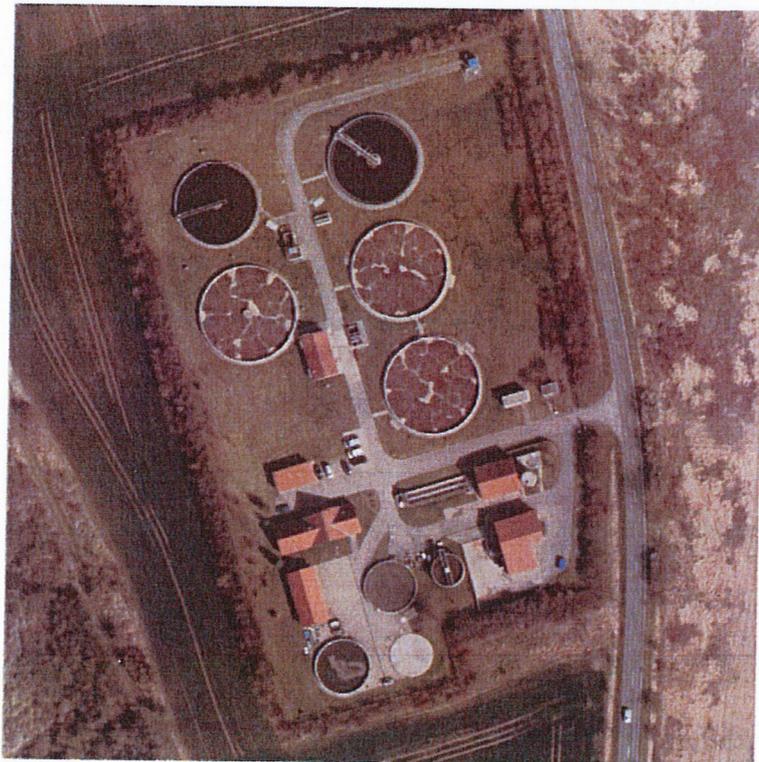




Erstellung einer Potenzialstudie auf der Kläranlage Pfützthal



Auftraggeber: Wasser- und Abwasserzweckverband Saalkreis
Sennewitzer Straße 7
OT Gutenberg
06193 Petersberg

Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung _____	5
2	Grundkonzept _____	6
2.1	Instrumente zur Energieoptimierung _____	7
2.1.1	Energiecheck _____	7
2.1.2	Energieanalyse _____	8
3	Bestandssituation und Basisdaten (Modul 0) _____	11
3.1	Darstellung des Reinigungsverfahrens _____	11
3.1.1	Mechanischer Teil _____	11
3.1.2	Biologischer Teil _____	13
3.1.3	Maschinelle Schlammwässerung _____	15
3.1.4	Sonstige Anlagen _____	15
3.2	Produzierte Faulgasmenge und Nutzung _____	15
3.3	Art der Schlammentsorgung _____	15
3.4	Grad der Automatisierung der Anlagen _____	15
3.5	Sanierungsbedarf von Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik _____	16
3.6	Lokale Rahmenbedingungen _____	16
3.7	Darstellung aller Energieerzeugungsanlagen _____	16
3.8	Sensor-/Messtechnik und Kontrolle der Abwasserqualität _____	16
3.9	Personalsituation _____	17
3.9.1	Weiterbildungsbedarf _____	17
3.9.2	Darstellung der Qualität der Betriebsführung der Anlage _____	17
3.9.3	Teilnahme an Benchmarks der Verbände _____	17
3.9.4	Relevanz und Know-How zum Energieverbrauch _____	17
3.10	Beabsichtigte Planungen _____	18
4	Energetische und klimaschutzbezogene Bestandsaufnahme _____	19

4.1	Aufnahme aller wichtigen Energieverbraucher	19
4.2	Ermittlung des Stromverbrauchs	20
4.3	Wärmebedarf auf der Anlage	22
4.4	Ableitung einer Energie- und Treibhausgasbilanz	22
4.5	Zusammenfassung aktuelle energetische Situation	22
4.6	Bewertung zum Stand der Technik	23
4.7	Kennzahlenvergleich	25
4.8	Gegenüberstellung von verbrauchter und erzeugter Energie	27
4.8.1	Eigenversorgungsgrad Strom	27
4.8.2	Eigenversorgungsgrad Wärme	27
5	<i>Ermittlung verfahrenstechnischer Kennwerte (Modul L)</i>	28
5.1	Spezifische Gasbildung	28
6	<i>Energieeffizienzpotenziale der Kläranlage (Module 1-5)</i>	29
6.1	Errichtung einer anaeroben Stufe (Modul 1)	29
6.1.1	Kurzbemessung anaerob mesophile Klärschlammstabilisierung	30
6.1.2	Kostenschätzungen Faulung Kläranlage Pfützthal	35
6.1.3	Klimaschutztechnische Potenziale der anaeroben Stufe	40
6.2	Energieeffiziente Antriebe bzw. Ansteuerungen (Modul 2)	41
6.3	Belüftung und Druckluftversorgung (Modul 3)	42
6.3.1	Austausch der Belüfterelemente:	42
6.3.2	Erneuerung der Druckluftversorgung	42
6.3.3	Kostenschätzung Belüftung und Druckluftversorgung	43
6.3.4	Klimaschutztechnische Potenziale Belüftung und Druckluftversorgung	44
6.4	Verbundverwertung von Klärschlamm (Modul 4)	45
6.4.1	Kurzbemessung der Faulung für die Verbundverwertung von Klärschlamm	46
6.4.2	Kostenschätzungen Verbundverwertung von Klärschlamm	49
6.4.3	Klimaschutztechnische Potenziale Verbundverwertung von Klärschlamm	54

6.5	Integration energiearme Verfahrenstechnik im Rahmen der Stickstoffelimination (Modul 5)	55
6.6	Potenzielle Beabsichtigte Planungen	59
6.6.1	Photovoltaikanlage	59
6.6.2	Wärmepumpe	60
7	Ableitung von Optimierungsmaßnahmen (Modulkombination)	61
7.1	Umsetzungsfahrplan	61
7.2	Prüfung und Sicherstellung der Mindestziele	63
7.2.1	Deckungsquote des Energiebedarfs	63
7.2.2	Spezifischer jährlicher Strombedarf der gesamten Anlage	64
	Anlagenverzeichnis	66
	Planverzeichnis	67
	Abbildungsverzeichnis	68
	Tabellenverzeichnis	69
	Abkürzungsverzeichnis	71
	Literaturverzeichnis	73

1 Veranlassung

Der Wasser- und Abwasserzweckverband (WAZV) Saalkreis plant, die Kläranlage Pfützthal (An der Saale, 06198 Salzatal OT Pfützthal) im Hinblick auf Energieeinsparmöglichkeiten bzw. Energieeffizienzsteigerungen zu untersuchen. Der Fokus liegt auf der Anpassung der Klärschlammbehandlungstechnik. Dabei sollen auch Möglichkeiten der zentralen, gemeinsamen Klärschlammbehandlung/-verwertung der drei größeren verbandseigenen kommunalen Kläranlagen Landsberg, Löbejün und Pfützthal am Standort der Kläranlage Pfützthal aufgezeigt werden. Aus diesem Grund soll eine Energiepotenzialstudie im Sinne des Strategischen Förderschwerpunktes 2.6 (Potenzialstudien) für Abwasserbehandlungsanlagen im Sinne der Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld, kurz Klimaschutzrichtlinie, angefertigt werden. Das Vorhaben erfolgt in Kooperation mit der Projektträger Jülich - Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ), welche die Erstellung der Studie aus den Mitteln der Nationalen Klimaschutzinitiative fördert.

Die Kläranlage Pfützthal des WAZV Saalkreis hat die Kapazität für 36.800 Einwohnerwerte und gehört damit zur Größenklasse 4. Nach der Abwasserreinigung und mechanischen Entwässerung fallen jährlich etwa 1.655 Tonnen nicht ausgefauter Klärschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt (TS) von bis zu 20 % [1] an.

Mit den seit 2015 gültigen gesetzlichen Rahmenbedingungen aus der Düngemittelverordnung (DüMV 2012) ist die landwirtschaftliche und landbauliche Verwertung von Klärschlämmen stark eingeschränkt bzw. komplett weggefallen. Gleichzeitig gewinnt die thermische Entsorgung von mechanisch entwässerten Klärschlamm stark an Bedeutung. Im Zuge dieser Problematik entsteht eine dauerhafte Verteuerung bei den Entsorgungskosten seit 2013.

Zwar können die Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke mechanisch entwässerte Klärschlämme zur Mitverbrennung annehmen, jedoch reduziert der fortschreitende Rückgang in der Kohlenutzung auch die zukünftigen Kapazitäten der thermischen Entsorgung entwässerter Klärschlämme.

Die INFRAPLAN Ingenieure GmbH wurde mit der Durchführung der Potenzialstudie beauftragt, um eine technische Lösung zur wirtschaftlichen und ressourcenschonenden dezentralen Klärschlammbehandlung zu erarbeiten. Diese soll zudem den ökonomischen Unsicherheiten bezüglich Entsorgungskapazitäten und Kostensteigerungen sowie der ökologischen Forderung nach Wertstoffrückführung und Ressourcenschonung adäquat begegnen.

2 Grundkonzept

In der Studie soll die aktuelle Energiesituation der Kläranlage untersucht und weitere Verbesserungsansätze aufgedeckt werden. Ziel ist es, durch einen Energiecheck, basierend auf dem DWA - Arbeitsblatt A 216 [2], eine Dokumentation des IST-Zustands zu erarbeiten. Auf dieser Basis sollen nicht allein Energieeinsparungen identifiziert werden, sondern vielmehr die Energieeffizienzsteigerung durch eine gesamtheitliche Betrachtung von Energiebereitstellung, -umwandlung, -speicherung und -verbrauch sowie deren intelligenter Vernetzung.

Wechselwirkungen können dazu führen, dass bestimmte Energieeffizienzmaßnahmen, auch wenn sie lokal Vorteile bringen können, in der umfassenden Betrachtung der gesamten Kläranlage nicht zu empfehlen sind.

Oberste Prämisse bleibt der prozessstabile Betrieb der Abwasseranlage, der zur Sicherstellung einer gesetzeskonformen Abwasserreinigung und -ableitung erforderlich ist und damit dem Gewässerschutz dient.

Als Ziel wird in der Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld die Minderung von Treibhausgasemissionen formuliert. Durch investive Maßnahmen soll u. a. die Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen deutlich gesteigert und durch lokale Erzeugung der Deckungsgrad des Energiebedarfs dieser Anlagen angehoben werden. Als Fördervoraussetzung investiver Maßnahmen wird deren Notwendigkeit hinsichtlich der Erreichung im Folgenden genannten Ziele definiert, die im Rahmen einer Potenzialstudie zu erörtern ist. Es gelten folgende Mindestziele [3]:

- Deckungsquote des Energiebedarfs für Strom und Wärme durch auf dem Grundstück umgewandelte Energie von mindestens 70 %
- spezifischer jährlicher Energiebedarf der gesamten Anlage (inklusive lokal umgewandelter Energie) von maximal 23 kWh/(EW·a)

Die Gliederung dieser Potenzialstudie bzw. deren inhaltliche Ausgestaltung basiert auf den konkreten Vorgaben gemäß Vorhabensbeschreibung für den Förderschwerpunkt 2.6.2 Potenzialstudie Abwasserbehandlungsanlage [4].

2.1 Instrumente zur Energieoptimierung

Das Arbeitsblatt DWA-A 216 [2] gibt neben einer Anleitung zum systematischen Vorgehen auch konkrete Mindestanforderungen an das zugrunde zu legende Datenmaterial sowie an Inhalt, Qualität und Ergebnisse einer energetischen Optimierung vor. Es unterteilt sich in die Schritte „Energiecheck“ und „Energieanalyse“, die in Detailtiefe und Umfang unterschiedlich sind.

2.1.1 Energiecheck

Gegenstand des Energiechecks ist eine energetische Bestandsaufnahme einer Abwasseranlage, verbunden mit einer ersten Positionsbestimmung hinsichtlich Energieverbrauch und Eigenenergieerzeugung. Der Energiecheck ist als Mittel zur energetischen Selbsteinschätzung zu verstehen und daher so konzipiert, dass er vom Betreiber anhand weniger Kennwerte selbst durchführbar ist.

Im Rahmen des Energiechecks werden nur wenige, relativ einfach zu ermittelnde energietechnische Kennwerte bestimmt. In Tabelle 1 sind die Kennwerte zusammenfassend dargestellt. Grundsätzlich ist dabei zwischen Kläranlagen mit Faulung und ohne Faulung zu unterscheiden.

In Abhängigkeit der individuellen Anlagentechnik und der Datenverfügbarkeit kann der Umfang der Kennwerte des Energiechecks ergänzt werden.

Tabelle 1: Kennwerte des Energiechecks [2]

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung Kennwert	Formel	Beschreibung der Größen	
Kläranlage					
e_{ges}	kWh/(E·a)	Spezifischer Gesamtstromverbrauch der Anlage	$e_{ges} = \frac{E_{ges}}{EW_{CSB}}$	E_{ges}	Stromverbrauch gesamte Anlage in kWh
e_{Bel}	kWh/(E·a)	Spezifischer Stromverbrauch der Belüftung	$e_{Bel} = \frac{E_{ges}}{EW_{CSB}}$	EW_{CSB}	Einwohnerwert bezogen auf 120 g/(E·d) CSB
Pumpwerk					
e_{PW}	kWh/(E·a)	Spezifischer Stromverbrauch Pumpwerk	$e_{PW} = \frac{E_{ges} \cdot 1.000}{Q_{PW} \cdot h_{man}}$	E_{PW}	Stromverbrauch Pumpwerk in kWh
				Q_{PW}	Fördermenge in m ³ /a
				h_{man}	Manometrische Förderhöhe

2.1.2 Energieanalyse

Aus den Ergebnissen des Energiechecks sind die augenscheinlichsten Defizite identifizierbar, jedoch ohne verlässliche quantitative Aussagen und ohne detaillierte Ursachenbestimmung. Diese liefert die Energieanalyse. Zur eigenen Positionsbestimmung wird die Durchführung eines jährlichen Energiechecks empfohlen, z. B. im Rahmen der Selbstüberwachung, eines Benchmarkings bzw. zur Veranschaulichung von zwischenzeitlich erreichten Fortschritten.

Bei der Energieanalyse wird die Energiesituation hinsichtlich Strom und Wärme untersucht, wobei jeweils die Verbrauchswerte den Bezugs- und Erzeugungswerten gegenüberzustellen sind. Wärme ist unter anderem von Bedeutung, wenn Abwasseranlagen zur Deckung des Wärmebedarfs große Mengen Fremdenergie beziehen oder sich in der Nähe größere Abnehmer zur Verwertung überschüssiger Wärme befinden.

Die Energieanalyse besteht aus den Arbeitsschritten gemäß Abbildung 1, wobei sich die Schritte 3 bis 5 über ihre Ergebnisse gegenseitig beeinflussen und iterativ zu bearbeiten sind.

Die Bewertung der energetischen Effizienz der betrachteten Anlage erfolgt anschließend anhand einer Gegenüberstellung der normierten Werte im Ist-Zustand mit anlagenbezogenen Idealwerten, die auf Grundlage von vorhandenen Betriebsgrößen kläranlagenspezifisch errechnet werden. Eine signifikante Differenz zwischen den ermittelten Ist-Werten und den anlagenbezogenen Idealwerten kann ein Indiz für mögliche Optimierungspotenziale sein, die durch entsprechende vorzuschlagende Maßnahmen gehoben werden können.

Für diese Maßnahmen ist anschließend sowohl eine Ermittlung der Wirtschaftlichkeit (Kosten-Nutzen-Verhältnis) als auch eine Kategorisierung und Zusammenstellung zu Paketen vorzunehmen. Insgesamt sind drei Maßnahmenarten entsprechend ihrer Realisierungsphase zu unterscheiden, die sich nach dem DWA-A 216 wie folgt gliedern:

Sofortmaßnahmen (S):

Dies sind Maßnahmen, die sich innerhalb kurzer Zeit mit begrenztem Aufwand umsetzen lassen. Kriterien einer Sofortmaßnahme sind:

- günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis,
- geringer bis kein Planungsaufwand,
- Unabhängigkeit ihrer Durchführung und
- einfache Realisierbarkeit.

Beispiele: Änderungen der Schaltpunkte von Aggregaten oder Anpassungen von Sollwertvorgaben

Kurzfristige Maßnahmen (K):

Dies sind Maßnahmen, die innerhalb kurzer Zeit realisiert werden können, jedoch im Vergleich zu den Sofortmaßnahmen detailliertere Untersuchungen im Zuge einer Planung sowie ergänzende Messungen erfordern können.

Beispiele: Signifikante Änderungen in der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) oder das Auswechseln einzelner Aggregate oder deren Bauteile

Abhängige Maßnahmen (A):

Diese Maßnahmen sind aufgrund eines häufig ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu- meist erst im Rahmen ohnehin durchzuführender Reparaturen oder Um- und Ersatzneubauten wirtschaftlich umsetzbar.

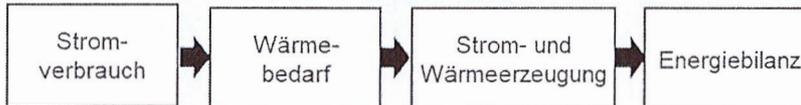
Beispiele: Wesentliche Umstellungen angewandter Verfahren, der Ersatz schadhafter Aggregate, die Ergänzung um weitere Anlagenkomponenten (BHKW-Bau/Tausch bei Errichtung/Um- bau einer Faulung)

Energieanalyse

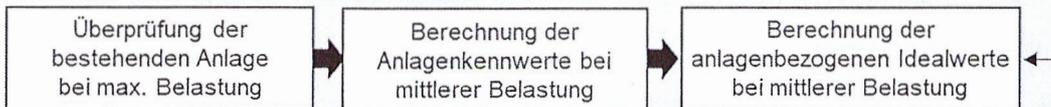
1. Bestandsaufnahme Ist-Zustand



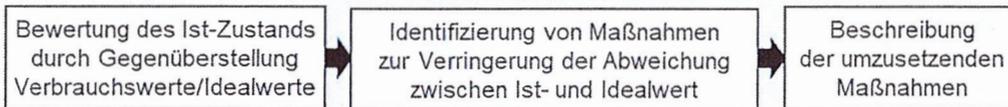
2. Erstellung Verbrauchermatrix und Energiebilanz



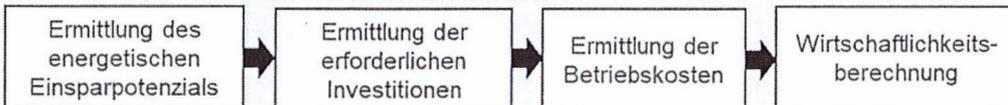
3. Bestimmung anlagenbezogener Idealwerte



4. Bewertung Ist-Zustand und Identifizierung von Maßnahmen



5. Ermittlung Einsparpotenzial und Wirtschaftlichkeit



6. Bildung von Maßnahmenpaketen nach Priorität

7. Berichterstattung

Abbildung 1: Ablaufschema einer Energieanalyse

3 Bestandssituation und Basisdaten (Modul 0)

Die Kläranlage Pfützthal ist eine Kläranlage des Wasser- und Abwasserzweckverbandes Saalkreis und befindet sich in der Gemeinde Salzatal im Landkreis Saalekreis im Süden von Sachsen-Anhalt. Die Kläranlage liegt an der Saale, nordwestlich von Halle (Saale). Sie wurde im Jahr 2008 von 22.500 EW auf 36.800 EW ausgebaut, was auch der aktuellen Belastung im Jahresmittel entspricht.

3.1 Darstellung des Reinigungsverfahrens

Die Abwasserreinigung erfolgt nach dem Verfahren der simultanen Schlammstabilisierung. Die Wirkungsweise kann in einen mechanischen und biologischen Teil unterteilt werden.

3.1.1 Mechanischer Teil

Zuleitung

Die Zuleitung aus dem Kanalnetz erfolgt in ein aus Stahlbeton hergestelltes Zweikammerbauwerk. Es ist nicht technisch belüftet. Über einer Kammer ist eine mit Gitterrost abgedeckte Öffnung. Auf dem Bauwerk sind verschließbare Einstiegsöffnungen mit Dunsthut installiert. Damit ist eine ständige Entlüftung gewährleistet. Das dem Kläranlagengelände zufließende Rohabwasser des Zuleitungssammlers (vom Abwasser durchflossene Einrichtung) von Salzmünde muss vor der Abwasserbehandlung angehoben werden, damit es danach alle Reinigungsstufen im freien Gefälle durchlaufen und auch bei Hochwasser des Vorfluters ohne Rückstau abfließen kann.

Das anfallende Abwasser der unterhalb der Kläranlage liegenden Gemeinden wird über 2 Druckleitungen vom Abwasserpumpwerk Fortuna in Salzmünde und vom Abwasserpumpwerk Wettin übergepumpt. [5]

Rechen

Aus dem zufließenden Abwasser werden die Grobstoffe mittels 2 Siebrechen entnommen. Das Rechengut wird durch eine Rechengutpresse entwässert und in einen Reststoffcontainer abgeworfen. Der Doppelrost-Feinrechen ist eine einfache, fast lautlos arbeitende, kompakte Maschine, die im Gegenstrom verklemmungsfrei und betriebssicher das vor dem Rost angelandete Rechengut aus dem Abwasser fördert. Im Raum sind Heizkörper installiert. Die Belüftung des Rechenraumes erfolgt über einen Ventilator. [5]

Spülgutannahme

Die Spülgutannahmestation ist vor dem Rechengebäude angeordnet. Sie dient der Aufnahme von betriebseigenem Schmutzwasser und abgesaugtem Schmutzwasser aus den Abwasser-schächten. [5]

Sand- und Fettfang

Der belüftete Sand- und Fettfang dient dem Abscheiden von Sand und Fettpartikeln. Sand und Fett werden am Anfang des fortschreitenden Reinigungsprozesses aus dem Abwasser entfernt. Durch eine spezielle Formgebung der schmalen Becken und seitliches Einblasen von Luft wird das durchfließende Abwasser zu einer Spiralbewegung gezwungen, durch die die Sandkörner zu Boden sinken, während die leichteren organischen Stoffe in der Schwebelage bleiben.

Mit einem auf dem Sandfang fahrenden Räumwagen werden die abgetrennten Sand-, Fett- und Schwimmstoffe maschinell geräumt. Dickstoffpumpen befördern den auf der Sohle abgesetzten Sand in eine seitliche Ablaufrinne. Von dort wird das Sand-Wassergemisch wiederum zum Sandklassierer gepumpt. Das Wasser wird wieder dem Abwasserstrom zugeleitet. Der Sand wird in Absetzmulden befördert.

Die aufsteigenden Luftblasen bewirken auch, dass das im Abwasser enthaltene Fett auftritt und sich in seitlichen Kammern an der Oberfläche sammelt, wo es abgeschöpft und einem Fettbunker zugeführt wird.

Die sich entwickelnden Gase im Abwasser steigen auf und verteilen sich in der Luft (freie Lüftung). [5]

Verteilerbauwerk

Das Abwasser gelangt aus dem Rechengebäude über den Sand- und Fettfang weitestgehend störstofffrei in das "passive" Verteilerbauwerk. Das Verteilerbauwerk besteht aus 1 Zulauf- und 4 Ablaufschächten und ist nach oben hin offen. In das Bauwerk wird das maschinell vorgereinigte Abwasser geleitet und über 4 Ablaufschächte auf die 3 Belebungsbecken aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt über 4 Absenkschieber. [5]

3.1.2 Biologischer Teil

Belebungsbecken

Das mechanisch geklärte Abwasser fließt in die Belebungsbecken über das Verteilerbauwerk. Hier beginnt die biologische Reinigungsstufe. Zur biologischen Abwasserreinigung werden als Belebungsanlage Rundbecken eingesetzt. Hier wird das mechanisch geklärte Abwasser mit Hilfe von Mikroorganismen biologisch gereinigt. Dabei entsteht der sogenannte Belebtschlamm. Dieser wird ständig belüftet, damit die Mikroorganismen ausreichend mit Sauerstoff zum Abbau der gelösten Schmutzstoffe versorgt werden. Im Belebungsbecken wird zusätzlich der im Abwasser enthaltene Stickstoff eliminiert. Der anorganische Stickstoff wird zuerst nitrifiziert und in der nächsten Phase denitrifiziert, das heißt zu elementarem Stickstoff überführt. Die Umwälzung des Beckeninhaltes erfolgt mittels bestehenden Tauchmotorrührwerken, die bei ausgeschalteten Drehkolbengebläsen im Dauerbetrieb arbeiten oder als Impulsbelüftung. [5]

Nachklärbecken

In den Nachklärbecken erfolgt die Trennung von Belebtschlamm und gereinigtem Abwasser. Infolge der sehr geringen Fließgeschwindigkeit setzen sich die Belebtschlammflocken auf dem Boden ab. Das gereinigte Abwasser fließt dem Beckenrand zu. Der ständig laufende Rundräumer schiebt mit einem auf der Beckensohle laufenden Schild den abgesetzten Schlamm in den Trichter in der Beckenmitte. Von dort wird der Belebtschlamm als Rücklaufschlamm in die Becken zurückgepumpt oder als Überschussschlamm zum Schlammverdicker geleitet.

