Gerhard** (persönliche Mitteilung, 11.08.2014).
- Kindermann, Helene & Kollmann, René (2015).** *Optimisation of Regional Energy Systema Centred on Wastewater Treatment Plants*. Sustainable Sanitation Practice - EcoSan Club. Vol.: 22. S. 10–14.
- Klinski, Stefan (2006).** *Studie - Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz*. 2. Auflage. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. ISBN: 3-00-018346-9.
- Koch, Markus; Nietlisbach, Alex; Känel, Barbara; Calderoni, Marco; Wille, Barbara; Müller, Roger; Bretsch, Peter; Wanner, Oskar; Siegrist, Hansruedi; Peter, Armin; Müller, Ernst A.; Bobel, Beat & Roth, Yann (2010).** *Heizen und Kühlen mit Abwasser - Leitfaden für die Planung, Bewilligung und Realisierung von Anlagen zur Abwasserenergienutzung*: Baudirektion Kanton Zürich & AWEL - Amt für Abwasser, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich.
- Kollmann, René; Kretschmer, Florian; Neugebauer, Georg; Kindermann, Helene & Truger, Barbara (2015).** *Integration of renewable energy provided by waste water treatment plants into regional energy concepts in Austria*.
- Kragl, Georg** (persönliche Mitteilung, 28.05.2015).
- Kretschmer, Florian** (persönliche Mitteilung, 16.04.2015).
- Kroiss, H. & Svardal, K. (2009).** *Energiebedarf von Abwasserreinigungsanlagen*. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. Springer-Verlag. Nr.: 11. S. 170–177.
- L.B. Bohle.** *Fluidisieren*. URL: <http://www.lbbohle.com/bohle-glossary/123-fluidisieren>. [Stand: 09.06.2015].
- Lehmacher, Peter (2005).** *Funktionsschema einer Motorgetriebenen BHKW-Anlage*. URL:

[http://de.wikipedia.org/wiki/Blockheizkraftwerk#/media/File:Bhkw\\_schema.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Blockheizkraftwerk#/media/File:Bhkw_schema.png).  
[Stand: 10.05.2015].

**Levy, Gian Andri (2009).** *Energieoptimierung auf Kläranlagen*. Gas Wasser Abwasser - GWA.

**Lindtner, Stefan & Haslinger, Julia (2012).** *Stand und Zukunft des Benchmarkings auf österreichischen Kläranlagen*. Wiener Mitteilungen. Institut für Wassergüte / TU-Wien.

**Lindtner, Stefan (2008).** *Leitfaden für die Erstellung eines Energiekonzeptes kommunaler Kläranlagen*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

**Lindtner, Stefan & Vohryzka, Fiona (2015).** *Der Energieverbrauch österreichischer Kläranlagen*. Wiener Mitteilungen. Institut für Wassergüte / TU-Wien.

**Linz AG.** *Heizenergie-Verbrauch im Jahresverlauf*. URL:  
<http://www.linzag.at/portal/portal/linzag/privatkunden/wohnunghaus/gas/erdgas/heizenergieverbrauch;jsessionid=0924955FB0DB233214A5326BAFE7C5B4.node2>.  
[Stand: 07.03.2015].

**Maier, Stephan (2012).** *Regionale Energieoptimierung in St. Margarethen an der Raab mittels Prozess-Netzwerk-Synthese und RegiOpt-Datenbank*. Graz: Institut für Prozess- und Partikeltechnik der Technischen Universität Graz.

**Maier, Stephan** (persönliche Mitteilung, 13.08.2014).

**Maier, Stephan** (persönliche Mitteilung, 25.05.2015).

**Müller, Ernst A.; Graf, Eliane; Moser, Ruedi & Mathys, Oliver (2013).** *Innovative Energieprojekte auf ARA*. Aqua & Gas. Nr.: 7/8.

**Müller, Ernst A.; Graf, Eliane; Schmid, Felix; Kobel, Beat; Roth, Yann; Levy, Gian Andri; Kind, Elija; Moser, Ruedi & Brügger, Reaphael (2008/2010).** *Handbuch - Energie in ARA*. 1994. Auflage. Zürich: Bundesamt für Konjunkturfragen & Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA).

**Neumüller, Otto-Albrecht (2003).** *Duden - Das Wörterbuch chemischer Fachausdrücke: Der Schlüssel zur chemischen Fachsprache - für Schule, Studium und Beruf*. Mannheim, Leipzig, Wien, Berlin: Dudenverlag. ISBN: 3-411-04171-4.

**Ochser, Karl; Adelberger, Gottfried; Ertl, Thomas; Kretschmer, Florian; Müller, Ernst A.; Penthor, Adolf & Zach, Franz (2013).** *Energie aus Abwasser - Abwasser-Wärme- und -Kältenutzung mittels hocheffizienter Großwärmepumpen*. Klima- und Energiefond - Blue Global Report.

- Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touringclub - ÖAMTC (2015).**  
*Treibstoffkosten Abfrage.* URL:  
<http://www.oeamtc.at/portal/tanken+2500++1004854+11027>. [Stand: 31.01.2015].
- Österreichisches Normungsinstitut (2007).** *Abwasserbahndlung - Wörterbuch: ÖNORM EN 1085.* Wien.
- Pichler, Gerald** (persönliche Mitteilung, 09.05.2014).
- Pöppinghaus, K.; Schneider, W. & Fresenius, W. (1994).** *Abwassertechnologie - Entstehung, Ableitung, Behandlung, Analytik der Abwässer.* 2. Auflage. Berlin: Springer. ISBN: 3-540-58000-X.
- Reppich, Marcus; Datzmann, Sarah; Li, Xiao; Rosenbauer, Susanne; Schlecht, Christoph & Tschepur, Stefan (2009).** *Vergleich verschiedener Aufbereitungsverfahren von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz.* Chemie Ingenieur Technik. Vol.: 81. Nr.: 3. S. 211–223.
- Resch, Helmut & Schatz, Regine (2010).** *Abwassertechnik verstehen - Ein kleines 1 x 1 der Abwassertechnik für Einsteiger und interessierte Laien.* 1. Auflage. München: F. Hirthammer Verlag. ISBN: 978-3-88721-204-9.
- Rubli, Stefan; Juraske, Ronnie & Hellweg, Stefanie (2015).** *Ökologische Systemanalyse - Materialflussanalyse - Risikoanalyse - Ökobilanz: Vorlesungsskript.* Zürich: ETH Zürich.
- Schellenberg, Gerhard** (persönliche Mitteilung, 13.11.2014).
- Schröder, Friedrich & Zitzelsberger, Walter (2005).** *Das neue Wasserrecht für die betriebliche Praxis - Recht und Technik der Abwasserbeseitigung, der Wasserversorgung, der Lagerung und des Transports wassergefährdender Stoffe; mit dem neuen Abwasserabgabengesetz, den neuen Mindestanforderungen für Abwassereinleitungen und sämtlichen praxisrelevanten Vorschriften.* Augsburg: WEKA-Verlag. ISBN: 3-8111-7010-4.
- Schurig, Hendrik & Schäfer, Arnold (2010).** *Möglichkeiten der Faulgasaufbereitung zu Biomethan.* energie; wasser-praxis. Nr.: 5. S. 51–57.
- Stöglehner, Gernot** (persönliche Mitteilung, 18.05.2015).
- Süle, Zoltán; Bertók, Bontond; Friedler, Ferenc & Fan, L.T. (2011).** *Optimal Design of Supply Chains by p-graph Framework under Uncertainties.* Chemical Engineering Transactions - AIDIC. Vol.: 25. S. 453–458.
- Überreiter, Ernst; Lenz, Katharina & Zieritz, Irene (2012).** *Kommunale Abwasserrichtlinie der EU - 91/271/EWG Österreichischer Bericht.* Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

- 
- Varga, Virag; Heckl, Istvan; Friedler, Ferenc & Fan, L.T. (2010).** *PNS Solutions: a P-Graaph Based Programing Framework for Process Network Synthesis*. Chemical Engineering Transactions - AIDIC. Vol.: 21. S. 1387–1392.
- Wess, O. (2004).** *Physikalische Grundlagen der extrakorporalen Stoßwellentherapie*. Journal für Mineralstoffwechsel. Nr.: 11 (4). S. 7–18.
- Zach, Franz** (persönliche Mitteilung, 07.01.2015).
- Zach, Franz; Kretschmer, Florian; Ertl, Thomas; Müller, Ernst A.; Adelberger, Gottfried & Kolla, Lukas (2012).** *Energie aus Abwasser - Abwasserwärme- und -kältenutzung mittels hocheffizienter Großwärmepumpen*.
- Zell, Harmen (2014).** *Geldsparen bei der Klärschlamm Entsorgung mit dem elektrischen Schwein*. Berlin. URL: <http://abfallwirtschaft-blog.de/?p=2669>. [Stand: 05.05.2015].

# Anhang

## Anhang 1: Poster des Abwasserenergieworkshops


www.abwasserenergie.at



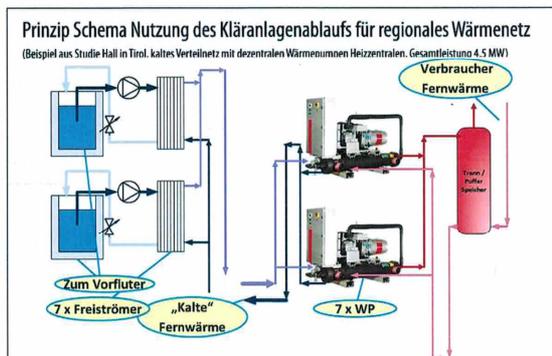
### Heizen und Kühlen mit Abwasserwärmepumpen

Mit **Abwasserenergie heizen UND kühlen** klingt komplizierter als es ist. Im Abwasser steckt die Wärmeenergie von Badewasser, kochen, spülen und auch von Produktionsprozessen. Diese lässt sich über spezielle Wärmetauscher und Wärmepumpen wieder zurück holen und **erneut für die verschiedensten Anwendungen nutzen**. Einige Grundsätze sind zwar zu beachten, aber sowohl die **Abwasserwärmetauscher** als auch die Wärmepumpen sind mittlerweile für diesen Einsatz bestens geeignet. Wärmetauschersysteme, sowohl für **Kanal-einbau**, als auch **externe Wärmetauscher mit automatischer Reinigung**, sind ausgereift.

Die **Stadtwerke Amstetten heizen und kühlen** mit ihrer 230 kW Anlage ihr gesamtes Betriebsobjekt. Nur rund **1/5 der benötigten Heizleistung** ist für den **Antrieb der Wärmepumpe** erforderlich. Die **CO<sub>2</sub>-Ersparnis** gegenüber Gas beträgt ca. **72 % bzw. 54 Tonnen/Jahr**.



### Die Kläranlage als regionale Energiezelle zur Versorgung von Industrie, Gewerbe und Haushalten



Die im gereinigten Abwasser enthaltene Energie ist mittels Wärmetauscher und Wärmepumpe relativ leicht rückzugewinnen. Die Wärmetauscher (z. B. Freistrom-Plattenwärmetauscher) sind einfacher aufgebaut und seit vielen Jahrzehnten eingesetzt.

