

Energiekonzept für die Verbandskläranlage Schwandorf - Wackersdorf

Projektnummer: 238001

gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Zweckverband Verbandskläranlage Schwandorf-Wackersdorf

Klärwerksstr. 1
92421 Schwandorf

Erläuterungsbericht

Februar 2024

M. Sc. Yannik Schirmmacher
Dr.-Ing. Steffen Rommel
Dr.-Ing. Ralf Mitsdoerffer

.....
Verfasser

GFM Bau- und
Umweltingenieure
GmbH
Anni-Albers-Str. 7
80807 München
Tel.: 089-380178- 0
Fax: 089-380178-30
info@gfm.com
<http://www.gfm.com>

Inhaltsverzeichnis

1	Vorhabensträger	7
2	Zielsetzung.....	7
3	Bestandsaufnahme	7
3.1	Lage.....	7
3.2	Ausbaugröße und Ablaufanforderungen.....	8
3.3	Zulauftracht, Einwohnergleichwerte.....	8
3.4	Verfahrenskonzept	9
3.5	Bauwerke und Aggregate	10
3.6	Bemessung der Belebungsanlage.....	11
3.7	Schlammanfall.....	11
3.8	Faulgasanfall.....	12
3.9	Sanierungsbedarf.....	12
3.10	Energiemanagementsystem.....	12
3.11	Messtechnik und Automatisierung.....	12
3.12	Beabsichtigte Planungen.....	12
4	Energiecheck	13
5	Energieanalyse	14
5.1	Energieverbraucher.....	14
5.2	Wärmebedarf	16
5.3	Anlagenbezogene Idealwerte	18
5.3.1	Einlaufhebewerk.....	18
5.3.2	Rechen	18
5.3.3	Sandfang.....	18
5.3.4	Räumer Vorklärbecken.....	19

5.3.5	Primärschlammumpfen Vorklärbecken	19
5.3.6	Belüftung, Rührwerke	20
5.3.7	Rezirkulationspumpen	21
5.3.8	Nachklärung	21
5.3.9	Rücklaufschlammumpfen	21
5.3.10	Überschussschlammumpfen	21
5.3.11	Dickschlammumpfe Überschussschlamm	22
5.3.12	Primärschlammeindickung (Krählwerk)	22
5.3.13	Überschussschlammeindickung	22
5.3.14	Faulung	22
5.3.15	Schlammmentwässerung	23
5.3.16	Brauchwasseranlage	23
5.3.17	Zusammenstellung des Einsparpotenzials	23
5.4	Eigenversorgung	26
5.4.1	Strom	26
5.4.2	Wärme	29
6	Potenzialanalyse	30
6.1	Reduktion Erdgasbezug	30
6.2	Nutzung erneuerbarer Energien	31
6.2.1	Faulgas	31
6.2.2	Biogas	32
6.2.3	Photovoltaik	34
6.2.4	Abwasserwärme	38
6.2.5	Wärme aus Faulschlamm	39
6.2.6	Windkraft	40