Die Mikroorganismen im Belebtschlamm stehen damit erneut für die biologische Abwasserreinigung zur Verfügung.

Durch Zellteilung und Vermehrung der Mikroorganismen einerseits und absterbende Organismen andererseits nimmt die Belebtschlammmenge ständig zu.

Um die Mengen nicht zu groß werden zu lassen, wird von dem im Kreislauf geführten Belebtschlamm regelmäßig ein Teil - der so genannte Überschussschlamm - abgezogen und dem Schlammbehandlungsprozess zugeführt.

Das Klarwasser der Nachklärung fließt über Freispiegelkanäle der Ablaufmessung in Form eines Induktiven Durchflussmessers (IDM) zu. Dieser IDM ist in einem Schachtbauwerk untergebracht. [5]

Rücklaufpumpwerk

Das Rücklaufpumpwerk dient der Förderung des Rücklaufschlammes von der Nachklärung zur Belebung. Über eine Dükerleitung wird der Rücklaufschlamm dem Pumpwerk zugeführt und von der Schneckenpumpe in die Belebungsstufe zurückgepumpt.

Für die Beseitigung des Überschussschlammes ist im Pumpensumpf des Pumpwerks zusätzlich eine Tauchpumpe installiert. Diese Pumpe fördert den entsprechenden Überschussschlamm in den Schlammeindicker. [5]

Klärschlammeindicker

Der Schlammeindicker dient der Eindickung und Zwischenspeicherung des stabilisierten Überschussschlammes sowie als Vorlagebehälter für:

- Klärschlammeindicker und Klärschlammstabilisierung.
- Schlammstorage
- maschinelle Schlammwässerung

Das Bauwerk ist aus Stahlbeton hergestellt und besteht aus einem runden, oben offenen Behälter. Das obere Kontrollpodest ist über eine Treppe erreichbar. Der dem Behälter oberhalb des Wasserspiegels über eine Füllleitung zugeführte Schlamm dickt sich ein und trennt dabei Trübwasser ab. Dieses wird durch ein Entnahmerohr, dessen Einlauföffnung mit einer Tauchwand umgeben ist, abgezogen und dem Kläranlagenzulauf zugeleitet. Unterhalb des Kontrollpodestes ist in die Sohle des Silos ein Pumpensumpf mit einer Kreiselpumpe in Nassaufstellung eingefügt. Mit dieser Pumpe kann über entsprechende Druckleitungen und Schieber eine Rührdüse zur Schlammumwälzung oder die Befüllung von Tankfahrzeugen mit Nassschlamm vorgenommen werden.

Zentratspeicher

Im Zentratspeicher wird das Zentratwasser aus der Schlammwässerung zwischengespeichert, bevor es in die Anlage zurückgepumpt wird. Der Zentratspeicher ist ein geschlossener Behälter aus Beton. Zum Verteilen des Zentratwassers ist eine Abwasserpumpe installiert. [5]

3.1.3 Maschinelle Schlammentwässerung

Dekanter

Das Gebäude für die maschinelle Schlammentwässerung gliedert sich in den eigentlichen Maschinenraum (Aufstellraum für Dekanter) und den gasdicht abgeschlossenen Schalt- und Steuererraum.

Nachdem der Schlamm stabilisiert und durch Suspensionen soweit wie möglich eingedickt wurde, hat er immer noch eine flüssige Konsistenz. Er wird deshalb mit einer Zentrifuge weiter entwässert. Dabei werden Flockungsmittel (Polyelektrolyte) zugegeben, die aufgrund unterschiedlicher elektrischer Ladungen eine Trennung des Wassers vom Schlamm bewirken.

Das Zentrat wird dem Zentratspeicher zugeführt und dann zeitlich verteilt in den Einlauf der Kläranlage gepumpt.

Der dem Dekanter zugeführte Flüssigschlamm wird auf rund 20% Feststoffanteil (Trockensubstanz TS) entwässert und in Container über ein Fördersystem gefördert. [5]

3.1.4 Sonstige Anlagen

Gebläsestationen

Unmittelbar südlich vom Betriebsgebäude befindet sich die Gebläsestation zur Belüftung des Stabilisierungsbeckens.

Die Gebläsestation zur Belüftung der Belebungsbecken ist zwischen den drei Belebungsbecken aufgestellt. An diesem Betriebsgebäude befindet sich auch die Fällmittel-Dosierstation.

3.2 Produzierte Faulgasmenge und Nutzung

Im Rahmen der aeroben, simultanen Klärschlammstabilisierung entsteht kein Faulgas.

3.3 Art der Schlamm Entsorgung

Der anfallende Klärschlamm wird nach der Entwässerung abtransportiert und als Kompostzusatz verwertet. Auf der KA Pfützthal fielen im Jahr 2018 etwa 1.650 m³ entwässerter Schlamm mit einem Feststoffgehalt von rund 20% TS an.

3.4 Grad der Automatisierung der Anlagen

Durch einen definierten Zufluss zur Kläranlage ist die hydraulische Belastung geregelt. Der Betrieb der Belebungsbecken wird mithilfe von Messungen bedarfsorientiert gesteuert.

3.5 Sanierungsbedarf von Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik

Aufgrund der bisherigen Nutzungsdauer einiger Anlagenstufen ist Erneuerungs- und Optimierungsbedarf gegeben. Im Folgenden sind die sanierungsbedürftigen Verfahrensstufen aufgeführt:

- a) Die Gebläse der Belebungsbecken sollen erneuert werden.
- b) Die Flockmittelstation soll ertüchtigt werden

3.6 Lokale Rahmenbedingungen

Im Rahmen der Studie werden die weiteren Berechnungen auf Basis der vorstehenden mittelfristig zu erwartenden mittleren Zulaufbelastung von 36.800 EW_{CSB} als Bezugsgröße angenommen.

Mögliche zu planende Anlagenstufen wie Faulung und/oder thermische Behandlung sind mit entsprechenden Kapazitäten vorzusehen, so dass die Annahme und Weiterbehandlung von entwässerten Schlämmen möglich wird.

3.7 Darstellung aller Energieerzeugungsanlagen

Auf der Kläranlage Pfützthal sind aktuell keine Aggregate zur Stromerzeugung vorhanden. Wärme wird über einen Heizölkessel erzeugt.

3.8 Sensor-/Messtechnik und Kontrolle der Abwasserqualität

Im Prozessleitsystem der Kläranlage werden folgende Parameter über die Sensor-/Messtechnik erfasst:

Tabelle 2: Messsonden Kläranlage Pfützthal

Einsatzort	Messgrößen
Fäkalannahme	pH, Temperatur, Leitfähigkeit
Ablauf Sandfang	pH, Temperatur, Leitfähigkeit
Belebung 2, 3 und 4	O ₂ , Temperatur, Stickstoff (Nitrat)
Ablauf Belebung	Probenfiltration
Ablauf KA	Phosphat
Stabilisation	O ₂ , Temperatur

3.9 Personalsituation

Die Kläranlage Pfützthal wird mit 3 Mitarbeitern betrieben. Diese sind ein Meister und zwei Mitarbeiter für Abwassertechnik.

3.9.1 Weiterbildungsbedarf

Das Personal nimmt regelmäßig an Schulungsveranstaltungen sowie den Treffen der Kläranlagennachbarschaften teil. Durch kontinuierliche Weiterbildungen verfügt das Personal über hohe Qualifikation.

3.9.2 Darstellung der Qualität der Betriebsführung der Anlage

Mit Verweis auf die unmittelbaren vor- und nachstehenden Kapitel ist eine hohe Qualität der Betriebsführung der Anlage festzustellen.

3.9.3 Teilnahme an Benchmarks der Verbände

Der WAZV beabsichtigt die Teilnahme an Benchmarks, um so den Erfolg der umgesetzten Optimierungsmaßnahmen zu prüfen sowie zur Gewährleistung einer nachhaltig energieeffizienten Betriebsführung.

3.9.4 Relevanz und Know-How zum Energieverbrauch

Die Senkung des Energieverbrauchs und die Gewinnung von Regenerativen Energien hat für den WAZV hat in den letzten Jahren einen großen Stellenwert eingenommen.

3.10 Beabsichtigte Planungen

Zur energetischen Optimierung der Anlage werden bereits folgende Einzelmaßnahmen vom WAZV Saalkreis beabsichtigt:

- Erneuerung der Belüftungseinrichtung
- Abwärmenutzung Gebläse mittels Luftwärmepumpe ca. $50 \text{ kW}_{\text{th}} / 20 \text{ kW}_{\text{el}}$ zum Beheizen von Garagen und des Verwaltungsgebäudes
- PV-Anlagen 92,5 kWp
 - PV Garage: 156 Module Leistungsmittel 43,76 kWp
 - PV Gebläsestation: 40 Module Leistungsmittel 11,20 kWp
 - PV Kabelbrücke: 45 Module Leistungsmittel 12,62 kWp
 - PV Freiflächenanlage: 90 Module Leistungsmittel 25,2 kWp
- E-Auto-Ladestationen
 - 5 x 22 kW
 - 7 x 11 kW

Weiterhin vorgesehen sind folgende bauliche und ausrüstungstechnischen Sanierungsmaßnahmen:

- Garagen mit Tank- und Waschplatz für Nutzfahrzeuge (z.B. Kanalspülfahrzeug)
- Ertüchtigung Fällmittelstation

4 Energetische und Klimaschutzbezogene Bestandsaufnahme

4.1 Aufnahme aller wichtigen Energieverbraucher

Die wichtigsten Energieverbraucher der Kläranlage sind in der nachfolgenden Tabelle – geordnet nach Anlagenteilen – zusammengestellt:

Tabelle 3: Nennleistungen der wesentlichen Energieverbraucher

Anlagenstufe	Aggregat	Elektrische Nennleistung [kW]
Mechanische Vorreinigung	Sandfanggebläse 1	3
	Sandfanggebläse 2	3
Biologie	Belebung 2 Gebläse 1	55
	Belebung 2 Gebläse 2	55
	Belebung 3 Gebläse 1	55
	Belebung 3 Gebläse 2	55
	Belebung 4 Gebläse 1	55
	Belebung 4 Gebläse 2	55
Rücklaufschlammpumpe	Rücklaufschlammpumpe 1	11
	Rücklaufschlammpumpe 2	11
Stabilisierung	Stabilisierung Gebläse 1	11,3
	Stabilisierung Gebläse 2	11,3
	Stabilisierung Gebläse 3	11,3
Schlammbehandlung	Trommelantrieb Dekanter	22
	Schneckenantrieb Dekanter	11
	Produktpumpe Dekanter	7,5
	Flockungsmittelpumpe Dekanter	1,1
	Förderschnecke Dekanter 1	2
	Förderschnecke Dekanter 2	4

4.2 Ermittlung des Stromverbrauchs

Der Gesamtstromverbrauch der Kläranlage Pfützthal lag im Betriebsjahr 2019 bei 1.398.821 kWh/a [6]. Dies entspricht einem spezifischen Stromverbrauch von etwa 38 kWh/(EW·a).

Der Verbrauch der einzelnen Anlagenteile wurde über die Nennleistungen P_{Nenn} der Aggregate und die durch das Prozessleitsystem aufgezeichneten Betriebsstunden $t_{Betrieb}$ errechnet:

$$E = P_{Nenn} \cdot t_{Betrieb}$$

Die überschlägig errechneten Stromverbräuche aus Tabelle 4 weichen 0,4% von dem durch das EVU erfasstem Verbrauch ab, ohne Kleinverbraucher wie Beleuchtung, Sozialräume, Labor und Analytik zu Berücksichtigen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Verbräuche der einzelnen Aggregate nur anhand ihrer Nennleistung und den aufgezeichneten Betriebsstunden bilanziert wurden und somit Abweichungen von bis zu 10% vertretbar sind.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über den Anteil der verschiedenen Verfahrensstufen am Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage Pfützthal.

Die Belebung nimmt mit rund 77% den größten Anteil am Gesamtstromverbrauch ein. Grund dafür sind insbesondere die hohen Stromverbräuche der Gebläse für die Belebungsbecken.

Die Gebläse der Schlammstabilisierung verursachen mit ca. 10% den zweitgrößten Stromverbrauch.

Der drittgrößte Anteil des Energieverbrauchs liegt auf der Kläranlage Pfützthal mit etwa 7% beim Rücklaufschlammförderung.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Stromverbräuche der Aggregate (Jahr 2019)

Aggregat	Nennleistung des Motors	Betriebsstunden	Stromverbrauch	spezifischer Stromverbrauch (36.8000 EW)
Bezeichnung	kW	h/a	kWh/a	kWh/EW*a
Sandfang			26.376	0,72
Sandfanggebläse 1	3	4.405	13.216	0,36
Sandfanggebläse 2	3	4.387	13.160	0,36
Stabilisierung			135.600	3,68
Stabilisierung Gebläse 1	11,3	4.000	45.200	1,23
Stabilisierung Gebläse 2	11,3	4.000	45.200	1,23
Stabilisierung Gebläse 3	11,3	4.000	45.200	1,23
Belebung			1.080.684	29,37
Belebung 2 Gebläse 1	55	3.595	197.725	5,37
Belebung 2 Gebläse 2	55	3.592	197.533	5,37
Belebung 3 Gebläse 1	55	2.933	161.332	4,38
Belebung 3 Gebläse 2	55	3.022	166.205	4,52
Belebung 4 Gebläse 1	55	3.285	180.664	4,91
Belebung 4 Gebläse 2	55	3.222	177.227	4,82
Rücklaufschlammpumpe			97.206	2,64
Rücklaufschlammpumpe 1	11	4.877	53.643	1,46
Rücklaufschlammpumpe 2	11	3.960	43.563	1,18
Dekanter			64.736	1,76
Trommelantrieb	22	1.360	29.920	0,81
Schneckenantrieb	11	1.360	14.960	0,41
Produktpumpe	7,5	1.360	10.200	0,28
Flockungsmittelpumpe	1,1	1.360	1.496	0,04
Förderschnecke 1	2	1.360	2.720	0,07
Förderschnecke 2	4	1.360	5.440	0,15
Summe			1.404.602	38,17

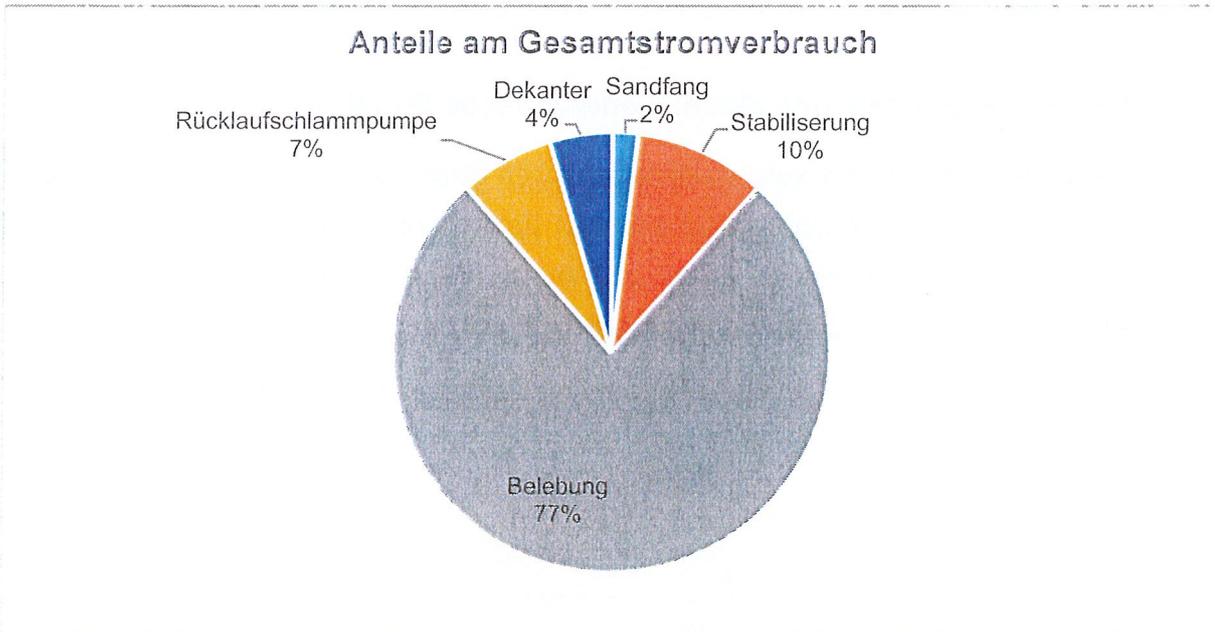


Abbildung 2: Anteile am Gesamtstromverbrauch

4.3 Wärmebedarf auf der Anlage

Die Wärmeerzeugung für die Beheizung des Betriebsgebäudes erfolgt mit Heizöl über einen Heizölkessel. In den übrigen Gebäuden wird lediglich zum Frostschutz geheizt (elektrisch). Der Heizölverbrauch beträgt jährlich etwa 3.000 l. Bei einem Heizwert von 9,8 kWh/l entspricht dies einem jährlichen Wärmebedarf Q_{th} von etwa 29.400 kWh/a.

$$Q_{th} = 3.000 \text{ l/a} \cdot 9,80 \text{ kWh/l} = 29.400 \text{ kWh/a}$$

Eine Faulung oder weitere Wärmeverbraucher sind derzeit nicht vorhanden.

4.4 Ableitung einer Energie- und Treibhausgasbilanz

Die Bilanzierung erfolgt nach dem Prinzip der „endenergiebasierten Territorialbilanz“ Hinweis: Als Emissionsfaktor wird gemäß der für die Beantragung investiver Maßnahmen seitens PTJ bereitgestellten Berechnungsformulare ein Wert von 0,537 kg CO₂/kWh (UBA, 2018) angenommen.

Die Abwasserbehandlungsanlage Pfützthal bezog im Jahr 2019 1.398.821 kWh/a Strom. Demnach kann die CO₂-Emission, bei vollständigem Fremdstrombezug, wie folgt berechnet werden:

$$CO_{2e} = 1.398.821 \text{ kWh/a} \cdot 0,537 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 751.167 \text{ kg CO}_2/\text{a}$$

Weiterhin wird Heizöl als Energieträger mit Einfluss auf die Treibhausgasemission bezogen. Die zur Wärmebereitstellung eingesetzte Heizölenergie von 29.400 kWh/a entspricht bei einem CO₂-Äquivalent von 0,325 kg CO₂ je kWh Heizöl einer jährlichen Emission von 9.558 kg CO₂.

$$CO_{2e} = 29.400 \text{ kWh/a} \cdot 0,325 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 9.558 \text{ kg CO}_2/\text{a}$$

4.5 Zusammenfassung aktuelle energetische Situation

Die Kläranlage Pfützthal weist einen spezifischen Stromverbrauch von 38,17 kWh/(EW·a) auf. Dieser entspricht zugleich dem spezifischen Fremdstrombezug, weil die aktuelle Deckungsquote des Energiebedarfs für Strom und Wärme durch auf dem Grundstück umgewandelte Energie 0 % beträgt. Tabelle 5 vergleicht die aktuelle Situation mit den Zielwerten.

Tabelle 5: Vergleich der aktuellen energetischen Situation mit den Zielwerten

	Aktuell	Zielwert
Spezifischer Energiebedarf	38,17 kWh/(EW·a)	<= 23 kWh/(EW·a)
Deckungsquote	0 %	>= 70%

4.6 Bewertung zum Stand der Technik

Zur ersten Orientierung werden die ermittelten Kennwerte in vorliegende Summenhäufigkeiten aus dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [2] eingeordnet (siehe Abbildung 3). Die Summenhäufigkeiten basieren auf statistischen Auswertungen realer Betriebsdaten von kommunalen Kläranlagen in Deutschland. Sie ermöglichen die Ermittlung der sogenannten „Unterschreitungshäufigkeit“ für die betrachteten Kennwerte als Maßeinheit für die energetische Bewertung.

Aus dem jährlichen Stromverbrauch der gesamten Anlage und der mittleren Belastung der Anlage im Betrachtungszeitraum in Einwohnerwerten (bezogen auf 120 g CSB/(E·d)) wurde der spezifische Gesamtstromverbrauch von 38,17 kWh/(E·a) ermittelt. Durch Zuordnung dieses Kennwerts in die Summenhäufigkeit ergibt sich eine Unterschreitungshäufigkeit von 50 %. Der gemessene Stromverbrauch der betrachteten Anlage wird folglich von 50% der Kläranlagen unterschritten. Dieser Wert deutet auf ein großes Optimierungspotential hin.

Damit wird allerdings keine Aussage darüber getroffen, ob die untersuchte Kläranlage bezüglich des Energieverbrauchs als „gut“ oder „schlecht“ einzustufen ist. Besondere Anforderungen, Topografie, Verfahren usw. können einen erhöhten Energiebedarf rechtfertigen. [7]

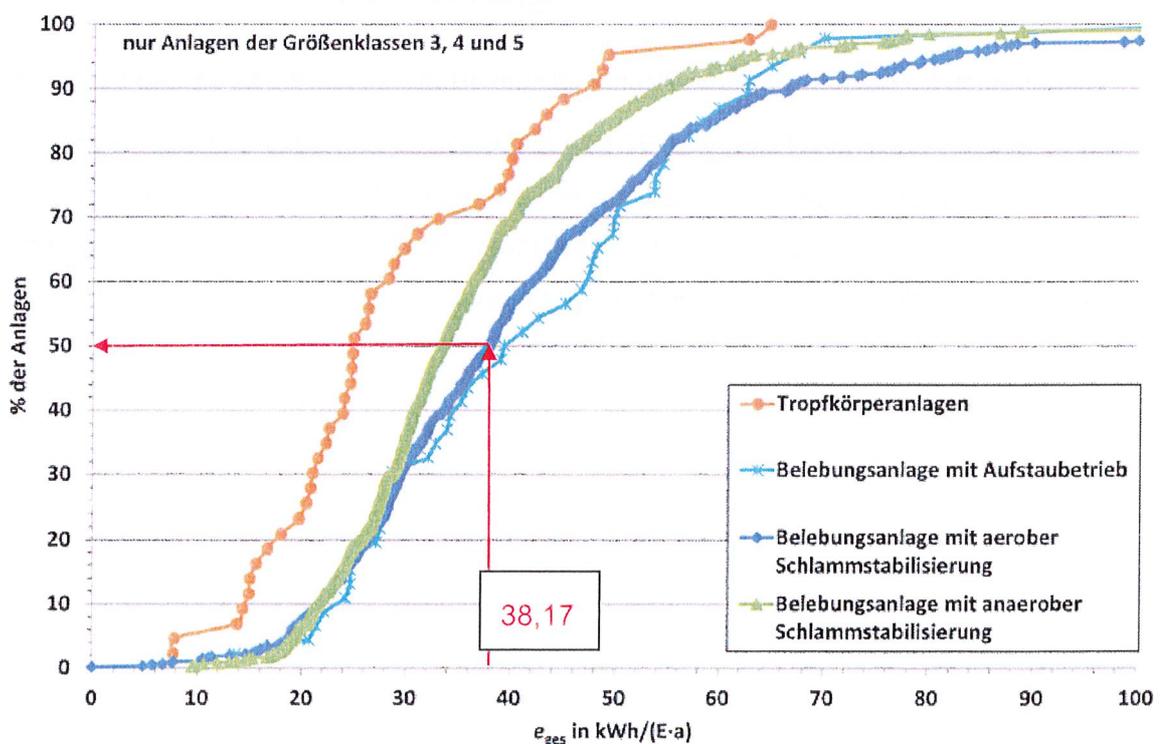


Abbildung 3: Bewertung des spezifischen Stromverbrauchs mittels Summenhäufigkeit

In Deutschland ist die Datenverfügbarkeit des spezifischen Gesamtstromverbrauchs der Kläranlagen zurzeit am größten. Für die übrigen Kennzahlen gibt es derzeit deutlich weniger zugängliche Datensätze. Für den spezifischen Stromverbrauch der Belüftung e_{Bel} der Kläranlagen in Abbildung 4 wurde keine Differenzierung hinsichtlich der Größenklasse vorgenommen.