Würde man das **Abwasser der Kläranlage Freistadt** nur um **4 °C** abkühlen, würde eine entsprechende Wärmepumpenanlage **Heizenergie von 770 kW** erzielen (mit COP 4 gerechnet). Bei 2.000 Vollbetriebsstunden sind das **1.540 MWh/a**.

Damit könnte ein **Nahwärmenetz versorgt** werden, welches den Wärmebedarf einiger in der Nähe situierter Betriebe, Wohnanlagen oder des Krankenhauses abdeckt. Ebenso könnte die **Beheizung des Faulturms** übernommen werden, der ganzjährig in Betrieb ist und 600 MWh/a Gas verbraucht. Das **eingesparte Faulgas** könnte dann **gereinigt** und **in das Gasnetz eingespeist** werden.

### Anfallende Abwärme aufbereiten und effizient nutzen

Je niedriger die erforderliche Nutztemperatur ist, umso effizienter ist der Wärmepumpeneinsatz zur Nutzung der Abwasserenergie. Daher sollten vor allen Dingen **jene Verbraucher, die mit niedrigen Temperaturen auskommen, mit Abwasserenergie versorgt werden (z. B. Beheizung des Faulturms)**.

Andererseits sollte hochwertige Energie, wie z. B. Gas nicht nur in Niedertemperaturwärme umgewandelt werden. Alternativ kann das **produzierte Faulgas** in KWK-Anlagen verwendet oder aufbereitet und in das **Gasnetz eingespeist** oder für eine regionale und/oder kommunale **Erdgas-Fahrzeugflotte** bereitgestellt werden.

Auch könnten eventuell anfallende Produktionsabwässer mit mittleren Temperaturen **vor Ort wieder auf Hochtemperatur umgewandelt werden**, anstatt diese relativ warm in das Kanalnetz einzuleiten.

Energie Quellen Kläranlage und mögliche Energie Nutzer		
Energie Quellen	Abwasser Wärmetauscher plus (HT) Wärmepumpe	Energie Verbraucher
gereinigtes Abwasser (vor Vorfluter) 8 °C bis 15 °C		Faulschlamm Erwärmung Heizung Warmwasser Fernwärmenetz Klärschlamm Trocknung 40 °C bis 65 °C
Abwärme Druckluft Belebungsbecken 35 °C bis 50 °C		Heißwasser 80 °C bis 98 °C
Kühlwasser BHKW / Mikroturbine 40 °C bis 50 °C		Prozesswasser 70 bis 98 °C
Abwässer Produktion z.B. Brauerei Freistadt (vor Ort Nutzung) 35 °C bis 50 °C		

Verfasser:  
Gottfried Adelberger (OCHSNER Wärmepumpen GmbH.)

Impressum:  
Das Forschungsprojekt „Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energieversorgungs-konzepte“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „emission+“ durchgeführt. Das Projekt hat die Untersuchung von Möglichkeiten zur Nutzung von Energie aus Abwasser zum Ziel und wird von folgenden Institutionen und Unternehmen durchgeführt:

- o Österreichische Energieagentur (Konsortialführung)
- o Universität für Bodenkultur Wien
- o Technische Universität Graz
- o Austrian Institute of Technology GmbH
- o Institut Energie in Infrastrukturanlagen
- o Ochsner Wärmepumpen GmbH



Abbildung 33: Präsentationsposter zum Thema Heizen und Kühlen mit Abwasserwärmepumpen

## Solarenergie

Zur Nutzung von Solarenergie stehen gleich zwei Technologien zur Verfügung: **Photovoltaik und Solarthermie**.

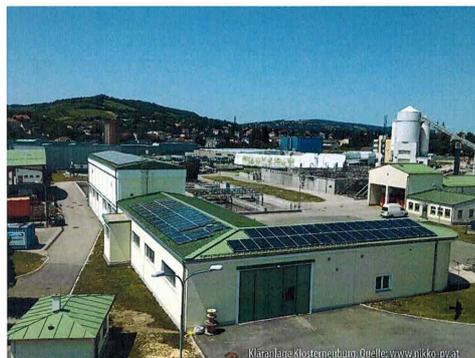
Während mit Photovoltaik Strom erzeugt wird, wird mit Solarthermie Wärme gewonnen.

Für Kläranlagen sind beide Technologien äußerst interessant:

Photovoltaik kann zur **Eigenstromerzeugung** verwendet und Überschussstrom ins allgemeine Stromnetz eingespeist werden. Dies stellt einen wichtigen Schritt in Richtung **Energieautonomie** dar.

Solarthermie ist auf einer Kläranlage vor allem für die solare **Klärschlamm-trocknung** von Belang. Dies spart Entsorgungskosten und liefert einen wertvollen Brennstoff.

Solarenergie verringert in jedem Fall die laufenden Kosten, jedoch sind Anfangsinvestitionen zu tätigen, die z. B. mit **Contracting-Modellen** finanziert werden können.



### Photovoltaik (PV)



Ein erheblicher Kostenfaktor auf einer Kläranlage ist der hohe **Strombedarf**. Daher bietet sich die Installation einer PV-Anlage geradezu an. Der **Eigenbedarf** wird (zum Teil) abgedeckt, Überschüsse gehen ins allgemeine Stromnetz.

Bei **Netzeinspeisung** erhält ein Anlagenbetreiber (gemäß Ökostrom-Einspeisetarifverordnung) derzeit 12,5 ct./kWh für Dachanlagen, für andere Anlagen 10 ct./kWh, jeweils befristet auf 13 Jahre. Weiters gibt es auch Investitionsförderungen. Ab 2015 werden jedoch nur noch Dachanlagen gefördert.