6.2.7	Wasserkraft.....	41
7	Optimierungsmaßnahmen	41
7.1	Kurzfristige Maßnahmen	42
7.1.1	Energiemanagementsystem.....	42
7.1.2	Reduktion Erdgasnutzung und Faulraumtemperatur	42
7.1.3	Verzicht auf Teilnahme am Regelenergiemarkt.....	42
7.2	Mittelfristige Maßnahmen	43
7.2.1	Bau einer PV-Freiflächenanlage.....	43
7.2.2	Austausch Rücklaufschlammumpen.....	43
7.3	Langfristige Maßnahmen.....	43
7.3.1	Abwasserwärmenutzung	43
8	Zusammenfassung.....	44
9	Literatur.....	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standort der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf, Quelle: OpenStreetMap	8
Abbildung 2: Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch in Abhängigkeit des Reinigungsverfahrens (DWA-A 216), in rot ist der Wert der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf eingezeichnet	13
Abbildung 3: Verteilung des Stromverbrauchs der Anlagenteile, ausgewertet für das Jahr 2022	16
Abbildung 4: Wärmebilanz der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf	17
Abbildung 5: Zusammenfassung des IST-Verbrauchs, des idealen Verbrauchs gemäß DWA-A 216 und des Einsparpotenzials	25
Abbildung 6: Anteile der verschiedenen Energiequellen zur Stromversorgung der Kläranlage, Auswertungsjahr 2022	27
Abbildung 7: Mittlerer Tagesverlauf des Gesamtverbrauchs der Kläranlage und der Stromerzeugung durch die PV- und BHKW-Anlage, der transparente Bereich zeigt die Standardabweichung, Daten des Jahres 2022	28
Abbildung 8: Jahresdauerlinie des gesamten Stromverbrauchs der Kläranlage, Daten des Jahres 2022	28
Abbildung 9: Jahresdauerlinie des Netzbezugs der Kläranlage, Daten des Jahres 2022	29
Abbildung 10: Spezifischer externer Wärmebezug der Kläranlage im Vergleich zu anderen Kläranlagen, Grafik: DWA-A 216	29
Abbildung 11: Betriebswirtschaftlicher Ertrag durch Reduktion der Strombezugskosten bei Erdgasnutzung im BHKW ohne Wärmebedarf, Berücksichtigung von Kosten für Gasbezug, Wartung des BHKWs und Strombezug	30
Abbildung 12: Täglicher Gasanfall in Abhängigkeit von der mittleren Faulraumtemperatur (Faulurm 1 und 2), Daten: 2021 und 2020	31
Abbildung 13: Bestimmung der freien Kapazität der Faulung über das Schlammalter (die Faulzeit), Quelle: Urban et al. 2017 zitiert in DWA-M 380 ..	32
Abbildung 14: Auswirkung Anstieg des Erdgaspreises auf die Betriebskosten für die Deckung des Wärmedefizits im Winter	33
Abbildung 15: Tagesgang der Stromerzeugung durch die bestehende PV-Anlage sowie der Eigenverbrauch hiervon, Simulationsergebnis PV-Sol angepasst an Verbrauchsabrechnung 2022	35

Abbildung 16: Ertrag der Freiflächen-PV-Anlage Variante 2a mit Eigenverbrauch und Netzeinspeisung.....36

Abbildung 17: Mögliche Aufstellungsfläche für den Neubau einer Freiflächen-PV-Anlage, Quelle des Luftbilds: BayernAtlas.....37

Abbildung 18: Ertrag und Nutzung des erzeugten Stroms der PV-Freiflächenanlage mit Batteriespeicher (Variante 2c)38

Abbildung 19: Verlauf der mittels einer Wärmepumpe bereitstellbaren Wärmemenge durch Abwasserwärmenutzung, Betriebsdaten des Jahres 202239

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anfallende Schlammengen auf der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf, Mittelwert der Jahre 2021 und 2022..... 11

Tabelle 2: Übersicht über relevante Energieverbraucher der Kläranlage Schwandorf..... 14

Tabelle 3: Mittlere Zulauffrachten der Kläranlage Schwandorf im IST-Zustand20

Tabelle 4: Zusammenfassung des IST-Verbrauchs, des idealen Verbrauchs gemäß DWA-A 216 und des daraus resultierenden Einsparpotenzials.....24

Tabelle 5: Ausrichtung der bestehenden PV-Flächen..... 34

Tabelle 6: Ergebnisse der Berechnung zu möglichen PV-Freiflächenanlagen .36

Tabelle 7: Bemessungsgrundlage Faulschlammwärmenutzung40

1 Vorhabensträger

Vorhabensträger des Energiekonzeptes und Betreiber der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf ist der Zweckverband Verbandskläranlage Schwandorf-Wackersdorf.

Anschrift:

Zweckverband Verbandskläranlage Schwandorf-Wackersdorf
Klärwerksstr. 1
92421 Schwandorf

2 Zielsetzung

Zielsetzung des Energiekonzeptes ist es den externen fossilen Energiebezug der Verbandskläranlage weitestgehend zu reduzieren, um einen möglichst autarken Betrieb zu erreichen.