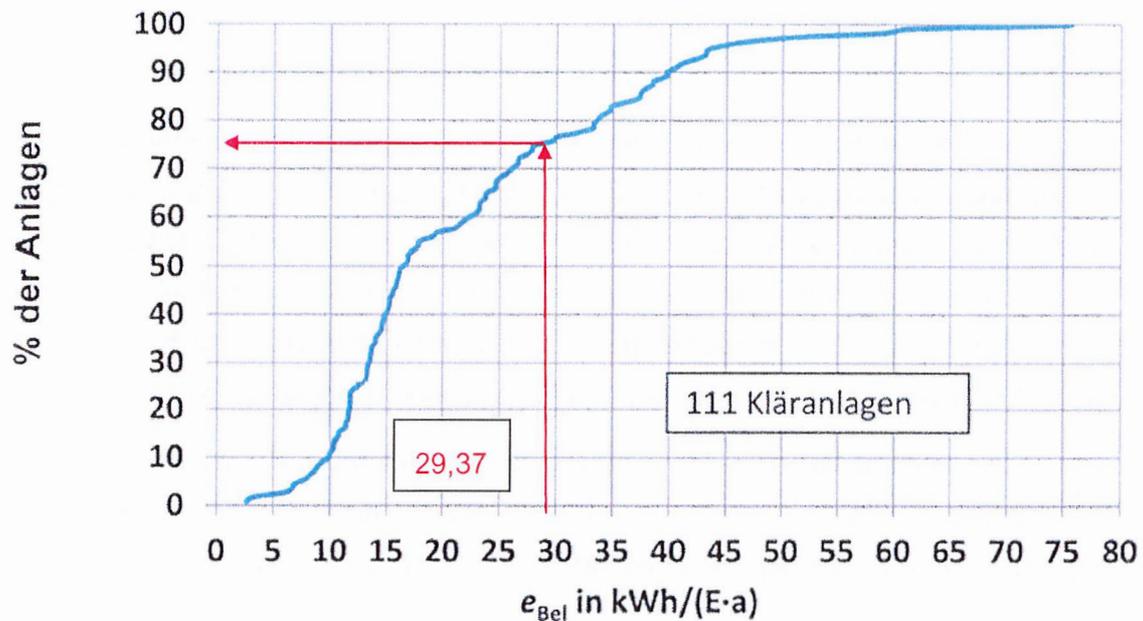


Abbildung 4: Bewertung des spezifischen Stromverbrauchs für die Belüftung der Belebungsanlage

Der ermittelte Kennwert beträgt $29,37 \text{ kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$. Durch Zuordnung dieses Kennwerts in die Summenhäufigkeit ergibt sich eine Unterschreitungshäufigkeit von 75%. Der gemessene Stromverbrauch für die Belüftung der betrachteten Anlage wird folglich von 75% der Kläranlagen unterschritten. Dieser Wert deutet auf ein großes Optimierungspotential hin.

4.7 Kennzahlenvergleich

Gemäß dem Arbeitsblatt DWA A-216 sind folgend die spezifischen Stromverbräuche der Aggregate mit den anlagenspezifischen Idealwerten zu vergleichen, um Optimierungspotenziale abzubilden. Für die Einschätzung der Effizienz einer Kläranlage werden Richtwerte und Idealwerte für den spezifischen Jahresstromverbrauch, bezogen auf einen mittleren Einwohnerwert für die Gesamtkläranlage und der Belebung, herangezogen. Diese Werte entstammen dem MURL-Handbuch „Energie in Kläranlagen“. Für die Ermittlung von einwohnerspezifischen Idealwerten werden die angeschlossenen Einwohner entsprechend der mittleren CSB-Schmutzfracht aus dem Jahr 2019 (36.800 EW_{CSB}) zugrunde gelegt.

Die Richtwerte sind anhand bestehender Feinanalysen und der Bestandsaufnahme von Kläranlagen über 30.000 EW abgeleitete Werte, die realistisch erreicht werden können. Die Idealwerte wurden anhand theoretischer Berechnungen einer Modellkläranlage ermittelt und können unter optimalen Voraussetzungen erlangt werden. In Tabelle 6 sind die Werte für den gesamten Elektrizitätsverbrauch (e_{ges}) und den Elektrizitätsverbrauch der Belebung (e_{Bel}), jeweils für das Schlammalter t_{TS} von 13 Tagen mit Faulung sowie für ein Schlammalter von über 25 Tagen mit aerober Schlammstabilisierung, zu finden. Für die Kläranlage Pfützthal mit einer mittleren Belastung von 36.800 EW und einer simultan aeroben Schlammstabilisierung werden hier die Werte für Anschlussgrößen ab 30.000 EW angesetzt.

Tabelle 6: Kennzahlenermittlung

		Anschlussgröße [EW]									
		2.000 - 5.000		5.000 - 10.000		10.000 - 30.000		30.000 - 100.000		> 100.000	
		RW	IW	RW	IW	RW	IW	RW	IW	RW	IW
e_{ges} [kWh/(E·a)]	$t_{TS} = 13d$			39	30	34	26	30	23	26	20
	$t_{TS} > 25 d$	54	41	46	35	40	31				
e_{Bel}^* [kWh/(E·a)]	$t_{TS} = 13d$			29	22	25	19	23	18	21	16
	$t_{TS} > 25 d$	41	32	36	28	31	24				

*Belebung inklusive Belüftung/Gebälse Umwälzung, Rezirkulation und Rücklaufschlamm
RW: Richtwert; IW: Idealwert

In Tabelle 7 werden die Richt- und Idealwerte mit den für die Kläranlage Pfützthal auf Grundlage des ermittelten Stromverbrauchs und der mittleren Kläranlagenbelastung von 36.800 EW die zugehörigen spezifischen Energieverbrauchswerte verglichen. Für den Kennwert der Belebung werden die benötigten Stromverbrauchswerte der Aggregatliste entnommen.

Tabelle 7: Kennzahlenvergleich zum spezifischen Stromverbrauch mit Richt- und Idealwert

		Gesamte Kläranlage e_{ges}	Belebung* e_{Bel}
Jahresenergieverbrauch	[kWh/a]	1.404.602	1.080.684
spez. Energieverbrauch	[kWh/(EW·a)]	38,17	32,01
Richtwert	[kWh/(EW·a)]	30	23
Abweichung zum Richtwert	[%]	27%	39%
Idealwert	[kWh/(EW·a)]	24	18
Abweichung zum Idealwert	[%]	59%	77%

*Belebung inklusive Belüftung/Gebälse Umwälzung, Rezirkulation und Rücklaufschlamm

Beide Betrachtungsparameter e_{ges} und e_{Bel} liegen mit 27% bzw. 39% Abweichung über dem vorgegebenen Richtwert für Kläranlagen mit aerober Stabilisierung über 30.000 EW. Die Idealwerte werden mit 59% bzw. 77% überschritten und weisen erhebliche Einsparpotentiale auf.

In der nachfolgenden Tabelle 8 werden die Hauptverbraucher nach ihrem Stromverbrauch zum Idealwert verglichen. Damit können Hauptansatzpunkte zur energetischen Optimierung auf Kläranlagen aufgezeigt werden:

Mechanische Vorreinigung

Die Aggregate der mechanischen Vorreinigung weisen nur ein sehr geringes energetisches Optimierungspotential auf.

Biologische Reinigung

Die Belebungsstufe ist der größte Stromverbraucher der Anlage. Es ist eine große Abweichung zwischen den aktuellen Verbrauchswerten und den Idealwerten zu erkennen, so dass Maßnahmen zur Optimierung notwendig sind. In den spezifischen, idealen Verbrauchswerten wurde bereits der Verbrauch zur Durchmischung der Becken berücksichtigt.

Tabelle 8: Hauptverbraucher im Vergleich mit den Idealwerten

Anlagenstufe	Aggregat	Anteil Gesamtstrom	spez. Stromver- brauch	Idealwert	Abweichung
		[%]	[kWh/EW·a]	[kWh/EW·a]	[%]
Mechanische Vorreinigung	Sandfang	2%	0,72	0,7	3%
Biologische Reinigung	Belebung*	77%	32,01	18	77%
Rücklaufschlammpumpe	Pumpen	7%	2,64	1,5	76%
Schlammmentwässerung	Dekanter**	4%	1,76	1,2	47%

*Belebung inklusive Belüftung/Gebälse Umwälzung, Rezirkulation und Rücklaufschlamm

**Werte Schlammmentwässerung aus Kombination von altem und neuem Aggregat

Rücklaufschlammumpwerk

Das Rücklaufschlammumpwerk weist ein großes energetisches Optimierungspotenzial auf. Folglich ist eine Erneuerung der Pumpen und Motoren vorzusehen.

Schlammmentwässerung

Die Daten der Schlammmentwässerung weisen ein feststellbares Optimierungspotenzial auf. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass noch die Verbrauchswerte der alten Entwässerungseinrichtung, die zu Beginn des Jahres 2019 in Betrieb war, eingeflossen sind. Mit der Modernisierung fand kürzlich eine Optimierung der Entwässerung statt, sodass für die neue Anlage keine Potenziale aufgeführt werden.

4.8 Gegenüberstellung von verbrauchter und erzeugter Energie

Auf der Kläranlage Pfützthal wird derzeit nur Energie in Form von Strom und Heizöl bezogen.

4.8.1 Eigenversorgungsgrad Strom

Da kein Strom auf der Anlage produziert wird, beträgt der Eigenversorgungsgrad für Strom 0%.

4.8.2 Eigenversorgungsgrad Wärme

Der Wärmebedarf der Anlage wird vollständig über externen Bezug von Heizöl bedient. Der Eigenversorgungsgrad für Wärme beträgt entsprechend 0%.

5 Ermittlung verfahrenstechnischer Kennwerte (Modul L)

Aus den Kläranlagen Pfützthal, Löbejün und Landsberg wurden jeweils Proben der Abwasserzulaufe sowie aus den Überschussschlammspeichern entnommen. 50 Liter des Abwasserzulaufes wurde anschließend mit Hilfe eines 30 µm Planktonsiebes gesiebt, wodurch die Fraktionen Siebschlamm und Siebdurchlauf gewonnen wurden. Von den 4 je Kläranlage vorliegenden Proben wurden die in Anlage 1 unter 2.1.1, 2.2.1 und 2.3.1 aufgeführten Analysen durchgeführt.

Die 3 Überschussschlämme sowie die Mischung der 3 Überschussschlämme wurden hinsichtlich ihres Gärverhaltens untersucht und mit dem Impfschlamm einer lokalen Biogasanlage beimpft. Es erfolgte die Bestimmung der Ansatzmassen zum Versuchsbeginn und -ende sowie die Analytik der Ansatz-Outputs auf weitere chemische Parameter (CSB, BSB14 usw.). Diese Ergebnisse sind in Anlage 1 unter 2.1.2, 2.2.2 und 2.3.2 zu finden

Die Proben wurden vor der jeweiligen Analytik homogenisiert.

5.1 Spezifische Gasbildung

Nachstehend in Tabelle 9 werden die im Rahmen der Gärversuche ermittelten Kennwerte für die spezifische Gasbildung der Substrate der 3 Kläranlagen und deren Mischprobe zusammenfassend dargestellt. Diese Ergebnisse sind die Grundlage für die Potentialanalyse der Verfahrensumstellung auf eine anaerobe Stabilisation.

Tabelle 9: Auszug aus den Ergebnissen der Gärversuche - Spezifische Gasbildung

	Spezifische Gasbildung	
	[lN/kg TS]	[lN/kg oTS]
Kläranlage Pfützthal	268	442
Kläranlage Löbejün	117	179
Kläranlage Landsberg	184	315
Mischprobe	197	320

6 Energieeffizienzpotenziale der Kläranlage (Module 1-5)

Aus den Abweichungen der spezifischen Stromverbräuche zu den Idealwerten können die größten Optimierungspotenziale aufgezeigt werden. Um den Eigenversorgungsgrad der Anlage zu steigern, ist neben der Senkung des Energieverbrauchs auch eine Steigerung der Energieerzeugung sinnvoll.

6.1 Errichtung einer anaeroben Stufe (Modul 1)

Mit der Verfahrensumstellung von der simultan aeroben Schlammstabilisierung auf die anaerobe Stabilisierung in einem Fermenter kann aus einer regenerativen Energiequelle (Faulgas) Strom erzeugt und damit der Fremdbezug der Kläranlage reduziert werden.

Bei der anaeroben Stabilisierung (Schlammfäulung) werden organische Verbindungen durch anaerobe Mikroorganismen abgebaut. Die Stabilisierung verfolgt das Ziel, den Rohschlamm bezüglich Geruch und Hygiene in einen stabilen Zustand zu bringen und dessen Behandlungseigenschaften, wie zum Beispiel die Entwässerbarkeit und die Transportfähigkeit, zu verbessern. Sie bewirkt eine Verringerung des organischen Anteils im Schlamm, was mit einer Erhöhung des mineralischen Anteils einhergeht. Dabei wird einerseits zwischen den Milieubedingungen – aerob (mit Unterstützung von Sauerstoff) und anaerob (unter Ausschluss von Sauerstoff) – sowie den Temperaturniveaus kalt (psychrophil) und warm (mesophil bzw. thermophil) unterschieden.

Die anaerob-mesophile Stabilisierung ist bezogen auf die Anschlussgröße das in Deutschland am häufigsten eingesetzte Verfahren zur getrennten anaeroben Schlammstabilisierung. Hierbei werden die organischen Stoffe bei einer Temperatur von 30 bis 40°C zu Methan und Kohlendioxid umgesetzt. [7]

Für die Umstellung von der aeroben Schlammstabilisierung auf die Klärschlammfäulung werden beachtliche Energieeinsparpotentiale hinsichtlich des externen Strombezuges (bedingt durch die Eigenstromerzeugung) sowie des allgemeinen Stromverbrauches gesehen. Des Weiteren können zum einen geringere Entsorgungskosten und zum anderen durch die zusätzliche Wärmenutzung die Betriebskosten gesenkt werden.

In der nachfolgenden Tabelle 10 werden die Vor- und Nachteile beider Stabilisierungsvarianten zusammengefasst.

Tabelle 10: Vor- und Nachteile von Stabilisierungsvarianten

Faktor	Aerobe Stabilisierung	Faulung
Energiekosten	höher	niedriger
Eigenstromerzeugung	nein	ja
Personalkosten	niedriger	höher
Abbau org. Substanz	niedriger	höher
Entwässerbarkeit	schlechter	besser
Entsorgungskosten	höher	niedriger
Wartungskosten	niedriger	höher
Investitions-/Kapitalkosten	niedriger	höher

Durch die Umstellung des Klärschlammstabilisierungsverfahrens und die Errichtung eines Vorklärbeckens wird die Belebung entlastet. Dadurch kann zusätzlich zu dem bestehenden energetischen Optimierungspotential der Strombedarf weiter gesenkt werden.

6.1.1 Kurzbemessung anaerob mesophile Klärschlammstabilisierung

Schlammfall

Der Primärschlammfall hängt von der Aufenthaltszeit in der Vorklärung und damit vom Wirkungsgrad der Feststoffabtrennung ab. Nach ATV-DVWK-M 368 beträgt der spezifische Trockensubstanz (TS) ($t_{A,VK} = 1,0 \text{ h}$) $35 \text{ g}/(\text{EW} \cdot \text{d})$. Der TS-Gehalt des abgezogenen Primärschlammes wird mit 4% angesetzt.

Die spezifische TS-Fracht des Überschussschlammes wird mit $38 \text{ g}/(\text{EW} \cdot \text{d})$ und der TS-Gehalt des eingedickten Überschussschlammes mit 6% angenommen. Der Anteil der organischen Feststoffe (oTS) am TS-Gehalt wird mit 70% angesetzt.

Der Rohschlammfall setzt sich aus der Primärschlamm- sowie der eingedickten Überschussschlammmenge zusammen.

Für eine mittlere Belastung von 36.800 EW werden in Tabelle 11 die für die Bemessungsgrundlage der Schlammfäulung relevanten Schlammengen aufgeführt:

Tabelle 11: Bemessungsgrundlage Schlammfäulung

	m ³ /d	kg TS/EW·d	kg TS/m ³	kg TS/d	org. Anteil %	kg oTS/d
Primärschlamm	32,2	0,035	40	1.288	67	863
ÜS-Schlamm	23,3	0,038	60	1.398	70	979
Rohschlamm	54,8	0,073	49	2.686	69	1.842

Faulbehältervolumen

Die Auslegung des Faulbehältervolumens wird für die mittlere Belastung von 36.800 EW bemessen. Der Rohschlammanfall beträgt bei dieser mittleren Belastung etwa 55 m³ pro Tag.

$$\text{Aufenthaltszeit} \quad t_{A,FB} = 25 \text{ d}$$

$$\text{Förderstrom Rohschlamm} \quad Q_{RoS} = 55 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{Volumen Faulbehälter} \quad V_{FB} = 1.375 \text{ m}^3$$

Durch die gewählte Aufenthaltszeit von 25 d sollen Belastungsspitzen und Ausbaureserven ausreichend berücksichtigt werden

Faulschlamm

Der anaerobe Abbau des Rohschlammes bewirkt eine wesentliche Feststoffreduzierung. Etwa 50% der im Rohschlamm enthaltenen organischen Stoffe werden abgebaut.

$$50\% \text{ Abbau oTS} = 1.842 \text{ kg oTS} \cdot 50 \% = 921 \text{ kg oTS/d}$$

$$\text{Faulschlamm} = (2.686 \text{ kg TS} - 921 \text{ kg oTS/d}) = 1.765 \text{ kg TS/d}$$

$$\text{TS-Gehalt} = 1.765 \text{ kg TS} / 54,8 \text{ m}^3/\text{d} = 3,22 \% \text{ TS}$$

Die Umsetzung der organischen Feststoffe führt dazu, dass der Faulschlamm dünner (3,22 % TS) ist als der Rohschlamm (4,9 % TS).

Faulgasproduktion

Durch den Abbau der organischen Bestandteile (oTS) des Klärschlammes im Fermenter wird Klärgas gebildet, welches in Gasmotoren zur Strom- und Wärmeerzeugung verwertet werden kann. Nach ATV-DVWK- M 368 beträgt der spezifische Klärgasanfall (Y_{FG}) 400 - 500 l_N/kg oTS_{zu}. Aus den Gärrestversuchen (siehe Anlage 1) wurde eine spezifische Faulgasproduktion von $Y_{FG} = 442 \text{ l}_N/\text{kg oTS}_{zu}$ ermittelt. Daraus ergibt sich folgender täglicher Klärgasanfall:

$$Q_{FG} = 1.842 \text{ kg oTS/d} \cdot 442 \text{ l/kg oTS}_{zu} = 814 \text{ m}^3/\text{d}$$

Gasspeicher

Da die Klärgasproduktion starken Schwankungen unterlegen ist, wird zur Zwischenspeicherung bzw. zum Mengenausgleich des anfallenden Klärgases ein Gasspeicher benötigt. Dadurch wird überschüssiges Faulgas in Zeiten von Spitzenproduktionen aufgefangen und kann somit zur späteren Verwertung wieder abgegeben werden.

Da moderne Gasmotoren und -turbinen modulierend betrieben werden können, kann das Speichervolumen relativ klein und damit preisgünstig bemessen werden. Es wird ein Klärgasspeicher von ca. 30% des täglichen Gasanfalls von ca. 814 m³ pro Tag (für eine mittlere Belastung von 36.800 EW) als ausreichend erachtet.

$$V_{sp} = 814 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 30\% = 244 \text{ m}^3$$

Gewählt: 250 m³

Gasfackel

Die Gasfackel dient als Sicherheitseinrichtung und muss die Gasproduktion im Falle des Ausfalls der normalen Gasverwertung sicher abführen können.

$$Q_{Fackel} = (814 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 1,5) / 24 \text{ h/d} = 51 \text{ m}^3/\text{h}$$

Blockheizkraftwerk

Zur Wärmebereitstellung kommt ein innovatives Blockheizkraftwerk mit Mikro-Gasturbine zum Einsatz. Durch eine maximale Brennstoffleistung von etwa 220 kW und die Möglichkeit auf modularen Betrieb, soll flexibel und schnell auf den Strom- und Wärmebedarf reagiert werden können.

spezifischer Heizwert von Klärgas $\approx 6,4 \text{ kWh/m}^3$

$$P_{ges} = (814 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 6,4 \text{ kWh/m}^3) / 24 \text{ h/d} = 217 \text{ kW}$$

Wirkungsgrad thermisch $\eta_{th} = 56,4 \%$

(Abgas-Wasser-Wärmetauscher bei 60°C Rücklauf / 80°C Vorlauf)

$$P_{th} = 217 \text{ kW} \cdot 0,564 = 122 \text{ kW}_{th}$$

Wirkungsgrad elektrisch $\eta_{el} = 27 \%$

(inklusive externer Verdichter)

$$P_{el} = 217,1 \text{ kW} \cdot 0,27 = 58,6 \text{ kW}_{el}$$

Mit einer gewählten Anlagenbaugröße von 65 kW_{el} kann eine Jahresstrommenge W_{el,BHKW} von 513.465 kWh/a und einer Jahreswärmemenge Q_{th,BHKW} von 1.072.571 kWh/a erzeugt werden.

Wärme- und Energiebilanz

Für den spezifischen Energieverbrauch einer anaerob-mesophilen Stabilisierung werden nach DWA-A 368 je nach Durchmischungssystem des Faulturms verschiedene Leistungsdichten angegeben. In Tabelle 12 werden die spezifischen Energieverbräuche zusammengefasst aufgeführt.

Tabelle 12: Energieverbrauch der anaerob-mesophilen Stabilisierung je m³ Rohschlamm [7]

Energieverbrauch je m ³ Rohschlamm bei der Faulung (anaerob-mesophile Stabilisierung)	
<p>Strom 1,6 kWh_{th}/m³ - 2,3 kWh_{el}/m³ (Hier gewählt: 1,95 kWh_{el}/m³)</p>	<p>Wärme 24 kWh_{th}/m³ - 30 kWh_{th}/m³ (Hier gewählt: 27 kWh_{th}/m³)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Pumpen zur Faulraumbeschickung • Heizschlammumpen zu Förderung des Schlammes über Wärmetauscher • evtl. Feststoffzerkleinerer und motorbetriebene Schwimmdeckenzerstörer • Umwälzung des Faulraums durch Umwälzpumpe, Schraubenschaufler, Rührwerke, Faulgaseinpressung, Phasenmischsystem mit Impulspumpe (Hochlastfaulung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Rohschlammzufuhr (Schlammaufheizung) • Wärmeaustrag durch Abzug des ausgefaulten Schlammes • Wärmeaustrag durch Faulgasentnahme • Transmissionsverluste an den außen liegenden Leitungen des Umwälzsystems • Transmissionsverluste an der Oberfläche des Faulbehälters

Mit dem gewählten spezifischen Verbrauchswerten 1,95 kWh_{el}/m³ und 27 kWh_{th}/m³ ergeben sich bei einer zugeführten Rohschlammmenge von 54,8 m³/d die folgenden Bedarfe und Bilanzüberschüsse:

Tabelle 13: Energiebedarfe und Überschüsse der Faulung

	Bedarf Faulturm Jahressumme [kWh/a]	Erzeugung BHKW Jahressumme [kWh/a]	Überschuss [kWh/a]
Strombilanz, W_{el}	39.021	513.465	474.444
Wärmebilanz, Q_{th}	540.054	1.072.571	532.276

Rückbelastung aus der Schlammbehandlung

Anlagen mit simultan aerober Schlammstabilisierung weisen in der Regel keine nennenswerten Rückbelastungen aus der Schlammbehandlung auf. Nur das Schlammwasser aus den Schlammspeichern und aus der Schlammentwässerung führen hier zu einer geringen Belastung des rückgeführten Wassers.