Damit die PV-Anlage optimal genutzt wird, sollte die Dachfläche nach Süden ausgerichtet sein und die Dachneigung etwa 40° betragen.

Für die PV-Förderung ist die Ökostromabwicklungsstelle (ÖMAG) zuständig. Einen guten Überblick erhält man auch auf [www.pvaustria.at](http://www.pvaustria.at).

### Solare Klärschlamm-trocknung

Je weniger Wasser im Klärschlamm enthalten ist, umso geringer werden Masse und Volumen und der Heizwert steigt. Damit sinken die **Entsorgungskosten** und der Schlamm kann besser energetisch genutzt werden.

Bei der solaren Trocknung wird der Klärschlamm in einer Art Gewächshaus ausgebreitet und regelmäßig gewendet. Lüftungssysteme führen das verdunstete Wasser ab. Im Sommer kann damit 90% TS mit einem Heizwert von bis zu 3 kWh/kg erreicht werden.

Die **solare Klärschlamm-trocknung** ist bereits erprobt. Die Methode zeichnet sich durch niedrige laufende Kosten aus. Jedoch sind **Anfangsinvestitionen** und der hohe **Flächenbedarf** zu berücksichtigen.

Die anschließende **thermische Verwertung** kann z. B. in einem Zementwerk, einer speziellen Klärschlammverbrennungsanlage oder einem Kohlekraftwerk erfolgen.



Verfasser:

DI Franz Zach (Österreichische Energieagentur)

Impressum:

Das Forschungsprojekt „Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energieversorgungs-konzepte“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „emissio++“ durchgeführt. Das Projekt hat die Untersuchung von Möglichkeiten zur Nutzung von Energie aus Abwasser zum Ziel und wird von folgenden Institutionen und Unternehmen durchgeführt:

▫ Österreichische Energieagentur (Konsortialführung) ▫ Universität für Bodenkultur Wien ▫ Technische Universität Graz ▫ Austrian Institute of Technology GmbH ▫ Institut Energie in Infrastrukturanlagen ▫ Ochsner Wärmepumpen GmbH



Abbildung 34: Präsentationsposter zum Thema Solarenergie

## Möglichkeiten der Klärschlammverwertung

Gemäß der Richtlinie des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (91/271/EWG) ist Klärschlamm aus der Abwasserbehandlung nach Möglichkeit wieder zu verwenden. Dabei sind die Belastungen der Umwelt auf ein Minimum zu begrenzen.

Aufgrund des Ausbaues und der Erweiterung der Kläranlagen ist in Österreich das **Klärschlamm** in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen. 2010 fielen rund 269.000 t Trockensubstanz (TS) Klärschlamm in kommunalen Kläranlagen größer 50 EW<sub>60</sub> an. Davon stammen etwa 263.000 t TS bzw. 98 % aus Kläranlagen mit einer Ausbaupazität von mindestens 2.000 EW<sub>60</sub>. Die Klärschlammverwertungs- bzw. -entsorgungspfade für das Jahr 2010 sind in Abbildung 1 zusammengefasst. (BMLFUW, 2010).

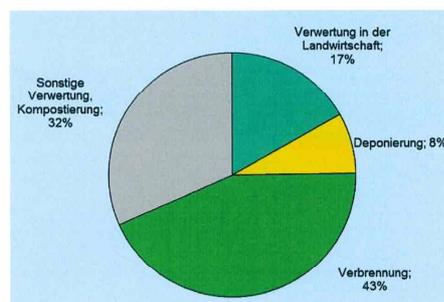


Abbildung 1: Verteilung der Klärschlammverwertung und -entsorgung im Jahr 2010 (BMLFUW, 2010)

### Deponierung

Die aktuelle Deponieverordnung (2008) sieht abgesehen von ein paar Ausnahmen ein Verbot der Deponierung von Abfällen vor, deren Anteil an organischem Kohlenstoff (TOC) im Feststoff fünf Masseprozent übersteigt. Da bei Klärschlamm dieser Wert in der Regel überschritten wird, ist für die Deponierung eine entsprechende **Vorbehandlung des Klärschlammes** notwendig. Aus diesem Grund ist die Menge des deponierten Klärschlammes rückläufig, alternative Entsorgungs- bzw. Verwertungspfade werden zunehmend relevanter.

### Landwirtschaftliche Verwertung

Da im (kommunalen) Klärschlamm eine Vielzahl an Nähr- und sonstigen Wertstoffen enthalten ist, stellt die Aufbringung auf landwirtschaftliche Flächen prinzipiell eine sehr regionale und Ressourcen schonende Verwertungsmöglichkeit dar. Dabei müssen aber auch immer die **Eignung des Bodens** und die sonstigen im Klärschlamm enthaltenen Substanzen (Schwermetalle, Mikro Schadstoffe, etc.) berücksichtigt werden. Vor allem aufgrund von Letzteren ist in den letzten Jahren auch ein Trend hin zu **Aufbringungsverboten** zu erkennen.

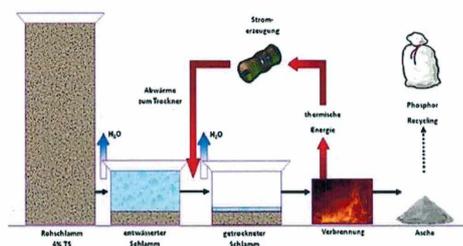


Abbildung 2: SludgeEnergy Verfahren (Fa. Huber SE, 2014)

### Verbrennung

Bei der Verbrennung muss einerseits zwischen **Mitverbrennung** und andererseits **Monoverbrennung** unterschieden werden. Bei ersterer wird Klärschlamm primär in Müllverbrennungsanlagen, in Kohlekraftwerken oder in Zementwerken (als Ersatzbrennstoff) mitverbrannt. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Standorten in Österreich kann dieser Verwertungspfad eine regional sinnvolle Möglichkeit darstellen.