Hierfür erfolgten zunächst eine Bestandsaufnahme und Potenzialanalyse, in welcher die gesamte Kläranlage energetisch bewertet wurde, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen. Dabei standen insbesondere die Reduzierung des Energieeinsatzes, die Effizienzsteigerung notwendiger Aggregate, der Ausbau der Eigenstromerzeugung sowie die Erzeugungsoptimierung im Hinblick auf die bestehenden BHKWs, der PV-Anlage sowie Energiespeicher im Fokus.

Das vorliegende Energiekonzept wurde gemäß dem Merkblatt zur Förderung von Energieeinsparungskonzepten (vom 10.04.2018) vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie erstellt.

3 Bestandsaufnahme

Die Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf wurde 1997 in Betrieb genommen. Seitdem wurden bei Bedarf Anlagenteile erneuert, wie zum Beispiel der Austausch der Belüfterkerzen, Rührwerke etc. Die wasserrechtliche Erlaubnis der Anlage endet am 31.12.2037.

3.1 Lage

Die Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf liegt im nordöstlichen Bayern im Landkreis Schwandorf, Regierungsbezirk Oberpfalz (Abbildung 1). In der Kläranlage werden die Abwässer der Stadt Schwandorf, der Gemeinde Wackersdorf, inkl. der Gemeinde Steinberg sowie die Industrieabwässer beider Kommunen behandelt. Die Abwasserableitung erfolgt im Mischsystem. Derzeit befinden sich keine abwasserintensiven Gewerbe im Einzugsgebiet, folglich entspricht die Abwasserzusammensetzung häuslichem Abwasser.

Das behandelte Abwasser der Kläranlage wird in die Naab (Gewässer I. Ordnung) bei Fluss-km 46,1 eingeleitet.

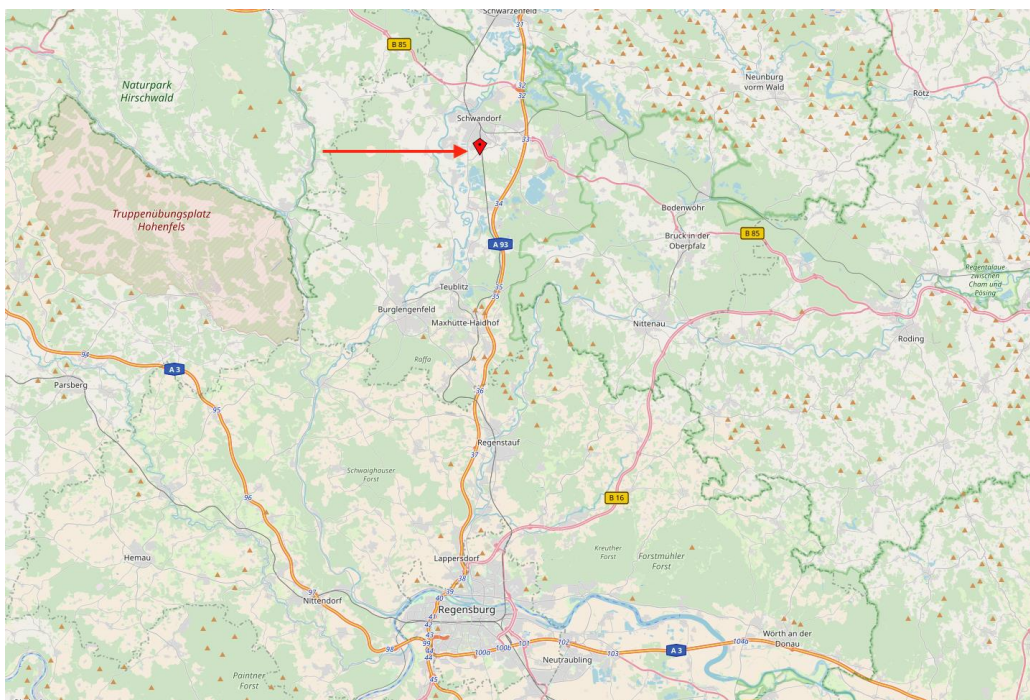


Abbildung 1: Standort der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf, Quelle: OpenStreetMap

3.2 Ausbaugröße und Ablaufanforderungen

Die Kläranlage ist bemessen auf eine BSB₅-Fracht (roh) von 7.500 kg/d, was einer Ausbaugröße von 125.000 EW₆₀ entspricht. Dementsprechend ist die Kläranlage der Größenklasse 5 gemäß Anhang 1 der Abwasserverordnung (AbwV, 2020) zuzuordnen.