Beim Betrieb einer Anlage mit Faulung sind hingegen die Rückbelastungen aus der Schlammbehandlung z.T. erheblich und darum beim Betrieb der biologischen Stufe in Betracht zu ziehen. Im Falle einer Co-Fermentation nimmt die Rückbelastung weiter zu und ist entsprechend zu berücksichtigen. Infolge der Prozesse beim anaeroben Abbau werden Stoffe, die im Belebtschlamm inkorporiert wurden, wieder freigesetzt und gehen in wässrige Lösung. Die entscheidende Stofffraktion bei der Rückbelastung aus der Eindickung und Entwässerung von Faulschlamm ist die Stickstofffracht. Sie liegt bei ca. 20% des NH_4-N_{zu} . Der Rückbelastung durch Kohlenstoff kommt nur eine geringe Bedeutung zu. Der CSB aus der Schlammfäulung ist größtenteils inert und entspricht ca. 10 % der Zulaufkraft. Ebenfalls von nur geringer Bedeutung ist die Phosphor Rückbelastung. Bei der chemisch-physikalischen Phosphorelimination ist sie i. d. R. vernachlässigbar gering. Im Falle einer Bio-P-Elimination erfolgt im Rahmen der Faulung im Faulbehälter eine P-Rücklösung. Jedoch erfolgt parallel eine erneute Fixierung durch chemisch-physikalische Prozesse wie Adsorption und Fällung. Die P Rückbelastung beträgt selten mehr als 5%, bezogen auf die Rohabwasserfracht.

Basierend auf den oben beschriebenen Frachtverhältnissen ist bei der Konzeption diese zusätzliche Fracht zu berücksichtigen. In Abhängigkeit der Verhältnisse muss dann entschieden werden, ob eine Zwischenspeicherung, z. B. Dosierung in den Nachtstunden, oder möglicherweise sogar eine gesonderte (Vor-)Behandlung der Prozesswässer erforderlich ist. Möglicherweise wird auch der Einsatz einer externen Kohlenstoffquelle erforderlich sein, um die rückgeführten Stickstoff-

frachten vollständig eliminieren zu können. Eine Alternative bietet das Verfahren der Deammonifikation, das mit einem geringen Energieeinsatz und ohne zusätzlichen Kohlenstoff auskommt und zur Vorbehandlung des Prozesswassers eingesetzt werden kann. [8]

Tabelle 14: Rückbelastung aus der Schlammbehandlung im Verhältnis zur Zulauffracht [9]

Parameter Zulauf	Rückbelastung	KA Pfützthal
Volumen	1 %	820 m ³ /d
CSB	10 %	126 mg/l
NH ₄ -N _{zu}	20 %	14 mg/l
P	5 %	< 1 mg/l

6.1.2 Kostenschätzungen Faulung Kläranlage Pfützthal

Investitionskosten

Die Kostenschätzung für die Bautechnik der anaeroben Klärschlammstabilisierung berücksichtigen folgende maßgebende Kostenfaktoren:

- Vorklärbecken mit Primärschlammumpwerk
- Zwischenpumpwerk
- Faulbehälter
- Maschinengebäude (zur maschinellen Voreindickung des Überschussschlammes)
- Schlammvorlagebehälter
- Gasspeicher mit Gasfackel
- Blockheizkraftwerk.

Für die Kostenschätzung wurden die folgenden Rahmenbedingungen unterstellt: Es wurde eine 2-stufige Kompaktfaulung gewählt. Im Vordergrund steht die hohe Betriebssicherheit durch zweistufige Ausführung bei Anlagen kleiner und mittlerer Größe. Weiterhin ist diese Anlagentechnik wirtschaftlich umsetzbar und führt durch die Zweistufigkeit zu einer hohen Gasausbeute. Für die Gasreinigung wurden Kiesfilter und Aktivkohlefilter berücksichtigt. Es wird keine separate Prozesswasserbehandlung berücksichtigt. Es wurden normale Baugrundverhältnisse vorausgesetzt. Für den Bau der tief gegründeten Bauwerke (Vorklärbecken, Zwischenpumpwerk und Roh-

schlammbehälter) wurde davon ausgegangen, dass diese auf tragfähigem Boden gegründet werden können. Für die flach gegründeten Bauwerke (Faulbehälter, Technikgebäude usw.) wurde ein 1 m starker Bodenaustausch berücksichtigt. Die Erdaushubarbeiten für die tief gegründeten Bauwerke erfolgen mit geböschter Baugrube (45° Böschungswinkel). Es wurden normale Grundwasserverhältnisse angenommen. Auf Basis von Erfahrungswerten, spezifischen Raumpreisen und Ausschreibungsergebnissen wurden die Kosten für die relevanten Anlagenteile ermittelt.

Tabelle 15: Kostenschätzung Faulung im Verbund

Kostenschätzung Faulung	Gesamt
KA Pfützthal	
Bemessungsgröße (Schlammseitig)	36.800 EW
Vorklärbecken	322.000 €
Kompaktfaulbehälter	896.000 €
Gasaufbereitung und Gasverwertung	783.000 €
Sonstige Bauwerke	373.000 €
Zwischensumme	2.374.000 €
zzgl. Baunebenkosten; Ansatz 25%	593.500 €
Gesamt, netto	2.967.500 €
zzgl. 19% MwSt.	563.825 €
Summe, brutto	3.531.325 €

Kapitalkosten

Die Kapitalkosten berechnen sich aus den Investitionskosten multipliziert mit den Kapitalwiedergewinnungsfaktoren (KFAKR). Diese werden in Abhängigkeit der Nutzungsdauer (n in Jahren) der jeweiligen Anlagenteile sowie des Zinssatzes (i) wie folgt ermittelt:

$$KFAKR(i; n) = i \cdot \frac{(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Tabelle 16: Kapitalkosten der Verfahrensumstellung auf Faulung

	n	i	KFAKR	brutto (19% MwSt.)
Bauwerke, Verkehrsflächen	40	2,0 %	0,036556	51.908 €
Maschinenteknik, EMSR	20	2,0 %	0,061157	129.124 €
Summe Kapitalkosten				181.032 €

Die Kapitalkosten der Verfahrensumstellung betragen 166.549 €/a.

Betriebskosteneinsparungen

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind neben den reinen Investitionskosten auch die Betriebskosten einzubeziehen.

Durch Umstellung der Verfahrensführung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung wird eine Reduzierung der laufenden Kosten erreicht. Diese ergibt sich aus der Stromeinsparung durch geringere Belüftungsenergie in der biologischen Reinigungsstufe, der Eigenstromerzeugung aus der Verwertung des Faulgases sowie der Reduzierung der zu entsorgenden Schlammengen aufgrund des weitergehenden Abbaus an organischer Substanz sowie der verbesserten Entwässerungseigenschaften.

Im Gegenzug sind höhere Betriebskosten für Wartung und Instandhaltung der zusätzlichen Bauwerke und Anlagen (Faulbehälter, Maschinengebäude etc.) sowie höhere Personalkosten zu berücksichtigen.

Faulgasverstromung

Der aus Faulgas erzeugte Strom soll nach Möglichkeit direkt selbst genutzt werden. Aus der Strombilanz für die Faulung geht ein Überschuss zur Deckung des Eigenbedarfs der Kläranlage hervor. Dieser Wert wird mit dem aktuellem Strombezugspreis multipliziert, um den Betrag für die jährliche Stromkosteneinsparung zu erhalten:

$$474.444 \text{ kWh/a} \cdot 0,2223 \text{ €/kWh} = 105.469 \text{ €/a}$$

Gemäß KWK-Gesetz 2017 erhält der Betreiber für eine 65 kW_{el} Anlage einen spezifische Fördersatz von 3,769 ct/kWh. Bei einer erzeugten elektrischen Arbeit von 522.758 kWh/a entspricht dies 19.354 €/a. Der Förderzeitraum beträgt dabei 30.000 Vollbenutzungsstunden. Dies entspricht bei jährlich 8.000 Betriebsstunden 3,75 Jahren. Die gesamte Fördersumme beträgt demnach 72.576 €. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird der Fördersatz auf die angenommene Lebensdauer der Anlage von 10 Jahren verteilt. Daraus resultiert eine zusätzliche Einsparung durch Förderung von 7.258 €/a.

Die betrachtete Kosteneinsparung durch die Faulgasverstromung beträgt damit 112.727 €/a.

Belebung

Der Sauerstoffverbrauch in der Belebung ist zum einen vom Schlammalter und zum anderen von der Durchflusszeit der Vorklärung abhängig. Durch Umstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung reduziert sich das Schlammalter von 25 auf 13 Tage. Diese Reduzierung des Schlammalters bewirkt eine Abnahme des Sauerstoffbedarfs in der Belebung und des erforderlichen Luftmengenbeitrags um 16%. Der damit verbundene elektrische Energiebedarf verringert sich proportional. Da in der Vorklärung durch Abzug des Primärschlammes Kohlenstoff und Stickstoff abgeschieden wird, reduziert sich nochmals der Sauerstoffverbrauch in der Belebung um etwa 25 %. Bezieht man die Rückbelastung des Stickstoffes (20% des Zulaufes) aus der Entwässerung mit ein, ergibt sich eine Verringerung des Sauerstoffbedarfs durch Erweiterung eines Vorklärbeckens (mit $t_{A,VK} = 1,0$ h) um etwa 18%. Zusammenfassend ermittelt sich eine Reduzierung des Sauerstoffverbrauches und der damit verbundene Strombedarf um 33%.

Der Stromverbrauch der biologischen Reinigungsstufe beträgt aktuell 1.080.684 kWh/a. Reduziert man diesen wie beschrieben um 356.626 kWh/a, beläuft sich der Jahresstromverbrauch der biologischen Reinigungsstufe auf 724.058 kWh. Folgende Betriebskosteneinsparung könnte dadurch in Bereich der Belebung erreicht werden:

$$356.626 \text{ kWh/a} \cdot 0,2223 \text{ €/kWh} = 79.278 \text{ €/a}$$

Summe der Stromkosteneinsparungen durch Verfahrensumstellung: 192.004 €/a

Personalkosten

Der zusätzliche Arbeitszeitbedarf wurde mit 15 h/Woche und einem Stundenverrechnungssatz von 30,00 €/h berücksichtigt.

Aufwand Personalkosten Faulung: 23.400 €/a

Instandhaltung

Für die Wartung und Instandhaltung der neuen Anlagenstufen wurde ein Pauschalansatz von 0,25%/a der Investitionskosten für den baulichen Teil und von 0,50%/a der Investitionskosten für die Ausrüstung angesetzt.

Aufwand Instandhaltung Faulung: 11.300 €/a

Transport- und Entsorgungskosten

Durch den weitergehenden Abbau der organischen Feststoffe im Verlauf der Faulung reduzieren sich die zu entwässernden bzw. anschließend zu entsorgenden Schlammengen. Entscheidend ist jedoch die im Allgemeinen bessere Entwässerbarkeit der ausgefaulten Schlämme im Vergleich

zu den aerob stabilisierten Schlämmen (DWA M-368). Verantwortlich dafür ist der geringere organische Anteil (niedrigerer Glühverlust) nach der Faulung.

Für die Ermittlung der zu entwässernden bzw. zu entsorgenden Schlammengen wird davon ausgegangen, dass aus dem höheren oTS-Abbau in der Faulungsanlage eine um 10 g/(E·d) geringere Feststofffracht resultiert. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass bei der maschinellen Entwässerung höhere Feststoffgehalte (28-30% anstelle von 20-22%) erreicht werden.

Die spezifischen Entsorgungskosten wurden mit 65,45 €/t entwässertem Schlamm (spezifischer Preis für die bisherige Entsorgung beim Kompostwerk) eingerechnet.

Die Schlammmenge reduziert sich bei Einsatz einer Faulung um ca. 30%, was sich insgesamt positiv auf die anfallenden Transport- und Entsorgungskosten auswirkt.

Transport- und Entsorgungskosten Klärschlamm (bisher): 108.320 €/a

Transport- und Entsorgungskosten Faulschlamm (neu): 72.213 €/a

Einsparungen Transport- und Entsorgungskosten: 36.107 €/a

Zusammenstellung der Betriebskosten

In der nachfolgenden Tabelle werden die einzelnen Positionen der Betriebskosten nochmals aufgeführt und anschließend zusammengefasst:

Tabelle 17: Betriebskosten Faulung KA Pfützthal

Kostenpunkt	Gesamt in €/a, brutto
Einsparungen	
Stromkosten	192.004
Transport- und Entsorgung	36.107
Summe	228.111
Aufwendungen	
Personalkosten	31.200
Instandhaltung	11.300
Summe	42.500

Durch die Umstellung auf die anaerobe Klärschlammstabilisierung können jährlich Betriebskosten in Höhe von etwa 185.611 €/a eingespart werden.

Kosten-Nutzen-Verhältnis anaerobe Stufe KA Pfützthal

Tabelle 18: Kostengegenüberstellung anaerobe Stufe

	Jahreskosten	Kosteneinsparungen
Errichtung anaerobe Stufe	223.532 €/a	228.111 €/a
Kosten-Nutzen-Verhältnis	0,98 < 1	

Zwar liegen die abgeschätzten Kosteneinsparungen aktuell nur knapp unter den Jahreskosten (Kapitalkosten + Betriebskosten), jedoch sind in der Betriebskostenbetrachtung die jährlichen Steigerungen der Energie- und Entsorgungskosten noch nicht berücksichtigt. So dass sich bei zukünftiger Marktsituation die Verfahrensumstellung auf die anaerobe Stabilisierung als weitaus wirtschaftlicher erweisen könnte.

6.1.3 Klimaschutztechnische Potenziale der anaeroben Stufe

Insgesamt können durch die Umstellung der Schlammstabilisierung Energieeinsparungen in Höhe von 831.070 kWh und damit verbundene Treibhausgasemissionen in Höhe von 446.285 kg CO₂e/a eingespart werden.

Der vermiedene Transportaufwand durch bessere Entwässerbarkeit des Faulschlammes beträgt 456 kg CO₂e/a. Hierbei wird die einfache Transportentfernung von 14 km und die spezifischen Emissionen von 0,059 kg CO₂/t km (0,02 Liter je km und Tonne nach Transportlast DSLV-Leitfaden) für 1.103 t Faulschlamm jährlich berücksichtigt.

In Summe können mit dieser Maßnahmen 446.741 kg CO₂e/a eingespart werden.

6.2 Energieeffiziente Antriebe bzw. Ansteuerungen (Modul 2)

Die Rücklaufschlammumpen weisen einen hohen spezifischen Stromverbrauch auf. Im Rahmen der Erneuerungsmaßnahmen der Belebung kann ein Austausch der bestehenden Pumpen und Motoren durch energieeffiziente Aggregate erfolgen.

Durch Erneuerung der Pumpen und Motoren und Erreichen des Idealwertes von 1,5 kWh/E-a könnte folgende Strommenge eingespart werden:

$$W_{el} = 97.206 \text{ kWh/a} - 55.200 \text{ kWh/a} = 42.006 \text{ kWh/a}$$

Dies entspricht eingesparten THG-Emissionen durch Fremdstrombezug von:

$$\text{CO}_{2e} = 42.006 \text{ kWh/a} \cdot 0,537 \text{ kg CO}_{2e}/\text{kWh} = 22.557 \text{ kg CO}_{2e}/\text{a}$$

Die Investitionskosten können mit 40.000 € brutto abgeschätzt werden. Die Jahreskosten belaufen sich damit auf 2.813 €/a (KAFKR (i=2%, n=20)). Die Stromkosteneinsparung wird bei 42.006 kWh/a und einem Strompreis von 0,2233 €/kWh auf 9.338 €/a abgeschätzt.

Tabelle 19: Kostengegenüberstellung Energieeffiziente Antriebe

	Jahres- bzw. Kapitalkosten	Kosteneinsparungen
Errichtung anaerobe Stufe	2.446 €/a	9.338 €/a
Kosten-Nutzen-Verhältnis	0,26 < 1	

Durch die geringeren Jahreskosten, wobei keine Mehr- oder Minderaufwände für Unterhaltungs- und Wartungskosten entstehen, ist das Kosten-/Nutzen-Verhältnis deutlich kleiner als 1 und daher als sehr wirtschaftlich zu bewerten.

6.3 Belüftung und Druckluftversorgung (Modul 3)

Die Belebungsbecken samt Anlagentechnik weisen bei Vergleich mit den Idealwerten ein signifikantes Optimierungspotential auf. Die Umwälzung des Beckeninhaltes erfolgt derzeit mittels Impulsbelüftung oder mit den bestehenden Tauchmotorrührwerken, die bei ausgeschalteten Drehkolbengebläsen im Dauerbetrieb arbeiten.

Um das hohe Energieeinsparpotenzial im Bereich der Belüftung der Belebungsbecken zu nutzen, wird eine Erneuerung des Belüftungssystems neben dem Ersatz der Gebläse betrachtet.

6.3.1 Austausch der Belüfterelemente:

Im Rahmen der Erneuerung des Belüftungssystems kann als Optimierungsmaßnahme ein Austausch der Belüfterelemente vorgesehen werden.

Derzeit am Markt angebotene Systeme führen nachweislich zu erheblichen Energieeinsparungen. Bei der Wahl eines geeigneten Systems sind zudem lange Standzeiten erreichbar.

Aktuell werden immer häufiger Plattenbelüfter oder Streifenbelüfter eingesetzt, die einen höheren Sauerstoffeintrag sowie längere Standzeiten aufweisen.

Der elektrische Energieverbrauch für die Druckbelüftung des Belebungsbeckens beträgt gemäß Verbrauchermatrix 1.080.684 kWh/a. Durch den Einsatz großformatiger Plattenbelüfter können bis 30% Belüftungsenergie eingespart werden. Unter der Annahme einer Einsparung von 20% entspräche dies 216.137 kWh/a. Bei einem Strompreis von 0,2233 €/kWh ergäbe sich eine Einsparung von 48.263 € pro Jahr. Die eingesparte THG-Emission durch Fremdstrombezug beträgt:

$$216.137 \text{ kWh/a} \cdot 0,537 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 116.066 \text{ kg/CO}_2\text{e/a}$$

Die derzeit am Markt verfügbaren großformatigen Membranplattenbelüfter sind relativ kostengünstig. Vorteilhaft ist jedoch die hohe Lebensdauer von ungefähr 20 Jahren. Ein weiterer Vorteil von Membranplattenbelüftern liegt darin, dass das vorhandene Luftzuführungssystem weitestgehend erhalten und weiterverwendet werden kann. Die Modernisierungskosten bleiben dadurch geringer. Für die Membranplattenbelüfter wären Investitionskosten je Becken von etwa 95.000 € brutto notwendig.

6.3.2 Erneuerung der Druckluftversorgung

Durch den Austausch der Gebläse sollen die Energieeinsparpotenziale genutzt werden. Inzwischen werden am Markt individuelle Lösungen aus Drehkolbengebläse, Drehkolbenverdichter und Turbogebälse angeboten. Jede dieser Technologien hat Stärken, aber auch physikalische Grenzen. So zeichnen sich Turbogebälse durch eine hohe Energieeffizienz im Auslegungspunkt

aus. Gleichzeitig ist der Regelbereich von Turbomaschinen auf 40 - 100% begrenzt und die Effizienz lässt im Teillastbetrieb nach. Dies wiederum ist die Stärke von Drehkolbenmaschinen, die sich mit einer Regelbarkeit von 25 - 100% und einer nahezu gleichbleibenden Effizienz auch im Teillastbetrieb auszeichnen. Auf der Suche nach der effizientesten Lösung gilt es also, die Möglichkeiten der Maschinentechologien auf die individuellen Anforderungen der jeweiligen Anlage zu konfigurieren.

Aus dem direkten Vergleich eines neuen Drehkolbenverdichters zu den vorhandenen Maschinen (je 33,5 m³/min/500 mbar) können ebenfalls etwa 20% des Energieverbrauchs eingespart werden. Die Investitionskosten für den Austausch je Gebläse können mit 28.000 € brutto abgeschätzt werden.

6.3.3 Kostenschätzung Belüftung und Druckluftversorgung

Die Investitionskosten der kombinierten Maßnahme ergeben sich aus der Kostenschätzung für den Austausch der Beckenbelüftung in Tabelle 20 und für den Austausch der Gebläse in Tabelle 21.

Tabelle 20: Kostenschätzung Austausch Beckenbelüftung

Membranplattenbelüfter	Menge	EP	GP
Beckenbelüftung	3	69.500 €	208.500 €
Baunebenkosten 25%			52.125 €
Zwischensumme			260.625 €
zzgl. MwSt. 19%			49.519 €
Summe			310.144 €

Tabelle 21: Kostenschätzung Austausch Gebläse

Drehkolbenverdichter	Menge	EP	GP
Gebläse	6	20.500 €	123.000 €
Baunebenkosten 25%			30.750 €
Zwischensumme			153.750 €
zzgl. MwSt. 19%			29.213 €
Summe			182.963 €

Die Investitionskosten für die kombinierte Maßnahme können mit 493.106 € brutto abgeschätzt werden. Die Jahreskosten belaufen sich damit auf 30.157 €/a (KAFKR (i = 2%, n = 20)). Die Stromkosteneinsparung wird bei 389.046 kWh/a und einem Strompreis von 0,2233 €/kWh auf 86.874 €/a abgeschätzt.

Tabelle 22: Kostengegenüberstellung Erneuerung Belüftung und Druckluftversorgung

	Jahres- bzw. Kapitalkosten	Kosteneinsparungen
Errichtung anaerobe Stufe	30.157 €/a	86.874 €/a
Kosten-Nutzen-Verhältnis	0,35 < 1	

Durch die geringeren Jahreskosten, wobei keine Mehr- oder Minderaufwände für Unterhaltungs- und Wartungskosten betrachtet werden, ist das Kosten-/Nutzen-Verhältnis deutlich kleiner als 1 und daher als sehr wirtschaftlich zu bewerten.

6.3.4 Klimaschutztechnische Potenziale Belüftung und Druckluftversorgung

Mit der Maßnahme kann der Stromverbrauch für die Belüftung und Druckluftversorgung von 1.080.684 kWh/a auf 648.410 kWh/a gesenkt werden. Die eingesparte Strommenge von 389.046 kWh/a entspricht einer eingesparten Treibhausgas-Emission durch Fremdstrombezug von 208.918 kg/CO₂e/a:

$$\text{CO}_2\text{e} = 389.046 \text{ kWh/a} \cdot 0,537 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 208.918 \text{ kg/CO}_2\text{/a}$$

6.4 Verbundverwertung von Klärschlamm (Modul 4)

Bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe (5.000 – 50.000 Einwohnerwerte) kann die Umstellung auf eine anaerobe Stabilisierung in Verbindung mit einer Schlammbehandlung im Verbund mehrerer Kläranlagen interessant sein. Bei der Mitbehandlung von Schlämmen benachbarter Kläranlagen sind die zusätzlichen Belastungen aus der Schlammbehandlung bei der Bemessung des Abwasserweges, u. a. Maßnahmen zur Stickstoffelimination, zu berücksichtigen. Neben den verfahrenstechnischen Aspekten sind die energetischen Randbedingungen zu beachten. Hier kommt es vor allem darauf an, dass bei der Schlammfäulung produzierte Faulgas effizient und wirtschaftlich zu nutzen. Wenn der Eigenbedarf der Kläranlage gedeckt ist, muss für die überschüssige Energie (Gas oder Strom und Wärme) eine Nutzungsmöglichkeit gegeben sein.

Klärschlämme von anderen Kläranlagen sind keine externen Substrate im eigentlichen Sinn, da der Klärschlamm dem vorgesehenen Substrat entspricht. Mitbehandelte Klärschlämme werden als „Fremdschlämme“ bezeichnet. Vorhandene freie Faulraumkapazitäten könnten durch Schlammverbundkonzepte sinnvoll genutzt werden, indem räumlich nahe zueinander liegende Stabilisierungs- und Faulungsanlagen gemeinsam und übergreifend betrieben werden. Die Stabilisierungsanlagen werden dann mit einem geringeren Schlammalter mit der alleinigen Aufgabe der Abwasserbehandlung betrieben.

Der nicht stabilisierte Überschussschlamm dieser Anlagen wird einer nahegelegenen Faulungsanlage mit entsprechenden Kapazitätsreserven zugeführt. Der in diesen Anlagen mit ausgefäulte Schlamm kann zur Energieproduktion genutzt werden. Gleichzeitig wird auf den "ehemaligen" (aeroben) Stabilisierungsanlagen (Schlammalter > 25 d) der Strombedarf verringert, da das Schlammalter abgesenkt werden kann.

Dort wird das Schlammalter in den Belebungsbecken gezielt zur alleinigen Kohlenstoff- und Nährstoffeliminationen reduziert, um der Faulungsanlage in Pfützthal hochkalorischen Klärschlamm anbieten zu können. Die Abwasserreinigung wird hierdurch nicht negativ beeinflusst. Vor dem Transport der Klärschlämme zur KA Pfützthal werden diese dezentral maschinell eingedickt [7].