Bei der Monoverbrennung können aus der Asche Rohstoffe, die bei der Mitverbrennung verloren gehen, zurück gewonnen werden. Allerdings ist ein wirtschaftlicher Betrieb in der Regel nur bei großem Klärschlamm- aufkommen möglich.

### Sonstige Verwertungsmöglichkeiten

Als weitere Klärschlammverwertungs- bzw. -verwertungspfade können die **Kompostierung**, die **Biokohlerzeugung** mittels hydrothermaler Karbonisierung sowie die **Klärschlammvergasung** genannt werden. Bei ersterer wird durch biologische Prozesse organische Substanz in ein huminstoffreiches Produkt umgewandelt, das z. B. als Nährstofflieferant bzw. zur Bodenverbesserung eingesetzt werden kann. Bei zweiterer wird aus dem Klärschlamm bei Temperaturen im Bereich von 180 bis 250 °C und Drücken zwischen 10 und 40 bar Biokohle erzeugt, die wie Braunkohle verbrannt werden kann. Bei der Klärschlammvergasung entsteht monodeponierbare (phosphorhaltige) Schlacke bzw. Asche sowie darüber hinaus „Synthesegas“, welches nach einer entsprechenden Aufbereitung in Blockheizkraftwerken verwertet werden kann.

Verfasser:  
Florian Kretschmer, Thomas Ertl (BOKU-SIG)

Impressum:  
Das Forschungsprojekt „Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energieversorgungs-konzepte“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „emissioN+“ durchgeführt. Das Projekt hat die Untersuchung von Möglichkeiten zur Nutzung von Energie aus Abwasser zum Ziel und wird von folgenden Institutionen und Unternehmen durchgeführt:

□ Österreichische Energieagentur (Konsortiaführung) □ Universität für Bodenkultur Wien □ Technische Universität Graz □ Austrian Institute of Technology GmbH □ Institut Energie in Infrastrukturanlagen □ Ochsner Wärmepumpen GmbH



### Abbildung 35: Präsentationsposter über die Möglichkeiten der Klärschlammverwertung

## Nutzungspotenziale von Klärgas

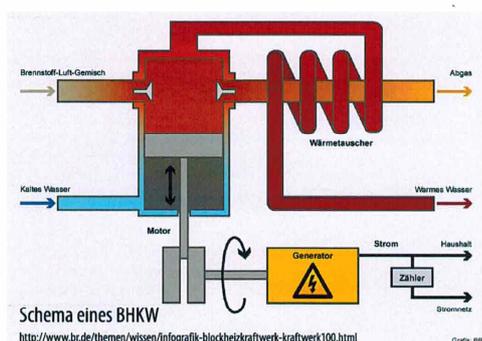
Die Klärschlammstabilisierung mittels Faulung bringt drei Vorteile mit sich: Die anschließende Entwässerung des Klärschlammes wird vereinfacht, eine Kofermentation von Biomüll ist möglich und durch die damit verbundene Produktion von **Klärgas** wird eine **Energiequelle** erschlossen. Diese lässt sich in folgenden zwei Bereichen nutzen: **Verbrennung** von Klärgas zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie Verwendung von Klärgas als **Erdgasersatz**.

Die so gewonnene Energie wird in erster Linie zur Deckung des **Eigenenergiebedarfs der Kläranlage** verwendet. Überschüssige Produkte können in die **öffentlichen Netze eingespeist** werden, oder örtlichen AbnehmerInnen (insbesondere als Wärme und Klärgas) zur Verfügung gestellt werden. Die in Österreich üblichen Einspeisetarife und Produktionskosten sowie der sich davon ableitende Gewinn können der nachstehenden Tabelle entnommen werden:



	Einspeisetarife	Produktionskosten	Gewinn
<b>Wärme</b>	4 Cent/kWh	0,95 Cent/kWh mit BHKW 0,14 Cent/kWh mit Gasbrenner	3,05 Cent/kWh mit BHKW 3,86 Cent/kWh mit Gasbrenner
<b>Gas</b>	4,5 Cent/kWh	2,8 Cent/kWh	1,7 Cent/kWh
<b>Strom</b>	6 Cent/kWh	1,8 Cent/kWh mit BHKW	4,2 Cent/kWh

### Verbrennung von Klärgas zur Strom- und Wärmeerzeugung



#### Kraft-Wärme-Kopplung

Das bei der Faulung gewonnene Klärgas kann direkt auf der Kläranlage in Energie umgewandelt werden. Dabei kommen vor allem **Blockheizkraftwerke (BHKW)** zum Einsatz. Der Antrieb des Generators erfolgt dabei meist durch einen Verbrennungsmotor, aber auch andere Technologien wie z.B. **(Mikro-)Gasturbinen** sind möglich. In einem BHKW wird sowohl **Strom als auch Wärme** erzeugt. Durch die zusätzliche Nutzung der Abwärme (vor allem für lokale Kunden) können besonders hohe Wirkungsgrade von bis zu 90% erzielt werden.

#### Gasbrenner

In einem Gasbrenner kann Klärgas unter Luftzufuhr verbrannt werden. Die dabei entstehende **Wärme** wird auf ein Medium (meist Wasser) übertragen, und kann somit zur Heizung von Gebäuden (bzw. zur Versorgung lokaler KundenInnen) verwendet werden. Der Einsatz von Gasbrennern ist eine relativ billige Methode der Wärmeerzeugung.