Am Ablauf der Kläranlage sind derzeit folgende Werte von der nichtabgesetzten, homogenisierten 2h-Mischprobe einzuhalten:

Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	45 mg/l
Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB ₅)	15 mg/l
Ammonium-Stickstoff* (NH ₄ -N), im Zeitraum vom 01.05.–31.10.	10 mg/l
Gesamt-Stickstoff* (N _{ges}) als Summe von Ammonium-, Nitrit- und Nitrat-Stickstoff, im Zeitraum vom 01.05.–31.10.	13 mg/l
Phosphor gesamt (P _{ges})	1 mg/l

In der Zeit vom 01. November bis 30. April ist die Anlage so zu betreiben, dass bestmögliche Nitrifikation und Denitrifikation erzielt werden.

3.3 Zulauftracht, Einwohnergleichwerte

Zur Ermittlung der Zulauftrachten der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf wurden die Betriebstagebücher der Jahre 2021/2022 ausgewertet. Die Konzentrationen der relevanten stofflichen Belastung des Abwassers wurden

mindestens 8-täglich im Zulauf nach dem Rechen in volumenproportionalen 24 h-Mischproben gemessen. Hieraus wurden mit den zugehörigen Tagesabflüssen die Tagesfrachten berechnet. Der Trübwasser- bzw. Zentratanfall ist in diesen Messungen berücksichtigt.

Aus den Auswertungen der Betriebstagebücher ergibt sich für die Jahre 2021/2022 im Jahresmittel eine Zulauffracht von 9.936 kg CSB/d bzw. 82.800 EW₁₂₀ unter Annahme einer einwohnerspezifischen Fracht von 120 g CSB / EW / d gemäß ATV-DVWK Arbeitsblatt A 198 (2003). Dieser Wert wurde im Rahmen der Studie zur Ermittlung des einwohnerspezifischen Stromverbrauchs genutzt (DWA-A 216, 2015).

3.4 Verfahrenskonzept

Das Abwasser fließt im freien Gefälle zum Gelände der Kläranlage. Im Einlaufhebewerk wird das anfallende Abwasser über 3 Schnecken auf das Niveau der Kläranlage gefördert und zunächst über die mechanische Reinigungsstufe, bestehend aus Rechen, belüftetem Sandfang und den Vorklärbecken, vorgereinigt. Im Anschluss wird das Abwasser auf die beiden Belebungsstraßen gleichmäßig aufgeteilt.

In den beiden Vorklärbecken erfolgt die Abscheidung des Primärschlammes durch Sedimentation. Der anfallende Schlamm wird über einen statischen Eindicker mit Krählerwerk eingedickt und anschließend einem der beiden Faultürme zugegeben.

Nach der Vorklärung durchläuft das Abwasser die Belebungsbecken. In diesen erfolgt zunächst die biologische Phosphorelimination (Bio-P) und anschließend die Stickstoffentfernung durch Denitrifikation und Nitrifikation (vorgeschaltete Denitrifikation). Nach der Belebung wird der Belebtschlamm in zwei Nachklärbecken abgetrennt. Diese sind als horizontal durchströmte Rundbecken mit Schildräumer ausgeführt. Die chemische Phosphorfällung wird als Simultanfällung im Ablauf der Belebungsbecken vorgenommen. Alle Anlageteile werden im freien Gefälle durchflossen.

Der Rücklaufschlamm wird über je 3 trocken aufgestellte Kreiselpumpen in den Zulaufbereich der Belebungsbecken gefördert. Der anfallende Überschussschlamm wird zunächst über einen Bandeindicker eingedickt und anschließend einem der beiden Faultürme zugegeben.