Ein umfassendes Klärschlammmentsorgungskonzept des WAZV Saalkreis existiert bisher noch nicht. Eine grundsätzliche Überlegung geht bisher dahin, die maschinell entwässerten Klärschlamm der Anlagen Löbejün (Ausbaustufe 10.000 EW, realer Anschluss: rund 9.000 EW, An der Voigtei 1, 06193 Wettin-Löbejün) und Landsberg (Ausbaustufe 10.000 EW, realer Anschluss: 22.000 EW, Am Klärwerk, 06188 Landsberg) zur Kläranlage Pfützthal (Ausbaustufe: 36.800 EW, realer Anschlussgrad entspricht nahezu der Ausbaustufe) zu transportieren und dort zentral zu behandeln.

Ziele der Klärschlammverwertung im Verbund sind:

- Steigerung der Energieeffizienz durch
 - o Energieeinsparungen auf den Anlagen und
 - o Eigenstromerzeugung durch Faulgasverwertung,
- Verminderung der zu verwertenden Klärschlammmenge.

Durch die Umstellung der Verfahrensführung auf Schlammfäulung erhöht sich die Ausbaugröße der Kläranlage Pfützthal wasserseitig auf etwa 49.000 EW, weil durch die Vorklämung die BSB-Fracht zur Belebungsanlage um ca. 25 % vermindert wird und das Schlammalter in der Belebung von mehr als 25 d auf ca. 15 Tage vermindert werden kann. Das vorhandene Belebungsbeckenvolumen reicht aus, um das zusätzliche Schlammwasser, das bei einer Mitfäulung der Fremdschlämme zusätzlich anfällt, mitzubehandeln.

Aufbauend auf Kapitel 6.1 - Errichtung einer anaeroben Stufe (Modul 1) sollen im Folgenden der zusätzliche Aufwand und Nutzen einer Verbundverwertung ermittelt werden.

6.4.1 Kurzbemessung der Fäulung für die Verbundverwertung von Klärschlamm

Eine neue Kompaktfäulungsanlage hätte wasserseitig eine Ausbaugröße von etwa 49.000 EW. Neben dem Schlamm der Kläranlage Pfützthal würden darin auch die Schlämme der benachbarten Kläranlagen Löbejün und Landsberg ausgefäult und anschließend entwässert. Die maschinell voreingedickten Rohschlämme müssten per Lkw zur Kläranlage Pfützthal transportiert werden.

Die Überschussschlämme der dezentralen Anlagen und der auf der Kläranlage Pfützthal anfallende Überschussschlamm werden jeweils vor Ort voreingedickt. In einem Vorlagebehälter werden der Primär- und voreingedickte Überschussschlamm der Kläranlage Pfützthal sowie die angelieferten Fremdschlämme vor Zugabe in den Faulbehälter zwischengestapelt und homogenisiert. Die zusätzlich anzunehmende voreingedickte Überschussschlammmenge beläuft sich auf etwa 775 kgTS/d siehe Tabelle 23.

Tabelle 23: Klärschlammengen der dezentralen Verbundanlagen

	Einheit	Landsberg	Lobejün	Summe
Einwohnerwerte		10.000	9.000	19.000
Entsorgungsmengen in 2019	t/a	638	591	1.229
TS-Gehalt nach Entwässerung	%	24%	22%	
TS-Fracht	t/a	153	130	283
TS-Fracht	kg/d	419	356	775

Daraus wird eine Anpassung der Ausbaugröße für die Faulung notwendig. Die für eine Klärschlammverwertung im Verbund anzusetzende Rohschlammmenge wird in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Bemessungsgrundlage Klärschlammverwertung im Verbund

	m ³ /d	kg TS/EW·d	kg TS/m ³	kg TS/d	org. Anteil %	kg oTS/d
Primärschlamm	32,2	0,035	40	1.288	67	863
ÜS-Schlamm	36,2	0,038	60	2.173	70	1.521
Rohschlamm	70,6	0,073	49	3.461	69	2.384

Im Folgenden werden die einzelnen Anlagenteile der Klärschlammverwertung im Verbund bemessen.

Faulbehältervolumen für die Verbundverwertung

Der Rohschlammanfall beträgt bei dieser mittleren Belastung etwa 70,6 m³ pro Tag.

$$\begin{aligned} \text{Aufenthaltszeit} \quad t_{A,FB} &= 25 \text{ d} \\ \text{Förderstrom Rohschlamm} \quad Q_{RoS} &= 70,6 \text{ m}^3/\text{d} \\ \text{Volumen Faulbehälter} \quad V_{FB} &= 1.765 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Durch die gewählte Aufenthaltszeit von 25 d sollen Belastungsspitzen und Ausbaureserven ausreichend berücksichtigt werden.

Faulschlammengen im Verbund

Der anaerobe Abbau des Rohschlammes bewirkt eine wesentliche Feststoffreduzierung. Etwa 50% der im Rohschlamm enthaltenen organischen Stoffe werden abgebaut.

$$\begin{aligned} 50\% \text{ Abbau oTS} &= 2.384 \text{ kg oTS} \cdot 50 \% &= 1.192 \text{ kg oTS/d} \\ \text{Faulschlamm} &= (3.461 \text{ kg TS} - 1.192 \text{ kg oTS/d}) &= 2.269 \text{ kg TS/d} \\ \text{TS-Gehalt} &= 2.269 \text{ kg TS} / 70,6 \text{ m}^3/\text{d} &= 3,22\% \text{ TS} \end{aligned}$$

Die Umsetzung der organischen Feststoffe führt dazu, dass der Faulschlamm dünner (3,22% TS) ist als der Rohschlamm (4,9% TS).

Faulgasproduktion im Verbund

Durch den Abbau der organischen Bestandteile (oTS) des Klärschlammes im Fermenter wird Klärgas gebildet, welches in Gasmotoren zur Strom- und Wärmeerzeugung verwertet werden kann.

Aus den Gärrestversuchen (siehe Anlage 1) wurde eine spezifische Faulgasproduktion der Mischprobe von $Y_{FG} = 320 \text{ l}_N/\text{kg oTS}_{zu}$ ermittelt. Für die Abschätzung der Gaserträge im Verbund werden die ermittelten spezifischen Gaserträge der Kläranlagen Löbejün und Landsberg mit der im Jahre 2019 dort anfallenden Überschussschlammengen multipliziert.

Daraus ergibt sich folgender täglicher zusätzlicher Klärgasanfall:

$$Q_{FG} = 814 \text{ m}^3/\text{d} + 42 \text{ m}^3/\text{d} + 77 \text{ m}^3/\text{d} = 933 \text{ m}^3/\text{d}$$

Gewählte Ausbaugröße: $1.000 \text{ m}^3/\text{d}$

Gasspeicher im Verbund

Da die Klärgasproduktion starken Schwankungen unterlegen ist, wird zur Zwischenspeicherung bzw. zum Mengenausgleich des anfallenden Klärgases ein Gasspeicher benötigt. Dadurch wird überschüssiges Faulgas in Zeiten von Spitzenproduktionen aufgefangen und kann somit zur späteren Verwertung wieder abgegeben werden.

Da moderne Gasmotoren und -turbinen modulierend betrieben werden können, kann das Speichervolumen relativ klein und damit preisgünstig bemessen werden. Es wird ein Klärgasspeicher von ca. 30 % des täglichen Gasanfalls von 1.000 m^3 pro Tag als ausreichend erachtet.

$$V_{Sp} = 1.000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 30\% = 300 \text{ m}^3$$

Gasfackel im Verbund

Die Gasfackel dient als Sicherheitseinrichtung und muss die Gasproduktion im Falle des Ausfalls der normalen Gasverwertung sicher abführen können.

$$Q_{Fackel} = (1.000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 1,5) / 24 \text{ h/d} = 62,5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Blockheizkraftwerk im Verbund

Zur Wärmebereitstellung kommt ein innovatives Blockheizkraftwerk mit Mikro-Gasturbine zum Einsatz. Durch eine maximale Brennstoffleistung von etwa 220 kW und die Möglichkeit auf modularen Betrieb soll flexibel und schnell auf den Strom- und Wärmebedarf reagiert werden können.

spezifischer Heizwert von Klärgas $\approx 6,4 \text{ kWh/m}^3$

$$P_{ges} = (933 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 6,4 \text{ kWh/m}^3) / 24 \text{ h/d} = 249 \text{ kW}$$

Wirkungsgrad thermisch $\eta_{th} = 56,4 \%$

(Abgas-Wasser-Wärmetauscher bei 60°C Rücklauf / 80°C Vorlauf)

$$P_{th} = 249 \text{ kW} \cdot 0,564 = 140 \text{ kW}_{th}$$

Wirkungsgrad elektrisch $\eta_{el} = 27 \%$

(inklusive externer Verdichter)

$$P_{el} = 286 \text{ kW} \cdot 0,27 = 67 \text{ kW}_{el}$$

Mit einer gewählten Anlagengröße von 2 x 50 kW_{el} kann eine Jahresstrommenge W_{el_BHKW} von 588.462 kWh/a und einer Jahreswärmemenge Q_{th_BHKW} von 1.229.231 kWh/a erzeugt werden.

Wärme- und Energiebilanz

Für den spezifische Energieverbrauch einer anaerob-mesophilen Stabilisierung werden nach DWA-A 368 je nach Durchmischungssystem des Faulturms verschiedene Leistungsdichten angegeben. Mit dem gewählten spezifischen Verbrauchswerten 1,95 kWh_{el}/m³ und 27 kWh_{th}/m³ ergeben sich bei einer zugeführten Rohschlammmenge 70,6 m³/d folgende Bedarfe und Bilanzüberschüsse:

Tabelle 25: Energiebedarfe und Überschüsse der Faulung in der Verbundverwertung

	Bedarf Faulturn Jahressumme [kWh/a]	Erzeugung BHKW Jahressumme [kWh/a]	Überschuss [kWh/a]
Strombilanz, W_{el}	50.279	588.462	538.183
Wärmebilanz, Q_{th}	696.165	1.229.231	533.066

6.4.2 Kostenschätzungen Verbundverwertung von Klärschlamm

Investitionskosten

Die Kostenschätzung für die Bautechnik der anaeroben Klärschlammstabilisierung berücksichtigt analog zu den Randbedingungen in Kapitel 6.1.2 folgende maßgebende Kostenfaktoren -

- Vorklärbecken mit Primärschlammumpwerk
- Zwischenpumpwerk
- Faulbehälter
- Maschinengebäude (maschinelle Voreindickung des Überschussschlammes)

- Schlammvorlagebehälter
- Gasspeicher mit Gasfackel
- Blockheizkraftwerk.

Tabelle 26: Kostenschätzung Faulung im Verbund

Klärschlammverwertung im Verbund	Gesamt
Bemessungsgröße (Schlammseitig)	55.800 EW
Vorklärbecken	322.000 €
Kompaktfaulbehälter	1.030.000 €
Gasaufbereitung und Gasverwertung	869.000 €
Sonstige Bauwerke	415.000 €
Zwischensumme Bau	2.636.000 €
zzgl. Baunebenkosten; Ansatz 15%	659.400 €
Gesamt, netto	3.295.000 €
zzgl. 19% MwSt.	626.050 €
Summe, brutto	3.921.050 €

Kapitalkosten

Die Kapitalkosten berechnen sich aus den Investitionskosten multipliziert mit den Kapitalwiedergewinnungsfaktoren (KFAKR). Diese werden in Abhängigkeit der Nutzungsdauer (n in Jahren) der jeweiligen Anlagenteile sowie des Zinssatzes (i) wie folgt ermittelt:

$$\text{KFAKR}(i; n) = i \cdot \frac{(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Tabelle 27: Kapitalkosten der Verfahrensumstellung auf Faulung

	n	i	KFAKR	brutto (19% MwSt.)
Bauwerke, Verkehrsflächen	40	2,0 %	0,036556	57.650 €/a
Maschinenteknik, EMSR	20	2,0 %	0,061157	143.352 €/a
Summe Kapitalkosten				201.002 €/a

Die Kapitalkosten der Klärschlammverwertung im Verbund betragen 201.002 €/a.

Betriebskosteneinsparungen

Durch Umstellung der Verfahrensführung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung wird eine Reduzierung der laufenden Kosten erreicht. Diese ergibt sich aus der Stromeinsparung durch geringere Belüftungsenergie in der biologischen Reinigungsstufe, der Eigenstromerzeugung aus der Verwertung des Faulgases sowie der Reduzierung der zu entsorgenden Schlammengen aufgrund des weitergehenden Abbaus an organischer Substanz sowie der verbesserten Entwässerungseigenschaften.

Im Vergleich zur dezentralen Verwertung sind geringfügig höhere Betriebskosten für Wartung und Instandhaltung der größeren Bauwerke und Anlagen sowie zusätzliche Kosten für die Rohschlammtransporte zu berücksichtigen.

Stromkosten Faulgasverstromung im Verbund

Der aus Faulgas erzeugte Strom soll nach Möglichkeit direkt selbst genutzt werden. Aus der Strombilanz für die Faulung geht ein Überschuss zur Deckung des Eigenbedarfs der Kläranlage hervor. Dieser Wert wird mit dem aktuell üblichen Strombezugspreis multipliziert, um den Betrag für die jährliche Stromkosteneinsparung zu erhalten:

$$538.183 \text{ kWh/a} \cdot 0,2233 \text{ €/kWh} = 119.638 \text{ €/a}$$

Gemäß KWK-Gesetz 2017 erhält der Betreiber für eine 100 kW Anlage einen spezifische Fördersatz von 3,5 ct/kWh. Bei einer erzeugten elektrischen Arbeit von 588.462 kWh/a entspricht dies 20.596 €/a. Der Förderzeitraum beträgt dabei 30.000 Vollbenutzungsstunden. Dies entspricht bei jährlich 8.000 Betriebsstunden 3,75 Jahre. Die gesamte Fördersumme beträgt demnach 77.236 €. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird der Fördersatz auf die angenommene Lebensdauer der Anlage von 10 Jahre verteilt und somit mit einer zusätzlichen Einsparung von 7.420 €/a gerechnet.

Die betrachtete Stromkosteneinsparung durch die Faulgasverstromung beträgt damit 127.362 €/a.

Stromkosten Belebung

Die Kosteneinsparung in der Belebung auf der zentralen Kläranlage Pfützthal beträgt wie in Kapitel 6.1.2 aufgeführt $356.626 \text{ kWh/a} \cdot 0,2233 \text{ €/kWh} = 79.278 \text{ €/a}$. Dies kann für die weitere Betrachtung unverändert angenommen werden.

Auf den dezentralen Kläranlagen (ohne Faulung) Landsberg und Lobejün entstehen ebenfalls Stromeinsparungen beim Betrieb der Belüftung in Höhe von etwa 133.000 kWh/a. Dies entspricht einer zusätzlich zu betrachtenden Stromkosteneinsparung von 29.5660 €/a.

Personalkosten

Der Arbeitszeitbedarf wird mit 15 h/Woche und einem Stundenverrechnungssatz von 30,00 €/h berücksichtigt. Es ergeben sich Personalkosten in Höhe von 23.400 €/a.

Instandhaltung Klärschlammfaulung im Verbund

Für die Wartung und Instandhaltung der neuen Anlagenstufen wurde ein jährlicher Pauschalansatz von 0,25 % der Investitionskosten für den baulichen Teil und von 0,50 % der Investitionskosten für die Ausrüstung angesetzt. Es ergeben sich Instandhaltungskosten in Höhe von 12.600 €/a.

Transport- und Entsorgungskosten Verbund

Durch den weitergehenden Abbau der organischen Feststoffe im Verlauf der Faulung reduzieren sich die zu entwässernden bzw. anschließend zu entsorgenden Schlamm-mengen. Entscheidend ist jedoch die bessere Entwässerbarkeit der ausgefaulten Schlämme im Vergleich zu den aerob stabilisierten Schlämmen. Verantwortlich dafür ist der geringere organische Anteil (niedrigerer Glühverlust) nach der Faulung (DWA M-368).

Für die Ermittlung der zu entwässernden bzw. zu entsorgenden Schlamm-mengen wird davon ausgegangen, dass aus dem höheren oTS-Abbau in der Faulungsanlage eine um 10 g/(E·d) geringere Feststofffracht resultiert. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass bei der maschinellen Entwässerung höhere Feststoffgehalte (28 - 30 % anstelle von 20 - 22 %) erreicht werden.

Die spezifischen Entsorgungskosten wurden mit 65,45 €/t entwässertem Schlamm (spezifischer Preis für die bisherige Entsorgung beim Kompostwerk im Jahr 2019) eingerechnet.

Die Schlamm-menge reduziert sich bei Einsatz einer Faulung um ca. 30 %, was sich insgesamt positiv auf die anfallenden Entsorgungskosten auswirkt.

Entsorgungskosten Klärschlamm (bisher):	215.887 €/a
Entsorgungskosten Verbundverwertung (neu):	133.954 €/a
Einsparungen Entsorgungskosten:	81.993 €/a

Zusätzliche Kosten entstehen durch den Rohschlammtransport von den dezentralen Anlagen auf die Kläranlage Pfützthal. Hier müssen jährlich etwa 4.717 t eingedickter Überschussschlamm befördert werden. Bei spezifischen Kosten von etwa 180 €/t TS ergeben sich 48.340 €/a zusätzliche Transportkosten. In Summe beträgt die Einsparung der Transport- und Entsorgungskosten im Verbund damit 33.593 €/a.

Zusammenstellung der Betriebskosten

In der nachfolgenden Tabelle werden die einzelnen Positionen der Betriebskosten nochmals aufgeführt und abschließend zusammengefasst:

Tabelle 28: Betriebskosten Verbundverwertung

Kostenpunkt	Gesamt in €/a, brutto
Einsparungen	
Stromkosten	236.206
Transport- und Entsorgung	33.593
Summe	269.799
Aufwendungen	
Personalkosten	31.200
Instandhaltung	12.600
Summe	43.800

Durch die Umstellung auf die anaerobe Klärschlammstabilisierung können jährlich Betriebskosten in Höhe von etwa 225.999 €/a eingespart werden.

Kosten-Nutzen-Verhältnis der Verbundverwertung von Klärschlamm

Tabelle 29: Kostengegenüberstellung Verbundverwertung von Klärschlamm

	Jahreskosten	Kosteneinsparungen
Errichtung anaerobe Stufe	244.802 €/a	269.799 €/a
Kosten-Nutzen-Verhältnis	0,91 < 1	

Die abgeschätzten Jahreskosten liegen unter den Kosteneinsparungen. Damit wäre die Maßnahme als Wirtschaftlichkeit zu prognostizieren. Jedoch sind in der Betriebskostenbetrachtung die jährlichen Steigerungen der Energie- und Entsorgungskosten nicht berücksichtigt. Zukünftige Marktsituationen insbesondere in Hinblick auf die Entsorgungskosten könnten die Umstellung auf die Klärschlammverwertung im Verbund als weitaus wirtschaftlicher ausweisen.

6.4.3 Klimaschutztechnische Potenziale Verbundverwertung von Klärschlamm

Effekte auf den dezentralen Kläranlagen (ohne Faulung)

Durch die Herabsetzung des Schlammalters in den Belebungsbecken wird der Strombedarf der Belüftung im Vergleich zur aeroben Schlammstabilisierung gesenkt. Die Energieeinsparung für die Belüftung auf den dezentralen Anlagen wird entsprechend der Kennzahlen (Richtwerte) in Kapitel 4.7 mit 20% angesetzt. Für die Kläranlagen Landsberg (10.000 EW) und Lobejün (9.000 EW) bedeutet dies eine jährliche Stromeinsparung von etwa 133.000 kWh.

Effekte auf der zentralen Kläranlage (mit Faulung)

Durch die Faulgasverstromung des gelieferten Klärschlammes werden zusätzlich jährlich etwa 74.997 kWh/a erzeugt. Der Eigenbedarf für den Faulturm und Schlamm-pumpen wird mit 11.275 kWh/a abgeschätzt.

In Summe können 289.004 kWh/a eingespart werden.. Dies entspricht umgerechnet 155.195 kgCO₂e/a.

Effekte durch neu entstehendes Transportaufkommen

Der jährliche Kraftstoffverbrauch durch die Überschussschlammtransporte von 4.717 t/a beträgt 2.340 Liter Diesel. Zum Transportaufkommen hinzu kommen 569 Liter Diesel für die Faulschlammtransporte von der Kläranlage Pfützthal zur Entsorgung. In Summe entsteht ein Dieselverbrauch pro Jahr von 2.909 Liter.

Im Vergleich zur dezentralen Verwertung (Ist-Stand) werden 1.379 Liter pro Jahr mehr verbraucht. Mit dem Umrechnungsfaktor von 2,97 kg CO₂ pro Liter Diesel ergeben sich Emissionen in Höhe von 4.096 kg CO₂.

CO₂-Einsparung der Verbundverwertung

Die oben genannten Effekte berücksichtigt, ergibt sich in Summe eine zusätzliche CO₂-Einsparung von 101.553 kg CO₂ pro Jahr für die Verbundverwertung von Klärschlamm.

Auf Basis von Kapitel 6.1.3 Klimaschutztechnische Potenziale der anaeroben Stufe ergibt sich mit den oben aufgeführten zusätzlichen Effekten eine Gesamteinsparung von 547.837 kg CO₂-Äquivalenten pro Jahr.

6.5 Integration energiearme Verfahrenstechnik im Rahmen der Stickstoffelimination (Modul 5)

Bei Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung ist durch den weitgehenden Umsatz der organischen Substanz die stoffliche Rückbelastung aus der Schlammbehandlung auf den Abwasserreinigungsprozess teilweise erheblich. Die Abwasserreinigung ist üblicherweise einer Rückbelastung durch Stickstoff, Phosphor und Kohlenstoff ausgesetzt. Vor allem werden die Prozesse der Stickstoffelimination beeinflusst. Die Stickstoffrückbelastung aus der Schlammbehandlung von kommunalen Kläranlagen wird mit ca. 1,5 g N/(E·d) bzw. 15 % bis 25 % bezogen auf den Gesamtstickstoff im Zulauf angegeben [10] und das Nährstoffverhältnis des Schlammwassers ist gekennzeichnet durch ein ungünstiges C/N-Verhältnis mit einer 10-bis 20-fach höheren Stickstoffkonzentration gegenüber dem kommunalen Abwasser.

Durch eine weitergehende Eindickung der Schlämme und Erhöhung des Trockenrückstands wird die Ammoniumkonzentration im Schlammwasser ebenfalls erhöht [10]. Auch bei der Zugabe von Fremdschlämmen ist mit einer deutlichen Erhöhung der stofflichen Rückbelastung zu rechnen.

Durch den gezielten Stickstoffabbau in der Prozesswasserbehandlung und die dadurch resultierenden günstigeren C/N-Verhältnisse könnte in vielen Fällen der Primärschlammabzug erhöht, auf die Zugabe von Kohlenstoffquellen verzichtet und unter Umständen das Belebungsbeckenvolumen verkleinert werden. In der kommunalen Abwasserbehandlung werden bevorzugt biologische Verfahren zur Stickstoffelimination eingesetzt.

Im Hauptstrom von kommunalen Kläranlagen ist in unterschiedlichen Kombinationen das bekannte Verfahren der Nitrifikation und Denitrifikation umgesetzt. Das weniger bekannte Verfahren der Nitritation und Denitritation zeichnet sich durch einen geringeren Sauerstoffbedarf und dadurch energetische Vorteile aus. Das Deammonifikationsverfahren verspricht einen noch deutlich geringeren Energie- und Kohlenstoffverbrauch, was eine technische Umsetzung dieses Verfahrens interessant macht. Die Deammonifikation besteht aus einer partiellen Nitritation und der anaeroben Ammoniumoxidation. Beides sind autotrophe Prozesse. In Tabelle 30 sind die unterschiedlichen Prozessschritte der biologischen Stickstoffelimination zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 30: Prozessschritte der biologischen Stickstoffelimination [10]

Art der biologischen Stickstoffelimination	Prozessschritte
Nitrifikation/Denitrifikation	$NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^- \rightarrow N_2$
Nitritation/Denitritation	$NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow N_2$
Deammonifikation	$NH_4^+ \rightarrow NO_2^- + NH_4^+ \rightarrow N_2$

Die Deammonifikation hat sich in der Vergangenheit bei der Prozess- bzw. Schlammwasserbehandlung etabliert. Sie wird meist getrennt vom Hauptstrom der Kläranlage durchgeführt, d.h. sie findet im Nebenstrom bzw. Teilstrom statt. Bei dieser Verfahrenswahl wird Belüftungsenergie eingespart und es kann in vielen Fällen auf die Zugabe externer C-Quellen verzichtet werden, was zu einer Einsparung von Betriebskosten führt.