### Verwendung von Klärgas als Erdgasersatz

Durchschnittlich setzt sich Klärgas nach der Faulung aus 60 % Methan ( $\text{CH}_4$ ), 30 % Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), 8 % Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) sowie 2 % Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und Begleitstoffen zusammen.

Um Klärgas als Erdgasersatz nutzen zu können, muss es zu Beginn **entwässert und gereinigt** werden. Danach kann es ins Gasnetz eingespeist oder zum Fahrzeugantrieb verwendet werden. Bei der Reinigung ist vor allem die Abtrennung des Schwefelwasserstoffs wichtig, da dieser toxische und korrosive Eigenschaften hat und bei einer Verbrennung die umwelt-schädlichen Schwefeloxide entstehen. Anschließend muss das Gas einer **Methan-anreicherung** unterzogen werden, um erdgasähnliche Eigenschaften (>96 % Methangehalt) zu erreichen. Dabei wird das Kohlenstoffdioxid aus dem Klärgas abgetrennt.



Verfasser:

René Kollmann, Barbara Truger, Helene Kindermann (TU Graz)

Impressum:

Das Forschungsprojekt „Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energieversorgungskonzepte“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „emission+“ durchgeführt. Das Projekt hat die Untersuchung von Möglichkeiten zur Nutzung von Energie aus Abwasser zum Ziel und wird von folgenden Institutionen und Unternehmen durchgeführt:

◻ Österreichische Energieagentur (Konsortialführung) ◻ Universität für Bodenkultur Wien ◻ Technische Universität Graz ◻ Austrian Institute of Technology GmbH ◻ Institut Energie in Infrastrukturanlagen ◻ Ochsner Wärmepumpen GmbH

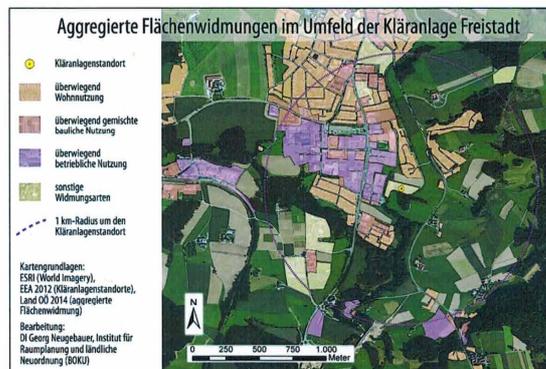


Abbildung 36: Präsentationsposter über die Nutzungspotentiale von Klärgas

# Wärme-/Kältenutzung außerhalb der Kläranlage

Der **Energieinhalt** in Abwässern aus Haushalten, Gewerbe und Industrie ist beträchtlich. Im Winter kann aus dem Abwasser Wärme zum Heizen gewonnen werden, aber es kann damit auch gekühlt werden. Die Abwassertemperatur liegt im Winter meist über 10°C, weshalb **Wärmepumpen** mit der Energiequelle Abwasser besonders effizient arbeiten können. Darüber hinaus kann bei der Kläranlage **Biogas** erzeugt werden, das direkt auf der Kläranlage zur Stromerzeugung, bei der als „Nebenprodukt“ Abwärme entsteht, genutzt werden kann, oder eventuell auch in ein Gasnetz eingespeist werden kann.

Den limitierenden Faktor für die Nutzung der Abwasserenergie stellt weniger das Wärmeangebot am Kläranlagenstandort als der Mangel an möglichen **AbnehmerInnen im Umfeld** dar. In Abhängigkeit vom Standort und von vorhandenen oder zukünftigen möglichen AbnehmerInnen mit Wärme- bzw. Kühlbedarf bestehen Nutzungsmöglichkeiten in zwei Bereichen: in der **Land- und Forstwirtschaft** sowie im **Siedlungsraum**.



## Wärme-/Kältenutzungsmöglichkeiten in der Land- und Forstwirtschaft



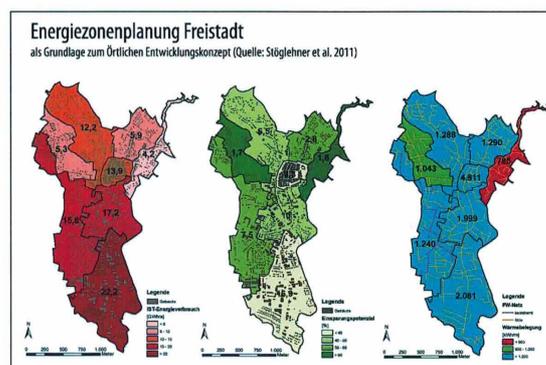
In der Land- und Forstwirtschaft kann die Energie aus Abwasser zur **Trocknung** verschiedener Güter sowie zu **Heiz- und Kühlzwecken** eingesetzt werden (vgl. Gaderer et al. 2007, Loibl et al. 2008, Schulz et al. 2007):

- o Trocknung verschiedener **land- und forstwirtschaftlicher Produkte** wie
  - Holzhackschnitzel (ganzjährig)
  - Getreide (Juli bis August)
  - Heil- und Gewürzpflanzen (Juni bis Oktober)
- o Beheizung und Kühlung von **Ställen**
  - Ferkelaufzucht (ganzjährig, im Sommer geringere Beheizung)
  - Geflügelaufzucht
- o Beheizung von **Gewächshäusern** (Oktober bis März)
  - Obst-, Gemüse- und Zierpflanzenproduktion
- o Betrieb von **Aquakulturen** und Kreislaufanlagen (ganzjährig)

## Wärme-/Kältenutzungsmöglichkeiten im Siedlungsraum

Im Siedlungsraum kann die Energie aus Abwasser zur **Wärme- bzw. Kälteversorgung** von Gebäuden eingesetzt werden. Einerseits besteht die Möglichkeit, die am Kläranlagenstandort anfallende Abwärme in ein **Nahwärme-/Kältenetz** einzuspeisen. Andererseits kann das am Standort der Kläranlage erzeugte Biogas in ein **Gasnetz** eingespeist werden, die Wärmeerzeugung oder Nutzung für Mobilitätszwecke erfolgt dann am Standort der AbnehmerInnen.