Zur anaeroben Stabilisierung des Faulschlammes stehen 2 identische Faultürme mit einem Volumen von je 1.319 m³ zur Verfügung. Der ausgefaulte Schlamm wird über eine Zentrifuge entwässert und auf dem Gelände der Kläranlage bis zur thermischen Verwertung zwischengelagert. Das anfallende Faulgas wird in einem drucklosen Gasbehälter (Volumen 1.000 m³) zwischengespeichert und in einem der zwei BHKWs energetisch genutzt. Der produzierte Strom wird vorrangig zur Deckung des Eigenbedarfs genutzt. Die Wärme dient der Beheizung der Faulbehälter und der Betriebsgebäude sowie der Trinkwassererwärmung. Bei Faulgasknappheit können beide BHKWs mit Erdgas betrieben werden. Das zweite BHKW ist zur Teilnahme am positiven Regelenergiemarkt angemeldet und dient darüber hinaus der Betriebssicherheit (Redundanz).

Die Dachflächen der Betriebsgebäude sind an einen externen Unternehmer verpachtet, der hierauf PV-Anlagen betreibt. Der PV-Strom wird vom Betreiber direkt an den Zweckverband verkauft. Der Überschussstrom wird in das Stromnetz eingespeist.

3.5 Bauwerke und Aggregate

Die Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf besteht im Wesentlichen aus folgenden Anlagenteilen.

Mechanische Abwasserreinigung

- 1 Rechenanlage: Stababstand 6 mm
- 1 Rechengutwäsche mit -presse
- 1 Belüfteter Sandfang mit Sandklassierer, Volumen 250 m³
- 2 Vorklärbecken, Volumen 800 m³, Fläche 400 m²

Biologische Abwasserreinigung

Zweistraßige Belebung mit vorgeschalteter Denitrifikation und biologischer Phosphorelimination (Bio-P):

- Straße 1: $V = 9.500 \text{ m}^3$
- Straße 2: $V = 9.500 \text{ m}^3$
- Gesamtvolumen: 19.000 m³ (davon 3.000 m³ Bio-P)

- 1 Gebläsestation mit 2 Turboverdichtern mit je 150 kW Nennleistung

2 Nachklärbecken ausgeführt als Rundbecken:

$$\begin{array}{ll} D_1 = 50 \text{ m} & D_2 = 50 \text{ m} \\ A_1 = 3.927 \text{ m}^2 & A_2 = 3.927 \text{ m}^2 \\ V_1 = 15.000 \text{ m}^3 & V_2 = 15.000 \text{ m}^3 \end{array}$$

- 1 Rücklaufschlammwerk mit 6 Pumpen, Förderleistung je 135 l/s

Chemische Abwasserreinigung

- 1 Chemische Phosphorfällung Fällmittelanlage $V = 30 \text{ m}^3$

Schlammbehandlung

- 1 Überschussschlammwerk mit 2 Überschussschlammumpfen, Förderleistung je 20 l/s

- 1 Primärschlammeindicker mit Krählwerk, Volumen 760 m³

- 1 Bandeindicker zur Überschussschlammeindickung mit Flockungshilfsmittel-Aufbereitungsanlage

1 stationäre Klärschlammmentwässerung, ausgeführt als Zentrifuge mit Flockungshilfsmittel-Aufbereitungsanlage

2 Faulbehälter, Volumen je 1.319 m³

1 Gasbehälter, drucklos, Volumen 1.000 m³

1 Gasfackel

2 BHKWs, Leistung 190 kW_{el} und 180 kW_{el} (jeweils Faul- und Erdgasbetrieb)

2 Heizkessel, Wärmeleistung 210 und 390 kW_{th} (außer Betrieb, Faul- und Erdgasbetrieb möglich)

2 Schlammwärmetauscher zur Beheizung der Faultürme, je 48 m

Ablauf Kläranlage

1 Ablaufmessung

1 Auslaufbauwerk (Einleitungsstelle)

3.6 Bemessung der Belebungsanlage

Im Rahmen der Bestandsaufnahme wurde die Dimensionierung der Belebung gemäß DWA-A 131 geprüft. Die Berechnung wurde mit dem Programm „Belebungs-Expert“ durchgeführt. Als Datengrundlage dienten die Auswertungen der Betriebstagebücher der Jahre 2021/2022. Zusammenfassend weisen sowohl die Becken der Belebung als auch die der Nachklärung eine ausreichend große Dimensionierung auf. Die detaillierte Berechnung kann der Beilage 2 entnommen werden.