Zur Prozesswasserbehandlung wird die Deammonifikation erfolgreich bei hohen Temperaturen um die 40°C eingesetzt. Hingegen wird die Deammonifikation im Hauptstrom bei geringeren Temperaturen derzeit hauptsächlich in Labor- und Pilotversuchen erprobt. Es ist zu klären, bei welchen Abwassertemperaturen und Nährstoffverhältnissen der Prozess noch sicher beherrschbar ist, wie die Nitrifikation im Hauptstrom unterdrückt werden kann, wie hoch die Lachgasemissionen beim Verfahren sind und ob die gewünschten Ablaufkonzentrationen eingehalten werden können. Vor allem der Temperaturbereich für eine technische Nutzung im Hauptstrom ist noch nicht abschließend bestimmt. Bei der Deammonifikation handelt es sich um ein Verfahren, welches zwei autotrophe Abbauprozesse kombiniert. Im ersten Prozessschritt wird etwa die Hälfte des Ammoniums zu Nitrit oxidiert. Dabei handelt es sich um eine partielle Nitrifikation von autotrophen, Ammonium oxidierenden Bakterien. Im zweiten Teilschritt wird das gebildete Nitrit zusammen mit dem verbliebenen Ammonium unter anoxischen Bedingungen durch Anammox-Bakterien direkt zu molekularem Stickstoff umgesetzt. Diese chemolithotrophe Planctomyceten sind ebenfalls autotroph.

Bei der Deammonifikation kann fast 60% des Sauerstoffs im Vergleich zur Nitrifikation/Denitrifikation eingespart werden. Dies liegt daran, dass das benötigte Verhältnis der beiden Substrate von $\text{NO}_2\text{-N}$ zu $\text{NH}_4\text{-N}$ von 1,3 zu 1 dazu führt, dass nur 56,5% Ammonium zu Nitrit umgewandelt werden müssen und bei der Nitrifikation ohnehin lediglich 75% des Sauerstoffs, im Vergleich zur Nitrifikation, benötigt wird. Dadurch ergibt sich ein theoretischer Energieverbrauch für die Elimination von Stickstoff in Höhe von etwa 0,8-1,3 kWh/kg N. Bei weniger günstigen Verhältnissen im großtechnischen Betrieb liegt der tatsächliche Energieverbrauch jedoch höher. Außerdem ist wesentlich, dass bei beiden autotrophen Reaktionsschritten der Deammonifikation der Bedarf an organischem Kohlenstoff gleich null ist. Eine vollständige Stickstoffentfernung mit Hilfe der Deammonifikation ist jedoch nicht möglich, da immer eine kleine Menge Nitrat mitproduziert wird.

Abschätzung der Gesamtjahreskosten:

Die Investitionskosten einer Deammonifikationsanlage im Nebenstrom bestehend aus

- Maschinentechnische Ausrüstung
- Rohrleitungsbau
- EMSR-technische Ausrüstung

werden auf Grundlage von Betriebserfahrungen in der Kommunalen Abwasserbehandlung [11] mit 520.625 € brutto abgeschätzt.

Tabelle 31: Investitionskosten Deammonifikation

Deammonifikation	EP	GP
Deammonifikationsanlage	350.000 €	350.000 €
Baunebenkosten 25%		87.500 €
Zwischensumme		437.500 €
zzgl. MwSt. 19%		83.125 €
Summe		520.625 €

Die entsprechenden Kapitalkosten betragen 25.472 €/a und berechnen sich aus den Investitionskosten multipliziert mit den Kapitalwiedergewinnungsfaktoren (KFAKR). Diese werden in Abhängigkeit der Nutzungsdauer (n in Jahren) der jeweiligen Anlagenteile sowie des Zinssatzes (i) wie folgt ermittelt:

$$\text{KFAKR}(i; n) = i \cdot \frac{(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

Tabelle 32: Kapitalkosten der Deammonifikation

	n	i	KFAKR	brutto (19% MwSt.)
Summe der Kapitalkosten	20	2,0 %	0,061157	31.840 €/a

Für die Jahresbetriebskosten werden die aus den Betriebserfahrungen in [11] ermittelten N-spezifischen Kosten verwendet. In Tabelle 33 werden die Jahresbetriebskosten dargestellt. Diese ergeben sich entsprechend der jährlich zu eliminierenden Stickstofffracht von 63.510 kg/a zu 20.323 €/a.

Tabelle 33: Effektive Jahresbetriebskosten und N-spezifischen Kosten [11]

Kostenfaktor	Jahreskosten KA Pfützthal [€/a]	N-spezifische Kosten* [€/kg N]
Personal	9.527	0,15
Energie	8.256	0,13
Laborbedarf	1.905	0,03
Summe	20.323	0,32

*(bezogen auf eliminierte NH₄-N-Fracht)

Die Gesamtjahreskosten ergeben sich damit zu 52.163 €.

Energieeinsparungen

Durch den Einsatz einer Deammonifikationsanlage können etwa 3,00 kWh/kg N eingespart werden. Bei einer Fracht von 174 kg/d (Tagesmittelwert KA Pfützthal 2019) könnten 190.530 kWh/a bzw. 42.545 €/a bei einem Strompreis von 0,2233 €/kWh eingespart werden.

Kosten-Nutzen-Verhältnis der Deammonifikation

Tabelle 34: Kostengegenüberstellung Deammonifikation

	Jahres- bzw. Kapitalkosten	Kosteneinsparungen
Errichtung anaerobe Stufe	52.163 €/a	42.545 €/a
Kosten-Nutzen-Verhältnis	1,23 > 1	

Die abgeschätzten Jahreskosten liegen über den Kosteneinsparungen. Somit ist diese Maßnahme als unwirtschaftlich einzustufen.

Klimaschutztechnische Potenziale

Die eingesparte Strommenge von 190.530 kWh/a entspricht einer eingesparten THG-Emission durch Fremdstrombezug von:

$$190.530 \text{ kWh/a} \cdot 0,537 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh} = 102.314 \text{ kg CO}_2\text{e/a}$$

6.6 Potenzielle Beabsichtigte Planungen

6.6.1 Photovoltaikanlage

Durch die Installation von PV-Modulen auf dem Kläranlagengelände kann Strom zum Eigenverbrauch erzeugt werden. Vorgesehen ist folgende Verteilung:

Standort	Anzahl Module	Leistung	Jährliche Erzeugung
Garage	156	43,76 kWp	45.729 kWh/a
Kabelbrücke	45	12,62 kWp	13.188 kWh/a
Gebälsestation	40	11,20 kWp	11.704 kWh/a

Die Investitionskosten werden mit 146.250 € brutto abgeschätzt. Die Jahreskosten belaufen sich damit auf 8.944 €/a (KAFKR ($i=2\%$, $n=20$)).

Mit der Anlagengröße von 68 kWp können bei jährlich angesetzten Volllaststunden von 1045 h etwa 70.621 kWh Strom erzeugt werden. Dies entspricht eingesparten THG-Emissionen durch Fremdstrombezug von 37.924 kg CO₂/a. Die Stromkosteneinsparung wird bei einem Strompreis von 0,2233 €/kWh auf 15.770 €/a abgeschätzt.

Tabelle 35: Kostengegenüberstellung Photovoltaikanlage

	Jahres- bzw. Kapitalkosten	Kosteneinsparungen
Errichtung anaerobe Stufe	8.944 €/a	15.770 €/a
Kosten-Nutzen-Verhältnis	0,57 < 1	

Das Kosten-/Nutzen-Verhältnis ist kleiner als 1 und daher als wirtschaftlich zu bewerten. Es werden keine Mehraufwände für Unterhaltungs- und Wartungskosten betrachtet.

6.6.2 Wärmepumpe

Durch die Abwärmenutzung der Gebläse mit Hilfe einer elektrischen Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von max. 50 kWth / 20 kWel können die Wärmebedarfe zum Beheizen von Garagen und des Verwaltungsgebäudes abgedeckt werden. Die Wärmeerzeugung für die Beheizung des Betriebsgebäudes erfolgt aktuell noch mit Heizöl über einen Heizölkessel. Der Heizölverbrauch beträgt jährlich etwa 3.000 l. Bei einem Heizwert von 9,8 kWh/l entspricht dies einem Wärmebedarf von etwa 29.400 kWh/a.

Der Heizenergiebedarf für die zu errichtende Garage kann bei einer Heizlast von 65 kWh/m²a für Hallenneubauten und etwa 600 m² Grundfläche zusätzlich mit 39.000 kWh/a abgeschätzt werden.

Durch den Einsatz der Wärmepumpe kann die gesamte dafür notwendige Heizölenergie von 68.400 kWh/a eingespart werden. Die Betriebskosteneinsparungen betragen bezüglich des Heizöls bei einem Heizölpreis von 0,07 €/kWh etwa 4.788 €/a brutto.

Die Stromkosten für einen derartigen Betrieb der Wärmepumpe bei einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von 3,8 betragen 18.000 kWh · 0,2233 €/kWh = 4.019 €.

Mit den CO₂-Äquivalenten von 0,325 kg CO₂ je kWh Heizöl und 0,187 kg CO₂ je kWh für die elektrische Luft-Wärmepumpe ergeben sich dadurch jährlich vermeidbare Emissionen von 9.439 kg CO₂e.

Die Investitionskosten können mit 30.000 € brutto abgeschätzt werden. Die Kapitalkosten belaufen sich somit auf 1.835 €/a. (KAFKR (i=2%, n=20)).

Tabelle 36: Kostengegenüberstellung Wärmepumpe

	Jahres- bzw. Kapitalkosten	Kosteneinsparungen
Errichtung anaerobe Stufe	4.895 €/a	4.788 €/a
Kosten-Nutzen-Verhältnis	1,22 > 1	

Das Kosten-/Nutzen-Verhältnis ist größer 1. Bei dieser Betrachtung wäre kein wirtschaftlicher Nutzen gegeben. Eine höhere Jahresarbeitszahl könnte hier jedoch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bedeuten.

7 Ableitung von Optimierungsmaßnahmen (Modulkombination)

7.1 Umsetzungsfahrplan

Vorstehend sind insgesamt 7 Maßnahmen benannt. Mit ihnen ist eine Energieeinsparung oder Steigerung der örtlichen Energieerzeugung möglich. Dadurch ließen sich die Lieferungen von Elektroenergie für den Klärwerksbetrieb verringern oder gänzlich vermeiden. Mit den Ergebnissen der Potenzialanalyse kann eine Priorisierung bzw. zeitliche Einteilung der Maßnahmen erfolgen. Eine Priorisierung basiert neben dem Energieeinsparpotenzial auch auf Wirtschaftlichkeit, Planungsaufwand, Genehmigung sowie weitere Randbedingungen (z. B. bereits vorliegende Planungen, lokale Gegebenheiten etc.).

Das Verhältnis aus Kosten und Nutzen (K / N) beschreibt die Wirtschaftlichkeit der Investition.

Dabei ist der sich ergebende Quotient wie folgt zu bewerten:

- $K / N < 1$: hohe Wirtschaftlichkeit
(je kleiner der Wert, desto größer die Rentabilität)
- $K / N = 1$: neutral
(kein klarer wirtschaftlicher Nutzen)
- $K / N > 1$: unwirtschaftlich
(je größer der Wert, desto unrentabler die Investition)

Die Maßnahmen wurden entsprechend Kapitel 2.1.2 in die drei Realisierungsphasen Sofortmaßnahmen (S), Kurzfristige Maßnahmen (K) und Abhängige Maßnahmen (A) zeitlich unterteilt.

Nach Tabelle 37 sind die Maßnahmen anhand der K/N-Verhältnisse wie folgt charakterisierbar.

Tabelle 37: Charakterisierung von Energiesparmaßnahmen [12]

Maßnahme	Charakterisierung	Realisierung
Sofortmaßnahme	Sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis (ca. $< 0,3$) Einfach umzusetzende Maßnahmen ohne größere Investition und Planungsaufwand, ziehen keine betrieblichen, abwassertechnischen, bauphysikalischen oder sonstigen Probleme nach sich	bis 2 Jahre
Kurzfristige Maßnahme	Gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis (ca. $0,3-0,7$) Maßnahmen, die in der Energieanalyse als wirtschaftlich und technisch machbar eingestuft werden und für eine kurzfristige Bearbeitung und Umsetzung vorgeschlagen werden, auch bei ohnehin vorgesehener energetischer Sanierung der Anlage durchzuführen	bis 5 Jahre
Abhängige Maßnahme	Schlechteres Kosten-Nutzen-Verhältnis (ca. $0,7-1$), Maßnahmen die wegen ungünstigem Kosten-Nutzenverhältnis oder anderen Abhängigkeiten nur im Rahmen von ohnehin fälligen Neu- oder Umbauten realisiert werden können	bis 10 Jahre

Tabelle 38 gibt einen Überblick über das überschlägige Kosten-Nutzen-Verhältnis der vorgeschlagenen Maßnahmen für sich. (Eine Übersicht und Bewertung aller in Kapitel 6 betrachteten Potenziale und Maßnahmen befindet sich in Anlage 2.)

Tabelle 38: Umsetzung von Maßnahmen

Nr.	Maßnahme	Energieeinsparung [kWh/a]	Investition [€] brutto	Jahresnutzen [€/a]	Jahreskosten [€/a]	K/N
S1	Energieeffiziente Antriebe bzw. Ansteuerungen	42.006	40.000	9.338	2.446	0,26
S2	Belüftung und Druckluftversorgung	389.046	493.106	86.847	30.157	0,35
K3	Photovoltaikanlage	70.621	146.250	15.770	8.944	0,57
A1	Verbundverwertung von Klärschlamm	599.335	3.921.050	269.799	244.802	0,91

Abbildung 5 fasst die Summen der Jahreskosten und Jahresnutzen der vorgeschlagenen Maßnahmen einzeln und in Kombination (S+K+A) zusammen.

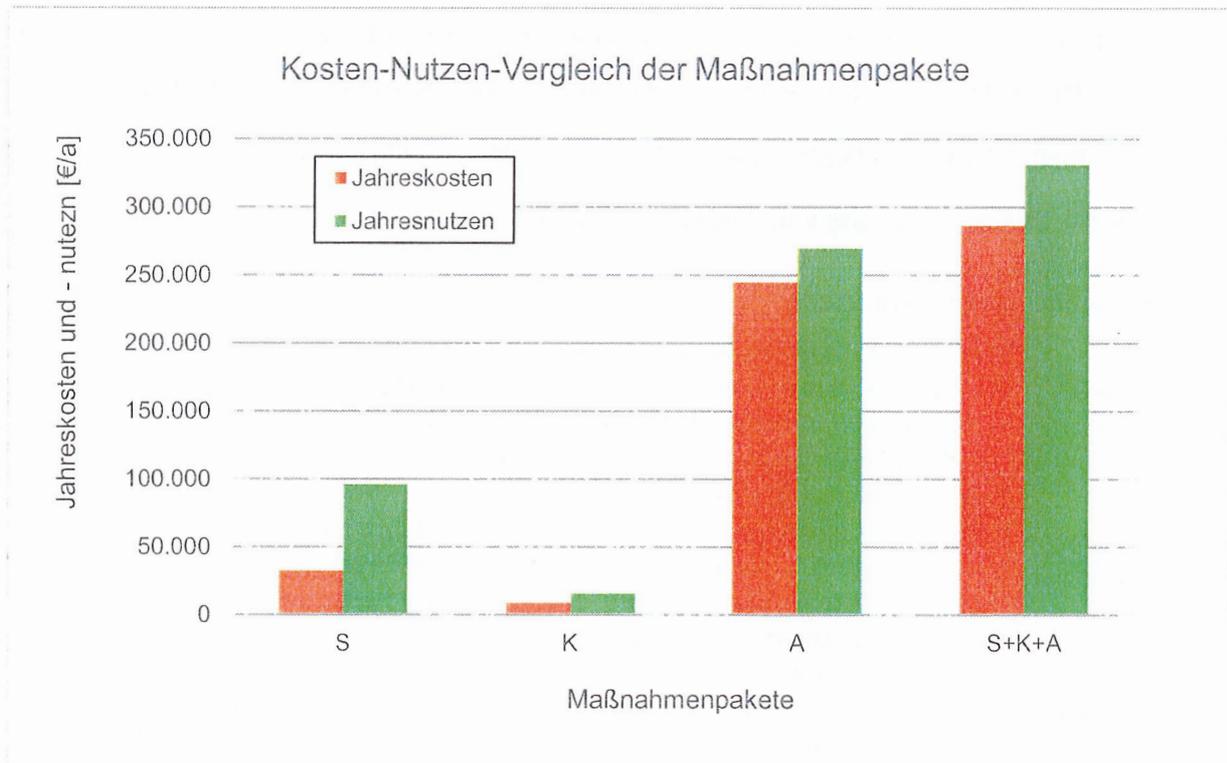


Abbildung 5: Summen der Jahreskosten und -nutzen der vorgeschlagenen Maßnahmen

7.2 Prüfung und Sicherstellung der Mindestziele

7.2.1 Deckungsquote des Energiebedarfs

Der elektrische Deckungsgrad der Anlage (Tabelle 39) beträgt nach Umsetzung der sofortigen und kurzfristigen Maßnahmen 6%. Nach zuzüglicher Umsetzung der abhängigen Maßnahmen 72%.

Tabelle 39: Deckungsquoten Strombedarf

Maßnahmenpaket	Deckungsquoten Strombedarf		
	Verbrauch	Erzeugung	Deckungsgrad
	[kWh/a]	[kWh/a]	[%]
IST-Stand 2020	1.398.821	-	0%
S - Maßnahmen	1.167.346	-	0%
S + K - Maßnahmen	1.096.725	70.621	6%
S + K + A - Maßnahmen	918.764	659.083	72%

Der thermische Deckungsgrad der Anlage (Tabelle 40) beträgt nach Umsetzung der abhängigen Maßnahmen 161%.

Tabelle 40: Deckungsquoten Wärmebedarf

Maßnahmenpaket	Deckungsquoten Wärmebedarf		
	Verbrauch	Erzeugung	Deckungsgrad
	[kWh/a]	[kWh/a]	[%]
IST-Stand 2020	68.400	0	0%
S - Maßnahmen	68.400	0	0%
S + K - Maßnahmen	68.400	0	0%
S + K + A - Maßnahmen	764.565	1.229.231	161%

7.2.2 Spezifischer jährlicher Strombedarf der gesamten Anlage

Bei Umsetzung der Maßnahmenpakete in Kombination ergeben sich folgende spezifische Strombedarfe:

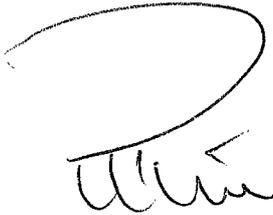
Tabelle 41: Spezifischer jährlicher Strombedarf

Maßnahmenpaket	Spezifischer jährlicher Strombedarf			
	Verbrauch	e_{ges}	Fremdbezug	$e_{ges,fremd}$
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh EW/a]	[kWh EW/a]
IST-Stand 2020	1.398.821	38,0	1.398.821	38,0
S - Maßnahmen	1.167.346	31,7	1.167.346	31,7
S + K - Maßnahmen	1.096.725	29,8	1.096.725	29,8
S + K + A - Maßnahmen	918.764	25,0	259.681	7,1

Entsprechend wird der (Fremdbezug-) Zielwert von 23 kWh/(EW/a) bei Umsetzung aller Maßnahmen erreicht.

aufgestellt:

Burgstädt, den 22.10.2020



Peter Philipp
Geschäftsführer



Raymond Kick
Projektingenieur

gesehen:

Gutenberg, den

.....

Stempel/Unterschrift

WAZV Saalkreis

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Bericht Laboruntersuchung - IFB Halle GmbH
- Anlage 2 Übersicht Entsorgungskosten
- Anlage 3 Einsparungen und Kosten der untersuchten Maßnahmen

Planverzeichnis

Plan 1	Übersichtslageplan	Maßstab 1:10.000
Plan 2	Lageplan	Maßstab 1:250

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablaufschema einer Energieanalyse.....	10
Abbildung 2: Anteile am Gesamtstromverbrauch.....	21
Abbildung 3: Bewertung des spezifischen Stromverbrauchs mittels Summenhäufigkeit.....	23
Abbildung 4: Bewertung des spezifischen Stromverbrauchs für die Belüftung der Belebung.....	24
Abbildung 5: Summen der Jahreskosten und -nutzen der vorgeschlagenen Maßnahmen.....	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennwerte des Energiechecks [2].....	7
Tabelle 2: Messsonden Kläranlage Pfützthal.....	16
Tabelle 3: Nennleistungen der wesentlichen Energieverbraucher	19
Tabelle 4: Zusammenstellung der Stromverbräuche der Aggregate (Jahr 2019).....	21
Tabelle 5: Vergleich der aktuellen energetischen Situation mit den Zielwerten.....	22
Tabelle 6: Kennzahlenermittlung	25
Tabelle 7: Kennzahlenvergleich zum spezifischen Stromverbrauch mit Richt- und Idealwert	26
Tabelle 8: Hauptverbraucher im Vergleich mit den Idealwerten.....	27
Tabelle 9: Auszug aus den Ergebnissen der Gärversuche - Spezifische Gasbildung	28
Tabelle 10: Vor- und Nachteile von Stabilisierungsvarianten.....	30
Tabelle 11: Bemessungsgrundlage Schlammfäulung	31
Tabelle 12: Energieverbrauch der anaerob-mesophilen Stabilisierung je m ³ Rohschlamm [7]...	33
Tabelle 13: Energiebedarfe und Überschüsse der Fäulung.....	34
Tabelle 14: Rückbelastung aus der Schlammbehandlung im Verhältnis zur Zulauffracht [9]	35
Tabelle 15: Kostenschätzung Fäulung im Verbund	36
Tabelle 16: Kapitalkosten der Verfahrensumstellung auf Fäulung	37
Tabelle 17: Betriebskosten Fäulung KA Pfützthal.....	39
Tabelle 18: Kostengegenüberstellung anaerobe Stufe	40
Tabelle 19: Kostengegenüberstellung Energieeffiziente Antriebe.....	41
Tabelle 20: Kostenschätzung Austausch Beckenbelüftung	43
Tabelle 21: Kostenschätzung Austausch Gebläse.....	43
Tabelle 22: Kostengegenüberstellung Erneuerung Belüftung und Druckluftversorgung.....	44
Tabelle 23: Klärschlamm-mengen der dezentralen Verbundanlagen.....	46
Tabelle 24: Bemessungsgrundlage Klärschlammverwertung im Verbund	47
Tabelle 25: Energiebedarfe und Überschüsse der Fäulung in der Verbundverwertung	49
Tabelle 26: Kostenschätzung Fäulung im Verbund	50

Tabelle 27: Kapitalkosten der Verfahrensumstellung auf Faulung	50
Tabelle 28: Betriebskosten Verbundverwertung	53
Tabelle 29: Kostengegenüberstellung Verbundverwertung von Klärschlamm	53
Tabelle 30: Prozessschritte der biologischen Stickstoffelimination [10]	55
Tabelle 31: Investitionskosten Deammonifikation	57
Tabelle 32: Kapitalkosten der Deammonifikation	57
Tabelle 33: Effektive Jahresbetriebskosten und N-spezifischen Kosten [11]	58
Tabelle 34: Kostengegenüberstellung Deammonifikation	58
Tabelle 35: Kostengegenüberstellung Photovoltaikanlage	59
Tabelle 36: Kostengegenüberstellung Wärmepumpe	60
Tabelle 37: Charakterisierung von Energiesparmaßnahmen [12]	61
Tabelle 38: Umsetzung von Maßnahmen	62
Tabelle 39: Deckungsquoten Strombedarf	63
Tabelle 40: Deckungsquoten Wärmebedarf	63
Tabelle 41: Spezifischer jährlicher Strombedarf	64