- o **Nahwärme-/Kältenetz** zur
  - Beheizung von Wohngebäuden
  - Beheizung von öffentlichen Einrichtungen (z.B. Schule, Kindergarten, Schwimmbad, Krankenhaus etc.)
  - Beheizung / Kühlung von Gewerbe- und Industriebetrieben (z.B. Objekte mit Heizwärme- und Klimakältebedarf, Molke- reien mit Prozesskältebedarf, Lagerung von Tiefkühlware etc.)
- o Einspeisung in ein **Gasnetz** und Wärmeerzeugung am Standort der AbnehmerInnen



Verfasser:  
Georg Neugebauer, Milena Borsdorff, Gernot Stöglehner (BOKU-IRUB)

Impressum:  
Das Forschungsprojekt „Einbindung der abwassertechnischen Infrastruktur in regionale Energieversorgungs-konzepte“ wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „emission+“ durchgeführt. Das Projekt hat die Untersuchung von Möglichkeiten zur Nutzung von Energie aus Abwasser zum Ziel und wird von folgenden Institutionen und Unternehmen durchgeführt:

o Österreichische Energieagentur (Konsortialführung) o Universität für Bodenkultur Wien o Technische Universität Graz o Austrian Institute of Technology GmbH o Institut Energie in Infrastrukturanlagen o Ochsner Wärmepumpen GmbH



Abbildung 37: Präsentationsposter zum Thema Wärme-/Kältenutzung außerhalb der Kläranlage

## Anhang 2: Kapazitätsklassen der Technologien

Tabelle 11: In der Optimierungsberechnung berücksichtigte Kapazitätsklassen der Technologien

Technologie	Kapazität
Faulturm	500m <sup>3</sup>
	1.000m <sup>3</sup>
	2.000m <sup>3</sup>
Entwässerung	20.000t/a
	40.000t/a
	60.000t/a
Maschinelle Überschussschlamm Entwässerung	300.000t/a
	600.000t/a
Gasspeicher	100m <sup>3</sup>
Gasbrenner	70kW
	150kW
	300kW
Mikrogasturbine	30kW
	65kW
	200kW
BHKW	80kW
	160kW
	300kW
Biogasaufbereitung	25m <sup>3</sup> /h
	50m <sup>3</sup> /h
	100m <sup>3</sup> /h
	250m <sup>3</sup> /h
Gaseinspeisestation	25m <sup>3</sup> /h
	50m <sup>3</sup> /h
	100m <sup>3</sup> /h
	250m <sup>3</sup> /h
Wärmetauscher	250kW
	350kW
	500kW
Wärmepumpe	110kW
	210kW
	460kW
	660kW
Abwasserenergiebox	110kW
	170kW
	210kW
Druckluftabwärmerückgewinnung	80kW
Klärschlamm-trocknung mittels Wärmepumpe	1332t/a
	3330t/a
	6660t/a
Solare Klärschlamm-trocknung	1460t/a
	5480t/a

---

Monoklärschlammverbrennung	2MW 4MW 8MW
PV	25kW 50kW
Solarthermie	100kW 300kW

## Anhang 3: Berechnungsergebnisse im Detail

Tabelle 12: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse des Basisszenarios

<b>Basisszenario</b>			
<b>Rohmaterialien</b>	<b>Energie-/Stoffströme</b>		
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Netz-Elektrizität	279MWh/a		
<b>Technologien</b>	<b>Auslegungsparameter</b>		
	Status*	Kapazitätsgröße	Dimensionierungsfaktor
Abwasserreinigung	ex.	-	1
Faulturm	ex.	1.000m <sup>3</sup>	1
Maschinelle Überschussschlamm-entwässerung	ex.	300.000t/a	0,2
Entwässerung	ex.	20.000t/a	0,6
Gastank	ex.	100m <sup>3</sup>	1
Blockheizkraftwerk	-	80kW	0,6
Druckluftabwärmerückgewinnung	-	80kW	0,5
Photovoltaik	ex.	50kW	1
<b>Produkte</b>	<b>Energie-/Stoffströme</b>		
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Klärschlamm, entwässert	1.252t/a		
<b>Gesamtkosten pro Jahr</b>	<b>458.751€/a</b>		

\* Existierende Technologien auf der Kläranlage Freistadt sind mit ex. gekennzeichnet.

Tabelle 13: Detailedarstellung der Berechnungsergebnisse zur Versorgung des kurzfristigen Bedarfs

<b>Optimalstruktur für kurzfristigen Bedarf</b>			
<b>Rohmaterialien</b>	<b>Energie-/Stoffströme</b>		
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Netz-Elektrizität	602MWh/a		
<b>Technologien</b>	<b>Auslegungsparameter</b>		
	Status*	Kapazitätsgröße	Dimensionierungsfaktor
Abwasserreinigung	ex.	-	1
Faulturm	ex.	1.000m <sup>3</sup>	1
Maschinelle Überschussschlamm-entwässerung	ex.	300.000t/a	0,2
Entwässerung	ex.	20.000t/a	0,6
Gastank	ex.	100m <sup>3</sup>	1
Blockheizkraftwerk	-	80kW	0,6
Wärmetauscher	-	350kW	1
Wärmepumpe	-	460kW	0,6
Photovoltaik	ex.	50kW	1
<b>Produkte</b>	<b>Energie-/Stoffströme</b>		
	Winter	Übergangsperiode	Sommer
Niedertemperaturwärme	624MWh/a	296MWh/a	-
Kühlenergie	-	-	49MWh/a
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Klärschlamm, entwässert	1.252t/a		
<b>Gesamtkosten pro Jahr</b>	<b>458.371€/a</b>		

\* Existierende Technologien auf der Kläranlage Freistadt sind mit ex. gekennzeichnet.