3.7 Schlammfall

Im Auswertungszeitraum 2021/2022 sind im Mittel auf der Kläranlage nachfolgende Schlammengen angefallen (Tabelle 1). In Beilage 7 befindet sich die Schlamm Bilanz der Anlage.

Tabelle 1: Anfallende Schlammengen auf der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf, Mittelwert der Jahre 2021 und 2022

	Menge[m ³ /a]	Trockenrückstand [%]
Primärschlamm	38.600	3,8
Primärschlamm eingedickt	33.500	4,8
Überschussschlamm	123.200	0,8
Überschussschlamm eingedickt	11.800	8,1
Faulschlamm	24.900	3,7
Faulschlamm entwässert	3.380	27,0

3.8 Faulgasanfall

Im Auswertungszeitraum fielen durchschnittlich 585.000 m³/a Faulgas an, das in den vorhandenen BHKWs genutzt wird. Weitere Ausführungen hierzu sind Abschnitt 5.4 und 6.2.1 zu entnehmen.

3.9 Sanierungsbedarf

Die Bauwerke der Kläranlage befinden sich in einem altersgemäß guten Zustand. Bei der Besichtigung wurden keine sichtbaren Mängel festgestellt. Es besteht kein baulicher Sanierungsbedarf.

Die Maschinenteknik sowie die Prozessleittechnik und die EDV-Infrastruktur befindet sich ebenfalls in einem altersgemäß guten Zustand.

3.10 Energiemanagementsystem

Derzeit ist auf der Kläranlage kein Energiemanagementsystem in Betrieb. Es sind jedoch Stromzähler zur Überwachung der relevanten Verbraucher(gruppen) sowie der Photovoltaikanlage installiert. Diese sind jedoch nicht in das Prozessleitsystem eingebunden. Daher erfolgt lediglich monatlich eine Prüfung des Stromverbrauchs.

3.11 Messtechnik und Automatisierung

Auf der Kläranlage erfolgt eine Überwachung des Zulaufs hinsichtlich folgender Parameter: Durchfluss (mittels eines magnetisch-induktiven Durchflussmessers), pH, Temperatur. Im Ablauf werden zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Parametern die Konzentrationen von Ammonium, Nitrat, TOC und Phosphor gemessen.

Beide Belebungsbecken sind mit folgender Messtechnik zur Prozessüberwachung ausgerüstet.

Belebung 1: Trockensubstanzgehalt, gelöster Sauerstoff, Phosphor

Belebung 2: Trockensubstanzgehalt, gelöster Sauerstoff, Phosphor

3.12 Beabsichtigte Planungen

Aktuell ist der Austausch der Rührwerksmotoren geplant. Die alten Motoren sollen durch neue Motoren mit Energieeffizienzklasse IE3 ausgetauscht werden. Sofern die Förderung bewilligt wird, werden Motoren mit Energieeffizienzklasse IE4 verbaut.

Zusätzlich ist der Einsatz eines Energiemanagementsystems geplant (siehe 7.12).

4 Energiecheck

Der Gesamtverbrauch der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf lag im Betriebsjahr 2022 bei 1.800.000 kWh. Dies entspricht unter Annahme der mittleren Belastung von 82.800 EW₁₂₀ einem einwohnerspezifischen Stromverbrauch von 21,7 kWh/(EW·a). Die Kläranlage weist im Vergleich zu anderen deutschen Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung einen niedrigen Stromverbrauch auf (siehe Abbildung 2). Lediglich ca. 10 % der Kläranlagen haben einen geringeren einwohnerspezifischen Gesamtstromverbrauch.