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Einheit	Erläuterung
A	m ²	Fläche
CO ₂ e	kg CO ₂	CO ₂ -Äquivalent
E	kWh	Energiebedarf/-erzeugung
E _{Bel}	kWh/a	Stromverbrauch Belüftung im Belebungsbecken
E _{el}	kWh	Energiebedarf/-erzeugung, elektrisch
E _{ges}	kWh/a	Stromverbrauch gesamt
E _{th}	kWh/a	Thermische Energie
E _{th,ext}	kWh/a	Extern zugeführte Energie zur Wärmeversorgung (fossile Brennstoffe)
EW _{CSB}	E	Einwohnerwert (EW = EZ + EGW) bezogen auf den CSB mit einer spezifischen Belastung von 120 g/(E·d)
e _{Bel}	kWh/(E·a)	Spezifischer Stromverbrauch der Belüftung im Belebungsbecken
e _{FG}	l/(E·d)	Einwohnerspezifische Faulgasproduktion
e _{ges}	kWh/(E·a)	Spezifischer Gesamtstromverbrauch
e _{PW}	Wh/(m ³ ·m)	Spezifischer Stromverbrauch für Pumpwerke (PW)
e _{spez}	kWh/m ³ kWh/(E·a)	Spezifischer Energieverbrauch bezogen auf die maßgebende Einflussgröße
GV	%	Glühverlust von getrocknetem Schlamm
H _i	kWh/kg	Heizwert; „i“ von inferior, früher unterer Heizwert H _u
h _{man}	m	Manometrische Förderhöhe
h _v	m	Verlusthöhe durch Reibung in Leitung, Formstücken, Armaturen, Messung etc.
P _{el}	kW	Elektrische Wirkleistung
P _{Nenn}	kW	Elektrische Nennleistung
P _{th}	kW	Thermische Wirkleistung
Q	m ³ /a; m ³ /d	Volumenstrom
Q _{FG}	m ³ /d	Jahresmittelwert des Faulgasanfalls bei Normbedingungen
Q _{Fackel}	m ³ /h	Volumenstrom Gasfackel
Q _{PW}	m ³ /a	Fördermenge Pumpwerk
Q _{RoS}	m ³ /d	Jahresmittelwert der Fördermenge Rohschlamm
Q _{th}	kWh	Wärmebedarf
Q _{th,BHKW}	kWh	Wärmebedarf des Blockheizkraftwerks

q_{th}	kWh/(m ² ·a)	Spezifischer Wärmebedarf
TS	%	Trockensubstanz bestimmt als Verhältnis der Trockenmasse zur Ausgangsmasse einer Probe
TS	g/l	Konzentration der Trockensubstanz (Filterrückstand)
oTS_{zu}	kg/d	Zugeführte organische Trockensubstanz (Massenstrom)
oTS	%	Organischer Trockenrückstand, bestimmt als Verhältnis der organischen Trockenmasse zur Ausgangsmasse einer Probe ($oTS = TS \cdot GV$)
t	h	Laufzeit
$t_{A,FB}$	d	Aufenthaltszeit im Faulbehälter (in Tagen)
$t_{Betrieb}$	h	Betriebsstunden
t_{TS}	d	Schlammalter (in Tagen)
$t_{A,VK}$	h	Aufenthaltszeit in der Vorklärung
V	m ³	Volumen
V_{Sp}	m ³	Volumen Gasspeicher
W_{el}	kWh	Elektrische Wirkarbeit
$W_{el,BHKW}$	kWh	Elektrische Wirkarbeit des Blockheizkraftwerks
Y_{FG}	l/kg	Spezifische Faulgasproduktion bezogen auf die organische Trockenmasse
η_{el}	1	Elektrischer Wirkungsgrad
η_{ges}	1	Wirkungsgrad gesamt
η_{th}	1	Thermischer Wirkungsgrad

Literaturverzeichnis

- [1] Wasser- und Abwasserzweckverband Saalkreis, „Eigenüberwachung Jahresübersicht 2019,“ Pfützthal, 2020.
- [2] DWA-Regelwerk, „Arbeitsblatt DWA-A 216,“ DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, Dezember 2015.
- [3] B. Goeke, „Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld „Kommunalrichtlinie“,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin, Januar 2020.
- [4] Projektträger Jülich (PtJ) Forschungszentrum Jülich GmbH, „Formular Vorhabenbeschreibung für den Förderschwerpunkt 2.6.3 Potenzialstudie Abwasserbehandlungsanlage,“ Berlin, 2019.
- [5] H. Ott, Explosionsschutzdokument Kläranlage Pfützthal einschließlich Kanalnetz des Abwasserzweckverband Salza, AZV Salza, August 2009.
- [6] Wasser- und Abwasserzweckverband Saalkreis, „Jahresrechnung Netzbetreiber Januar 2019 - Dezember 2019,“ enviaM, Petersberg, 2020.
- [7] J. Pinnekamp, M. Schröder, F.-W. Bolle, E. Gramlich, S. Gredigk-Hoffmann, S. Koenen, M. Loderhose, S. Miethig, K. Ooms, H. Riße, G. Seibert-Erling, M. Schmitz und B. Wöffen, Energie in Abwasseranlagen Handbuch NRW, Düsseldorf: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen, 2017.
- [8] A. J. Fretzschel, „Umstellung von Kläranlagen auf Schlammfäulung,“ Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz, 2014.
- [9] P. Cornel, „Reduzierung der Stickstoffrückbelastung durch Schlammwasserbehandlung,“ *Schriftenreihe WAR*, Bd. 102, Nr. 108, p. 173–197, 1998.

- [10] A.-D.-A. AK-1.3, „Rückbelastung aus der Schlammbehandlung - Menge und Beschaffenheit der Rückläufe.“ KA- Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 47 (8) S. 1181–1187., 2000.
- [11] B. Wett und M. Hell, „Betriebserfahrungen mit dem DEMON®-Verfahren zur Deammonifikation von Prozesswasser,“ KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (55) Nr. 3, 2008.
- [12] MUELV-Hessen, „Arbeitshilfe zur Verbesserung der Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen. Anforderungen an die Planung und Durchführung von Maßnahmen,“ 2010.
- [13] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Hinweisblatt für strategische Förderschwerpunkte,“ Nationale Klimaschutz Initiative, 2020.

25 Jahre

1992 - 2017

institut für bioanalytik, umwelttoxikologie und biotechnologie



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-18174-01-00

IFB Halle GmbH, Schiepziger Str. 35, 06120 Halle-Lettin

Wasser- und Abwasserzweckverband Saalkreis
c/o INFRAPLAN INGENIEURE GmbH, Herr Kick
Herr Grimm
Sennewitzer Straße 7

06193 Petersberg/ OT Gutenberg

eMail: grimm@wazv-saalkreis.de

Untersuchungsbericht

Auftraggeber:	Wasser- und Abwasserzweckverband Saalkreis
Art des Auftrages:	Bestimmung von CSB, BSB5, Pges, NH4-N, NO3-N, NO2-N, TNb.
Auftrags-Nr.:	201075
Probenahme:	durch M.Sc. Björn Erichson
Probenbezeichnung:	6 Proben: 1. KA Pfützthal vom 12.08.2020 Überschussschlamm und Abwasserzulauf; 2. KA Löbejün vom 13.08.2020 Überschussschlamm und Abwasserzulauf; 3. KA Landsberg vom 14.08.2020 Überschussschlamm und Abwasserzulauf
Probeneingang:	12.08.2020 – 14.08.2020
Probenbearbeitung	12.08.2020 – 07.10.2020

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Bericht benannten Proben/Prüfgegenstände.

Der Bericht besteht aus 14 Seiten und 3 Seiten Protokoll.

Geschäftsführung:
Dr. rer. nat. Jürgen Hensel, Mikrobiologe
Amtsgericht Stendal, HRB 20-8009

Stadt- und Saalkreissparkasse Halle
IBAN: DE89 8005 3762 0366 0056 29
BIC: NOLADE21HAL

Sitz der Gesellschaft:
ifb Halle GmbH
Schiepziger Straße 35, D-06120 Halle
Fon: 03 45-555 82-0 Fax: 03 45-55582 23
e-mail: ifbhalle@t-online.de

Messprotokoll

1. Methoden

Tabelle 1: Methodenübersicht

Parameter	Methode	akkr.
CSB ¹	DIN ISO 15705 (H45):2003-01	X
BSB14	DIN EN 1899-2 (H52):1998-05	X
Ammonium-N	DIN 38406-5:1983-10	
Trockensubstanz (TS)	DIN 38409-H1 (1987-01)	X
Glühverlust (oTS)	DIN 38409-H1 (1987-01)	X
Brennwert	DIN EN 15170, 2009-05*	
Phosphat	DIN ISO 15923-1 (D49):2014-07	
Vergärung organischer Stoffe - Gärversuche (Gasertragsermittlung) ^{2,3}	VDI 4630 Punkt 7:2006-04	X

akkr. = X = akkreditiertes Prüfverfahren

* Die Analytik erfolgte im Unterauftrag durch ein akkreditiertes Prüflabor

2. Ergebnisse

Gemäß des Auftrages wurden aus den Kläranlagen Pfützthal, Löbejün und Landsberg jeweils Proben der Abwasserzulaufe sowie aus den Überschussschlamm Speichern entnommen. 50 l des Abwasserzulaufes wurde anschließend mit Hilfe eines 30 µm Planktonsiebes gesiebt, wodurch die Fraktionen Siebschlamm und Siebdurchlauf gewonnen wurden. Von den 4 Kläranlage vorliegenden Proben wurden die unter 2.1.1, 2.2.1 und 2.3.1 aufgeführten Analysen durchgeführt.

Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber (Herr Kick, Fa. INFRAPLAN INGENIEURE GmbH) wurden die 3 Überschussschlämme sowie die Mischung der 3 Überschussschlämme hinsichtlich Ihres Gärverhaltens untersucht und mit dem Impfschlamm einer lokalen Biogasanlage beimpft. Weiterhin erfolgte die Bestimmung der Biogaszusammensetzung der Testansätze, der Ansatzmassen zum Versuchsbeginn und -ende sowie die Analytik der Ansatz-Outputs auf weitere chemische Parameter (CSB, BSB14 usw.).

Die Proben wurden vor der jeweiligen Analytik homogenisiert.

Anmerkungen:

¹ Der CSB gesamt wurde aus der jeweiligen Originalprobe bzw. aus der Originalprobenfraktion gemessen. Die Bestimmung des CSB gelöst erfolgte jeweils aus der mittels 0,45 µm Filter filtrierten Probe bzw. Probenfraktion.

² Die Dauer der Gärversuche wurde entsprechend des Auftrages auf 15 Tage begrenzt. Zwecks Bilanzierung erfolgte die Aufzeichnung der jeweiligen Input- und Outputmassen der Gärversuche (Batchversuche).

³ Die Messung der Gasbildung erfolgt automatisiert mittels der Messeinrichtung AMPTS II der Firma BioProcessControl. Als Impfmasse diente Material aus dem Biogasfermenter der Kläranlage Halle Nord. Für die Probe erfolgte ein doppelter Ansatz, Blindwert und Positiv-Kontrolle wurden als Einfachbestimmung mitgeführt.

Die kursiv abgebildeten Werte wurden rechnerisch aus den Messwerten ermittelt.

2.1 Kläranlage Pfützthal

2.1.1 Eingangsanalytik der am 12.08.2020 auf der Kläranlage Pfützthal entnommenen Proben

Die Analysenergebnisse gemäß Auftrag sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Analytik der entnommenen Proben bzw. Probenfraktionen (Pfützthal)

Parameter	Dimension	Abwasserzulauf	Siebschlamm aus dem Abwasserzulauf
CSB gesamt	mg/l	2.000	29.100
BSB14 gesamt	mg/l	1.586	n.A.
<i>CSB inert (rechnerisch; CSB ges. – BSB14 ges.)</i>	<i>mg/l</i>	<i>414</i>	<i>n.A.</i>
CSB gelöst	mg/l	430	n.A.
Trockensubstanz (TS)	%	0,12	1,77
Glühverlust (oTS)	% TS	47,8	86,4
Ammonium-N	mg _N /l	86,9	72,6

Tabelle 3: Ergebnisse der Analytik der entnommenen Proben bzw. Probenfraktionen (Pfützthal)

Parameter	Dimension	Siebdurchlauf aus dem Abwasserzulauf	Überschussschlamm
CSB gesamt	mg/l	683	1.840
CSB gelöst	mg/l	463	153
BSB14 gelöst	mg/l	350	n.A.
<i>CSB gelöst inert (rechnerisch; CSB gelöst – BSB14 gelöst)</i>	<i>mg/l</i>	<i>113</i>	<i>n.A.</i>
Trockensubstanz (TS)	%	0,12	1,42
Glühverlust (oTS)	% TS	42,3	60,6
Ammonium-N	mg _N /l	88,6	102
Brennwert	MJ/kg _{TS}	n.A.	12,2

n.A. = nicht im Auftrag

2.1.2 Ergebnisse der Gärversuche des Überschussschlammes der Kläranlage Pfützthal

Tabelle 4: Ergebnisse der Analytik des Outputmaterials (gesamt) der Gärversuche (Pfützthal)

Parameter	Dimension	Originaloutput des als Blindwert dienenden Versuchs (Impfschlamm)	Originaloutput des Versuchs mit dem Überschussschlamm der KA Pfützthal
CSB gesamt	mg/l	24.380	9.540
BSB14 gesamt	mg/l	2.030	2.247
CSB inert (rechnerisch; CSB ges. – BSB14 ges.)	mg/l	22.350	7.293
Trockensubstanz (TS)	%	2,0	1,32
Glühverlust (oTS)	% TS	59,4	57,1
Ammonium-N	mg _N /l	366	394
Brennwert	MJ/kg _{TS}	12,8	12,7

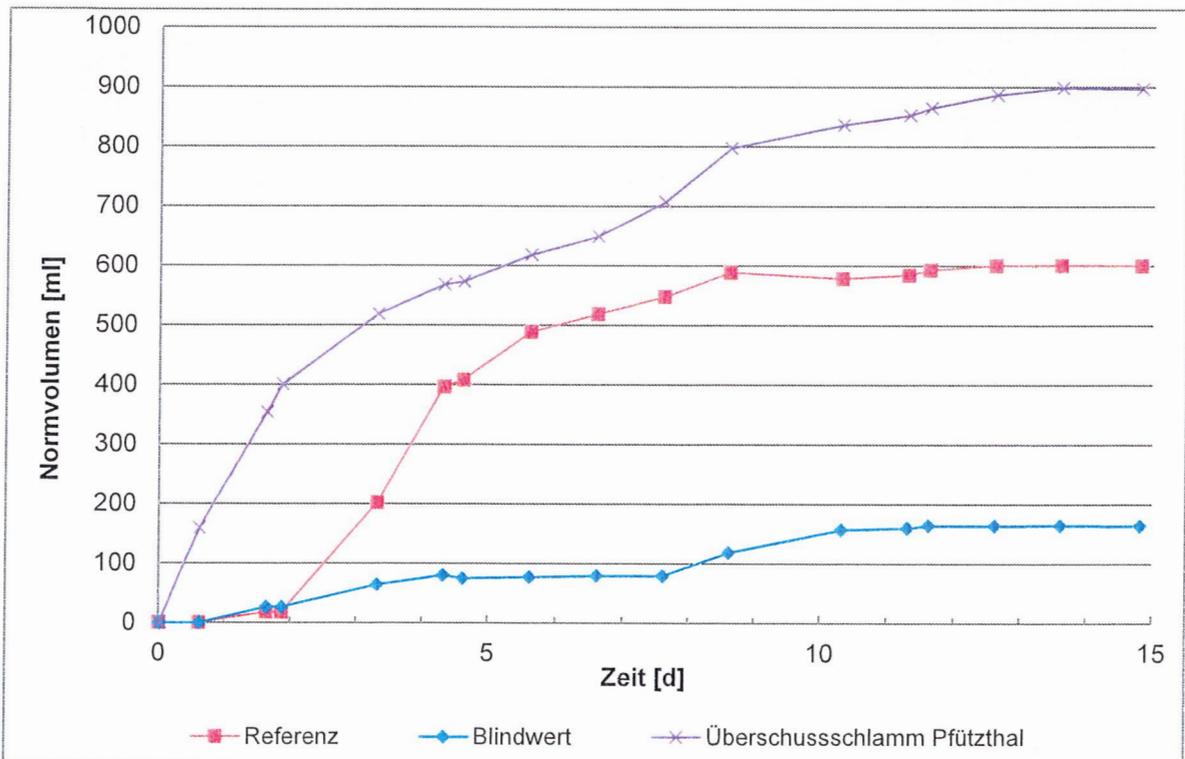
Tabelle 5: Ergebnisse der Analytik des Outputmaterials (Filtrat) der Gärversuche (Pfützthal)

Parameter	Dimension	Filtrat des Outputs des als Blindwert dienenden Versuchs (Impfschlamm)	Filtrat des Outputs des Versuchs mit dem Überschussschlamm der KA Pfützthal
CSB gelöst	mg/l	3.000	1.220
BSB14 gelöst	mg/l	69,2	115
CSB gelöst inert (rechnerisch; CSB gelöst – BSB14 gelöst)	mg/l	2.931	1.105
Trockensubstanz (TS)	%	0,18	0,99
Glühverlust (oTS)	% TS	52,6	92,1
Ammonium-N	mg _N /l	686	194
Phosphat	mg _{PO4} /l	164	2.125

Im Rahmen des Gärversuches wurde der CSB des Inputmaterials (Überschussschlamm; 1.840 mg/l), um 65,2 % reduziert (CSB-Output abzüglich des Blindwertes = 641 mg/l). Der CSB gelöst blieb mit 153 mg/l konstant (CSB gelöst Input = 153 mg/l; CSB gelöst Output 153 mg/l).

Tabelle 6: Ergebnisse der Gärversuche (Pfüztal)

	BW zur Probe ÜSS Pfüztal	Übeschussschlamm Pfüztal
Brutto-Gasvolumen [ml]	186	897
Netto-Gasvolumen [ml]		711
TS [%FS]	4,75	1,42
GV [%TS]	60	60,57
oTS [%FS]	2,85	0,86
Substrateinwaage [g]	113	187
Substrateinwaage Soll [g]	100,00	187,08
spez. Gasbildung [l_N/kg_{TS}]	34,7	268
spez. Gasbildung [l_N/kg_{oTS}]	57,8	442
Einwaage Inokulum [g]	113	113
Einwaage Probenmaterial [g]	0	187
Start-Masse des Ansatzes [g]	113,00	300,00
Ende-Masse des Ansatzes [g]	112,05	298,91
Masserückgang [g]	0,95	1,09
Masserückgang abzüglich BW [g]		0,14
CSB gesamt abs. [mg]	2732	2852
CSB gelöst abs. [mg]	336	365
CSB gesamt Ende abzüglich BW [mg/l]		641
CSB gelöst Ende abzüglich BW [mg/l]		153


Abbildung 1: Mittlere kumulative Gasbildung der Versuchsansätze mit dem Substrat der Kläranlage Pfüztal

2.2 Kläranlage Löbejün

2.2.1 Eingangsanalytik der am 13.08.2020 auf der Kläranlage Löbejün entnommenen Proben

Die Analysenergebnisse gemäß Auftrag sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Analytik der entnommenen Proben bzw. Probenfraktionen (Löbejün)

Parameter	Dimension	Abwasserzulauf	Siebschlamm aus dem Abwasserzulauf
CSB gesamt	mg/l	595	1.450
CSB gelöst	mg/l	456	n.A.
BSB14 gesamt	mg/l	495	n.A.
CSB inert (rechnerisch; CSB ges. – BSB14 ges.)	mg/l	100	n.A.
Trockensubstanz (TS)	%	0,10	3,31
Glühverlust (oTS)	% TS	44,4	86,1
Ammonium-N	mg _N /l	120	121

Tabelle 8: Ergebnisse der Analytik der entnommenen Proben bzw. Probenfraktionen (Löbejün)

Parameter	Dimension	Siebdurchlauf aus dem Abwasserzulauf	Überschussschlamm
CSB gesamt	mg/l	546	22.620
CSB gelöst	mg/l	293	108
BSB14 gelöst	mg/l	276	n.A.
CSB gelöst inert (rechnerisch; CSB gelöst – BSB14 gelöst)	mg/l	17	n.A.
Trockensubstanz (TS)	%	0,13	1,80
Glühverlust (oTS)	% TS	58,1	65,1
Ammonium-N	mg _N /l	112	138
Brennwert	MJ/kg _{TS}	n.A.	13,8

n.A. = nicht im Auftrag

2.2.2 Ergebnisse der Gärversuche des Überschussschlammes der Kläranlage Löbejün

Tabelle 9: Ergebnisse der Analytik des Outputmaterials (gesamt) der Gärversuche (Löbejün)

Parameter	Dimension	Originaloutput des als Blindwert dienenden Versuchs (Impfschlamm)	Originaloutput des Versuchs mit dem Überschussschlamm der KA Löbejün
CSB gesamt	mg/l	24.380	16.104
BSB14 gesamt	mg/l	2.030	3.932
CSB inert (rechnerisch; CSB ges. – BSB14 ges.)	mg/l	22.350	12.172
Trockensubstanz (TS)	%	2,0	1,63
Glühverlust (oTS)	% TS	59,4	59,4
Ammonium-N	mg _N /l	366	468
Brennwert	MJ/kg _{TS}	12,8	10,3

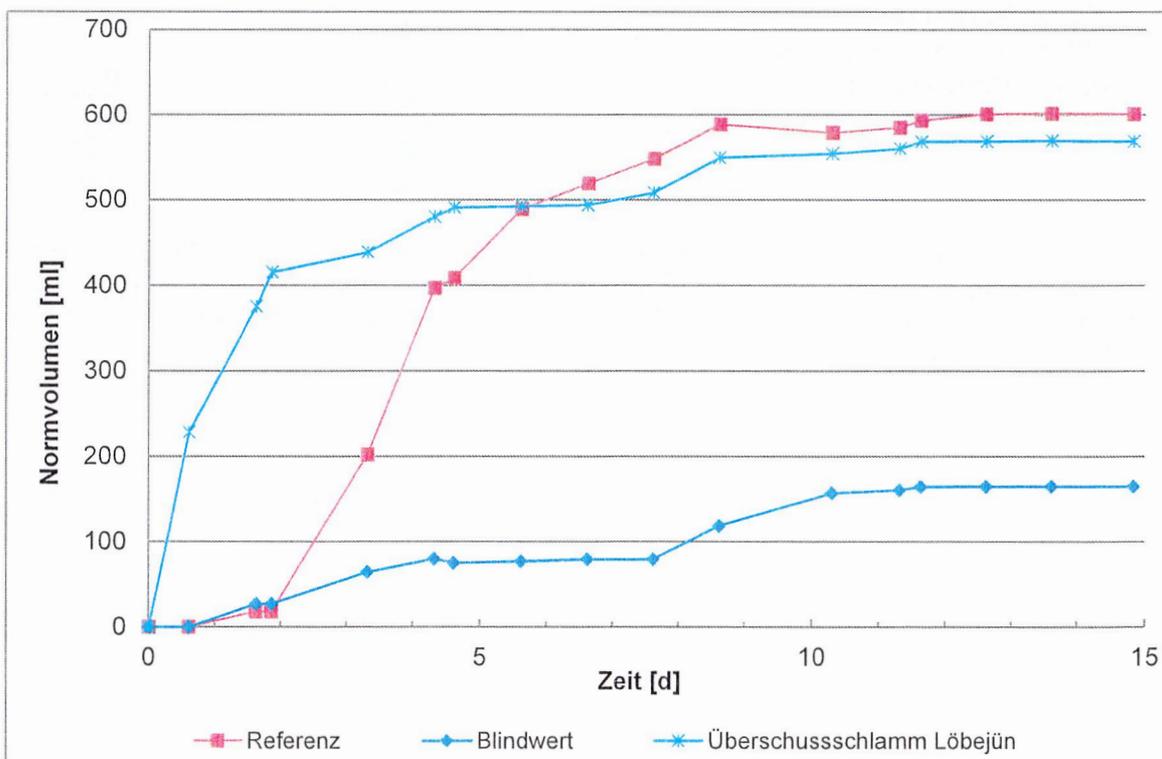
Tabelle 10: Ergebnisse der Analytik des Outputmaterials (Filtrat) der Gärversuche (Löbejün)

Parameter	Dimension	Filtrat des Outputs des als Blindwert dienenden Versuchs (Impfschlamm)	Filtrat des Outputs des Versuchs mit dem Überschussschlamm der KA Löbejün
CSB gelöst	mg/l	3.000	4.360
BSB14 gelöst	mg/l	69,2	84,4
CSB gelöst inert (rechnerisch; CSB gelöst – BSB14 gelöst)	mg/l	2.931	4.276
Trockensubstanz (TS)	%	0,18	0,12
Glühverlust (oTS)	% TS	52,6	33,3
Ammonium-N	mg _N /l	686	354
Phosphat	mg _{PO4} /l	164	148

Im Rahmen des Gärversuches wurde der CSB des Inputmaterials (Überschussschlamm; 22.620 mg/l), um 58,7 % reduziert (CSB-Output abzüglich des Blindwertes = 9.348 mg/l). Der Gehalt des CSB gelöst am Gesamt-CSB stieg auf 5.470 mg/l an. (CSB gelöst Input = 108 mg/l; CSB gelöst Output 5.470 mg/l).