Tabelle 14: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse zur Versorgung des kurzfristigen Bedarfs

<b>Optimalstruktur für kurz- und mittelfristigen Bedarf</b>			
<b>Rohmaterialien</b>	<b>Energie-/Stoffströme</b>		
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Netz-Elektrizität	1.886MWh/a		
<b>Technologien</b>	<b>Auslegungsparameter</b>		
	Status*	Kapazitätsgröße	Dimensionierungsfaktor
Abwasserreinigung	ex.	-	1
Faulturm	ex.	1.000m <sup>3</sup>	1
Maschinelle Überschussschlamm- entwässerung	ex.	300.000t/a	0,2
Entwässerung	ex.	20.000t/a	0,6
Gastank	ex.	100m <sup>3</sup>	1
Blockheizkraftwerk	-	80kW	0,6
Druckluftabwärmerückgewinnung	-	80kW	0,5
Wärmetauscher	-	350kW	1
Wärmepumpe, extern (A)	-	460kW	0,5
Wärmepumpe, extern (A)	-	660kW	0,7
Wärmepumpe, extern (C)	-	460kW	0,5
Wärmepumpe, extern (E)	-	460kW	0,5
Photovoltaik	ex.	50kW	1
<b>Produkte</b>	<b>Energie-/Stoffströme</b>		
	Winter	Übergangsperiode	Sommer
Niedertemperaturwärme	2.916MWh/a	1.384MWh/a	-
Kühlenergie	-	-	612MWh/a
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Klärschlamm, entwässert	1.252t/a		
<b>Gesamtkosten pro Jahr</b>	<b>444.856€/a</b>		

\* Existierende Technologien auf der Kläranlage Freistadt sind mit ex. gekennzeichnet.

**Tabelle 15: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse zur Versorgung des kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfs**

<b>Optimalstruktur für kurz-, mittel- und langfristigen Bedarf</b>			
<b>Rohmaterialien</b>	Energie-/Stoffströme		
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Netz-Elektrizität	2.515MWh/a		
<b>Technologien</b>	Auslegungsparameter		
	Status*	Kapazitätsgröße	Dimensionierungsfaktor
Abwasserreinigung	ex.	-	1
Faulturm	ex.	1.000m <sup>3</sup>	1
Maschinelle Überschussschlamm- entwässerung	ex.	300.000t/a	0,2
Entwässerung	ex.	20.000t/a	0,6
Gastank	ex.	100m <sup>3</sup>	1
Blockheizkraftwerk	-	80kW	0,6
Druckluftabwärmerückgewinnung	-	80kW	0,5
Wärmetauscher	-	500kW	1,9
Wärmepumpe, extern (A)	-	460kW	1
Wärmepumpe, extern (B)	-	460kW	0,7
Wärmepumpe, extern (C)	-	460kW	0,5
Wärmepumpe, extern (D)	-	460kW	0,9
Photovoltaik	ex.	50kW	1
<b>Produkte</b>	Energie-/Stoffströme		
	Winter	Übergangsperiode	Sommer
Niedertemperaturwärme	3.707MWh/a	2.171MWh/a	-
Kühlenergie	-	-	945MWh/a
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Klärschlamm, entwässert	1.252t/a		
<b>Gesamtkosten pro Jahr</b>	454.929€/a		

\* Existierende Technologien auf der Kläranlage Freistadt sind mit ex. gekennzeichnet.

Tabelle 16: Detaildarstellung der Berechnungsergebnisse zur Versorgung der Klärgaseinspeisung

<b>Optimalstruktur der Klärgaseinspeisung</b>			
<b>Rohmaterialien</b>	<b>Energie-/Stoffströme</b>		
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Netz-Elektrizität	741MWh/a		
Unstabilisierter Klärschlamm	1.002t/a		
<b>Technologien</b>	<b>Auslegungsparameter</b>		
	Status*	Kapazitätsgröße	Dimensionierungsfaktor
Abwasserreinigung	ex.	-	1
Faulturm	ex.	1.000m <sup>3</sup>	1
Maschinelle Überschussschlamm entwässerung	ex.	300.000t/a	0,2
Entwässerung	ex.	20.000t/a	0,7
Gastank	ex.	100m <sup>3</sup>	1
Klärgasreinigung	-	25m <sup>3</sup>	0,5
Einspeisestation	-	100m <sup>3</sup>	0,3
Solarthermie	-	300kW	0,8
Photovoltaik	ex.	50kW	1
<b>Produkte</b>	<b>Energie-/Stoffströme</b>		
	Winter	Übergangsperiode	Sommer
Klärgas, eingespeist	120.000m <sup>3</sup> /a		
Abwasser	1.674.360m <sup>3</sup> /a		
Klärschlamm, entwässert	1.252t/a		
<b>Gesamtkosten pro Jahr</b>	<b>458.218€/a</b>		

\* Existierende Technologien auf der Kläranlage Freistadt sind mit ex. gekennzeichnet.