Tabelle 11: Ergebnisse der Gärversuche (Löbejün)

	BW zur Probe ÜSS Löbejün	Überschussschlamm Löbejün
Brutto-Gasvolumen [ml]	222	568
Netto-Gasvolumen [ml]		346
TS [%FS]	4,75	1,8
GV [%TS]	60	65,14
oTS [%FS]	2,85	1,17
Substrateinwaage [g]	135	165
Substrateinwaage Soll [g]	100,00	164,58
spez. Gasbildung [l _N /kg _{TS}]	34,6	117
spez. Gasbildung [l _N /kg _{oTS}]	57,7	179
Einwaage Inokulum [g]	135	135
Einwaage Probenmaterial [g]	0	165
Start-Masse des Ansatzes [g]	135,00	300,00
Ende-Masse des Ansatzes [g]	133,97	298,09
Masserückgang [g]	1,03	1,91
Masserückgang abzüglich BW [g]		0,88
CSB gesamt abs. [mg]	3266	4800
CSB gelöst abs. [mg]	402	1300
CSB gesamt Ende abzüglich BW [mg/l]		9348
CSB gelöst Ende abzüglich BW [mg/l]		5470


Abbildung 2: Mittlere kumulative Gasbildung der Versuchsansätze mit dem Substrat der Kläranlage Löbejün

2.3 Kläranlage Landsberg

2.3.1 Eingangsanalytik der am 14.08.2020 auf der Kläranlage Landsberg entnommenen Proben

Die Analyseergebnisse gemäß Auftrag sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse der Analytik der entnommenen Proben bzw. Probenfraktionen (Landsberg)

Parameter	Dimension	Abwasserzulauf	Siebschlamm aus dem Abwasserzulauf
CSB gesamt	mg/l	575	4.580
CSB gelöst	mg/l	328	n.A.
BSB14 gesamt	mg/l	450	n.A.
CSB inert (rechnerisch; CSB ges. – BSB14 ges.)	mg/l	125	n.A.
Trockensubstanz (TS)	%	0,13	10,0
Glühverlust (oTS)	% TS	40,9	83,7
Ammonium-N	mg _N /l	22,8	38,3

Tabelle 13: Ergebnisse der Analytik der entnommenen Proben bzw. Probenfraktionen (Landsberg)

Parameter	Dimension	Siebdurchlauf aus dem Abwasserzulauf	Überschussschlamm
CSB gesamt	mg/l	465	11.500
CSB gelöst	mg/l	297	59,7
BSB14 gelöst	mg/l	271	n.A.
CSB gelöst inert (rechnerisch; CSB gelöst – BSB14 gelöst)	mg/l	26	n.A.
Trockensubstanz (TS)	%	0,13	1,26
Glühverlust (oTS)	% TS	33,3	58,3
Ammonium-N	mg _N /l	26,8	0,32
Brennwert	MJ/kg _{TS}	n.A.	12,7

n.A. = nicht im Auftrag

2.3.2 Ergebnisse der Gärversuche des Überschussschlammes der Kläranlage Landsberg

Tabelle 14: Ergebnisse der Analytik des Outputmaterials (gesamt) der Gärversuche (Landsberg)

Parameter	Dimension	Originaloutput des als Blindwert dienenden Versuchs (Impfschlamm)	Originaloutput des Versuchs mit dem Überschussschlamm der KA Landsberg
CSB gesamt	mg/l	24.380	10.758
BSB14 gesamt	mg/l	2.030	1.928
CSB inert (rechnerisch; CSB ges. – BSB14 ges.)	mg/l	22.350	8.830
Trockensubstanz (TS)	%	2,0	1,29
Glühverlust (oTS)	% TS	59,4	54,6
Ammonium-N	mg _N /l	366	417
Brennwert	MJ/kg _{TS}	12,8	13,6

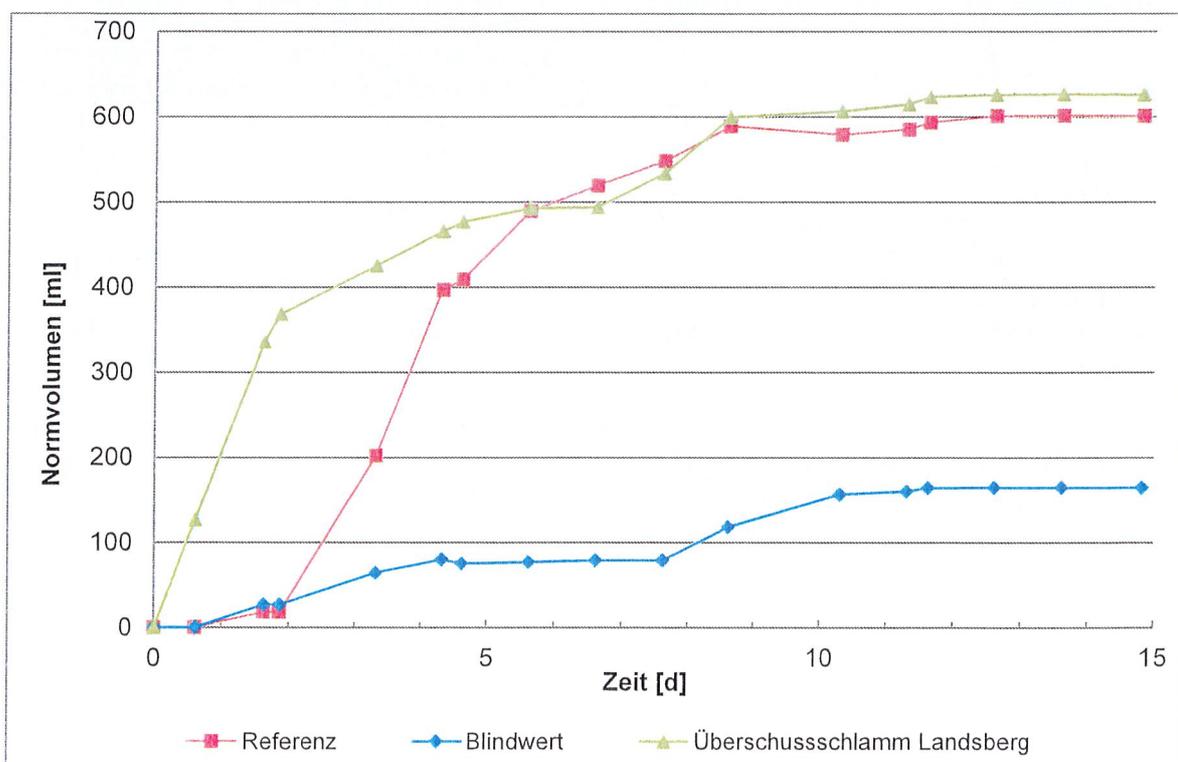
Tabelle 15: Ergebnisse der Analytik des Outputmaterials (Filtrat) der Gärversuche (Landsberg)

Parameter	Dimension	Filtrat des Outputs des als Blindwert dienenden Versuchs (Impfschlamm)	Filtrat des Outputs des Versuchs mit dem Überschussschlamm der KA Landsberg
CSB gelöst	mg/l	3.000	1.108
BSB14 gelöst	mg/l	69,2	94
CSB gelöst inert (rechnerisch; CSB gelöst – BSB14 gelöst)	mg/l	2.931	1.014
Trockensubstanz (TS)	%	0,18	0,11
Glühverlust (oTS)	% TS	52,6	18,2
Ammonium-N	mg _N /l	686	170
Phosphat	mg _{PO4} /l	164	30,7

Im Rahmen des Gärversuches wurde der CSB des Inputmaterials (Überschussschlamm; 11.500 mg/l), um 67,3 % reduziert (CSB-Output abzüglich des Blindwertes = 3.763 mg/l). Der Gehalt des CSB gelöst am Gesamt-CSB stieg leicht auf 137 mg/l an. (CSB gelöst Input = 59,7 mg/l; CSB gelöst Output 137 mg/l).

Tabelle 16: Ergebnisse der Gärversuche (Landsberg)

	BW zur Probe ÜSS Landsberg	Überschussschlamm Landsberg
Brutto-Gasvolumen [ml]	167	625
Netto-Gasvolumen [ml]		458
TS [%FS]	4,75	1,26
GV [%TS]	60	58,25
oTS [%FS]	2,85	0,73
Substrateinwaage [g]	102	198
Substrateinwaage Soll [g]	100,00	198,01
spez. Gasbildung [lN/kg _{TS}]	34,5	184
spez. Gasbildung [lN/kg _{oTS}]	57,4	315
Einwaage Inokulum [g]	102	102
Einwaage Probenmaterial [g]	0	198
Start-Masse des Ansatzes [g]	102,00	300,00
Ende-Masse des Ansatzes [g]	101,17	298,20
Masserückgang [g]	0,83	1,80
Masserückgang abzüglich BW [g]		0,97
CSB gesamt abs. [mg]	2467	3208
CSB gelöst abs. [mg]	304	330
CSB gesamt Ende abzüglich BW [mg/l]		3763
CSB gelöst Ende abzüglich BW [mg/l]		137


Abbildung 3: Mittlere kumulative Gasbildung der Versuchsansätze mit dem Substrat der Kläranlage Landsberg

2.4 Ergebnisse der Gärversuche der 1:1:1 Mischprobe aus den Überschussschlämmen der zuvor genannten Kläranlagen

Der Input-Brennwert des Überschussschlamm-Gemisches betrug 12,0 MJ/kgTS bei einer Trockensubstanz von 1,95 %.

Der Mittelwert des Inputmaterials der Mischprobe des CSB-Gesamt lag bei 11.987 mg/l. Der zugehörige Mittelwert des CSB gelöst lag bei 106,9 mg/l.

Tabelle 17: Ergebnisse der Analytik des Outputmaterials (gesamt) der Gärversuche (Mischprobe)

Parameter	Dimension	Originaloutput des als Blindwert dienenden Versuchs (Impfschlamm)	Originaloutput des Versuchs mit dem 1:1:1 Gemisch der Überschussschlämme
CSB gesamt	mg/l	24.380	12.486
BSB14 gesamt	mg/l	2.030	2.818
CSB inert (rechnerisch; CSB ges. – BSB14 ges.)	mg/l	22.350	9.668
Trockensubstanz (TS)	%	2,0	1,63
Glühverlust (oTS)	% TS	59,4	58,4
Ammonium-N	mg _N /l	366	308
Brennwert	MJ/kg _{TS}	12,8	12,4

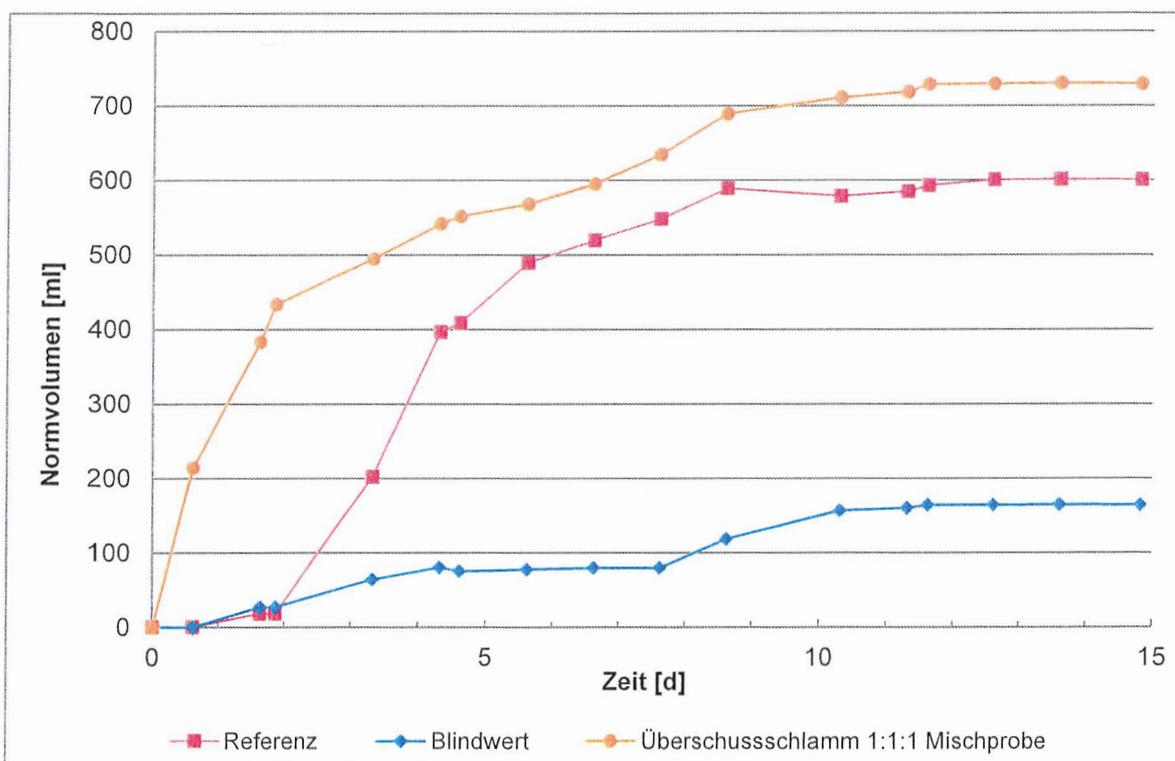
Tabelle 18: Ergebnisse der Analytik des Outputmaterials (Filtrat) der Gärversuche (Mischprobe)

Parameter	Dimension	Filtrat des Outputs des als Blindwert dienenden Versuchs (Impfschlamm)	Filtrat des Outputs des Versuchs mit dem 1:1:1 Gemisch der Überschussschlämme
CSB gelöst	mg/l	3.000	3.480
BSB14 gelöst	mg/l	69,2	116
CSB gelöst inert (rechnerisch; CSB gelöst – BSB14 gelöst)	mg/l	2.931	3.364
Trockensubstanz (TS)	%	0,18	0,12
Glühverlust (oTS)	% TS	52,6	30,8
Ammonium-N	mg _N /l	686	160
Phosphat	mg _{PO4} /l	164	134

Im Rahmen des Gärversuches wurde der CSB des Inputmaterials (Mischprobe Überschussschlämme; 11.987 mg/l), um 59,4 % reduziert (CSB-Output abzüglich des Blindwertes = 4.869 mg/l). Der Gehalt des CSB gelöst am Gesamt-CSB stieg auf 3.787 mg/l an. (CSB gelöst Input = 106,9 mg/l; CSB gelöst Output 3.787 mg/l).

Tabelle 19: Ergebnisse der Gärversuche (Mischprobe)

	BW zur Probe MP ÜSS	MP Überschussschlämme
Brutto-Gasvolumen [ml]	192	729
Netto-Gasvolumen [ml]		537
TS [%FS]	4,75	1,49
GV [%TS]	60	61,32
oTS [%FS]	2,85	0,92
Substrateinwaage [g]	117	183
Substrateinwaage Soll [g]	100,00	182,64
spez. Gasbildung [l_N/kg_{TS}]	34,5	197
spez. Gasbildung [l_N/kg_{oTS}]	57,6	320
Einwaage Inokulum [g]	117	117
Einwaage Probenmaterial [g]	0	183
Start-Masse des Ansatzes [g]	117,00	300,00
Ende-Masse des Ansatzes [g]	116,07	297,32
Masserückgang [g]	0,93	2,69
Masserückgang abzüglich BW [g]		1,76
CSB gesamt abs. [mg]	2830	3712
CSB gelöst abs. [mg]	348	1035
CSB gesamt Ende abzüglich BW [mg/l]		4869
CSB gelöst Ende abzüglich BW [mg/l]		3787


Abbildung 4: Mittlere kumulative Gasbildung der Versuchsansätze mit der Mischprobe der Überschussschlämme

Für Rückfragen zu den Analysenergebnissen stehen wir Ihnen gern unter 0345/ 555 82 - 0 zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen



M. Sc. Björn Erichson
Laborleiter

Halle, 15.10.2020

Anlage 2: Klärschlamm Transport- und Entsorgungskosten

Klärschlamm Entsorgung 2019

Kläranlage	EW	entsorgte Menge [t TS]	TS-Gehalt [%]	entsorgte Menge OS [t]	Kosten €/t, brutto	Gesamt €, brutto
Pfützthal	36.800	331	20	1.655	65,45	108.320
Landsberg	10.000	153	24	638	114,24	72.828
Löbejün	9.000	130	22	591	58,79	34.740
Summe	55.800	614		2.883		215.887

Errichtung einer anaeroben Stufe für die KA Pfützthal

Kläranlage	EW	entsorgte Menge [t TS]	TS-Gehalt [%]	entsorgte Menge OS [t]	Kosten €/t, brutto	Gesamt €, brutto
Pfützthal	36.800	331	30	1.103	65,45	72.213

Einsparung	36.107
-------------------	---------------

Verbundverwertung von Klärschlamm auf der KA Pfützthal

Rohschlammtransporte

Kläranlage	EW	ÜSS [t_TS]	TS-Gehalt [%]	ÜSS [t]	Kosten €/t TS, brutto	Gesamt €, brutto
Landsberg	10.000	153	6	2.550	180	27.540
Löbejün	9.000	130	6	2.167	160	20.800
Summe	19.000	283	6	4.717		48.340

Entsorgungskosten entwässerter Faulschlamm

Kläranlage	EW	entsorgte Menge [t TS]	TS-Gehalt [%]	entsorgte Menge OS [t]	Kosten €/t, brutto	Gesamt €, brutto
Pfützthal	36.800	331	30	1.103	65,45	72.213
Landsberg	10.000	153	30	510	65,45	33.380
Löbejün	9.000	130	30	433	65,45	28.362
Summe	55.800	614		2.047		133.954

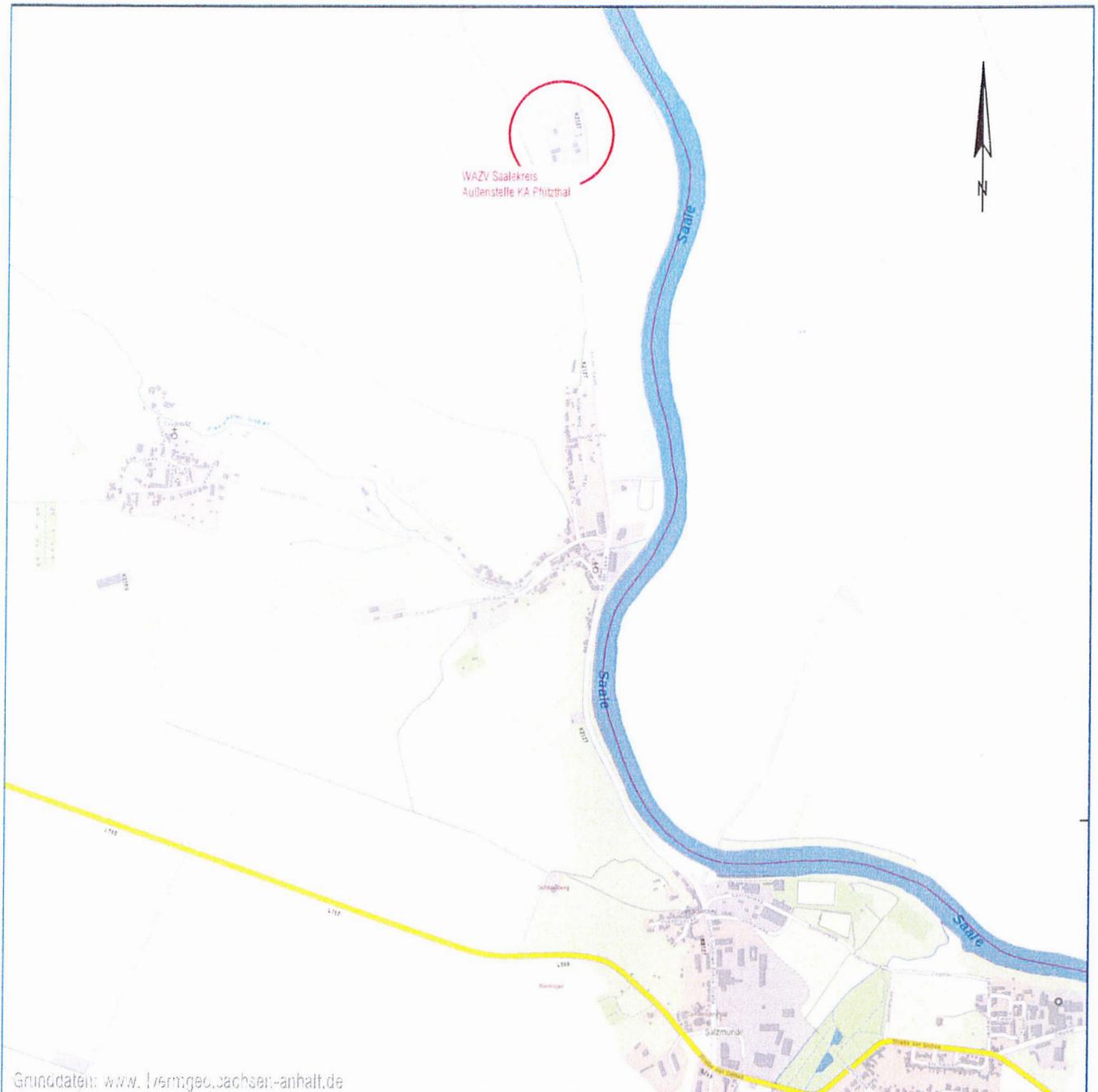
Gesamt	182.294
---------------	----------------

Einsparung	33.593
-------------------	---------------

Wasser- und Abwasserzweckverband Saalkreis
Erstellung einer Potentialstudie auf der Kläranlage Pfützthal

Anlage 3: Einsparungen und Kosten der untersuchten Maßnahmen

Kapitel/ Maßnahme	Maßnahmenbezeichnung	Energie- einsparung [kWh/a]	Einsparung CO2-Äq.	Investition [€]	Kapitalkosten [€/a]	Betriebskosten [€/a]	Einsparungen [€/a]	Jahreskosten [€/a]	K/N
6.1.	Errichtung einer anaeroben Stufe (Klärschlammbehandlung nur für KA Pfützthal)	831.070	446.741	3.531.325	181.032	42.500	228.111	223.532	0,98
6.5.	Integration energiearme Verfahrenstechnik im Rahmen der Stickstoffelimination	192.720	103.491	520.625	31.840	20.323	42.545	52.163	1,23
6.6.	Wärmepumpe	50.400	9.439	30.000	1.835	4.019	4.788	5.854	1,22
S1	Energieeffiziente Antriebe bzw. Ansteuerungen	42.006	22.557	40.000	2.446	-9.338	9.338	2.446	0,26
S2	Belüftung und Druckluftversorgung	389.046	208.918	493.106	30.157	-86.847	86.847	30.157	0,35
K1	Photovoltaikanlage	70.621	37.924	146.250	8.944	-15.770	15.770	8.944	0,57
A1	Verbundverwertung von Klärschlamm	599.335	547.837	3.921.050	201.002	43.800	269.799	244.802	0,91



Grunddaten: www.tzsmgeo.sachsen-anhalt.de

Legende



Planungsbereich

NR.	Art der Änderung	Datum	Name
1			

INFRAPLAN
INFRAPLAN Ingenieure GmbH
 Beratende Ingenieure
 Neugasse 5 - 9 09217 Burgstädt
 TEL: 037 24 / 666 59 - 0 FAX: 037 24 / 666 59 - 21

WAZV
Wasser- und Abwasserzweckverband Saalkreis
 Sennewitzer Straße 1 06193 Patersberg
 TEL: 034606 / 760-0

Erstellung einer Potentialstudie
 auf der Kläranlage Pfützthal
 Potentialstudie
 Übersichtsplan

FÜR DIESE ZEICHNUNG BEHALTEN WIR UNS ALLE RECHTE VOR. SIE DARF OHNE UNSERE SCHRIFTLICHE ZUSTIMMUNG WEITER VERWENDET WERDEN ODER AN DRITTE ÜBERLIEFERT WERDEN.

DER BAUHERR

HÖHENBEZUG:	
LAGEBEZUG:	
MASSSTAB:	ohne
PROJEKT-NR.:	af 1024
PLAN-NR.:	1
BEWILLIGT VON:	Kick 21.10.2020
GEZEICHNET VON:	Heil 21.10.2020
AUSFERTIGT AM:	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12