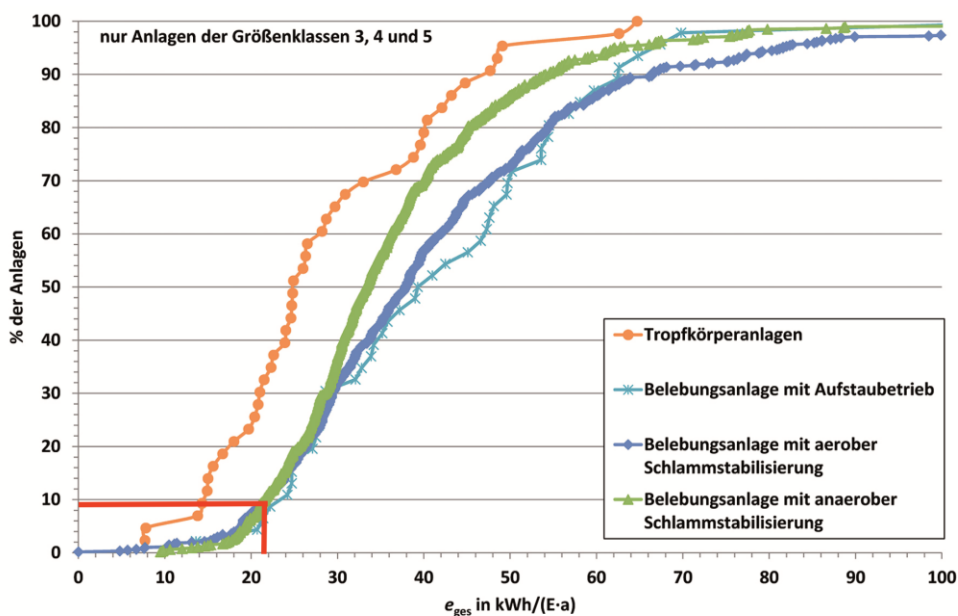


Abbildung 2: Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch in Abhängigkeit des Reinigungsverfahrens (DWA-A 216), in rot ist der Wert der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf eingezeichnet

5 Energieanalyse

Als Stromverbrauch wird im Folgenden die tatsächlich verbrauchte elektrische Energie im Jahr 2022 bezeichnet.

5.1 Energieverbraucher

Die wichtigsten Energieverbraucher der Kläranlage sind in nachfolgender Tabelle nach Verfahrensgruppe geordnet zusammengefasst:

Tabelle 2: Übersicht über relevante Energieverbraucher der Kläranlage Schwandorf

Verfahrensgruppe	Aggregat	Nennleistung [kW]
Einlaufhebewerk	Schneckenpumpe	75,0
Fettfang	Fettpumpe	0,18
	Trinkwasserpumpe	11,0
Sandfang	Mammutpumpe	11,0
	Gebläse	7,5
Rechenanlage	Rührwerk	0,55
	Transportschnecke – Sand	1,5
	Transportschnecke – Rechengut	1,5
	Austragsschnecke – Sand	1,5
	Waschpresse	3,81
	Rechen	2,0
Rechengebäude	Zuluft	2,2
	Abluft	2,7
	Biofilter 1	2,55
	Biofilter 2	2,55
Vorklärung	Faulschlammpumpe 1	3,0
	Faulschlammpumpe 2	3,0
Schlammwässerung Zentrifuge	Krählwerk	0,37
	Biofilter 1	2,55
	Biofilter 2	2,55
	Zuluft SEH	4,4
	Abluft SEH	4,4
	Eindickerpumpe	8,8
	Rührwerk – Ansetzstation	5,5
	Zentrifuge – Trommelantrieb	45,0
	Zentrifuge – Schneckenantrieb	15,0
	Dünnschlammpumpe	5,5
	Belebungsbecken 1	Rührwerk 1
Rührwerk 2		2,3
Rührwerk 3		2,3
Rezirkulationspumpe		10,3
Belebungsbecken 2	Rührwerk 1	2,3
	Rührwerk 2	2,3
	Rührwerk 3	2,3
	Rezirkulationspumpe	7,5
Gebälsestation	Turboverdichter	150,0
	Fortlüfter 1	4,0
	Fortlüfter 2	4,0
	Rücklaufschlammpumpe 1	5,5
	Rücklaufschlammpumpe 2	5,5
	Überschussschlammpumpe 1	7,5
	Überschussschlammpumpe 2	7,5
Gasverdichter	Verdichter	2,5
Faulturm	Rührwerk 1	8,0
	Rührwerk 2	7,5
	Luftzumischer - Entschwefler	0,52
Pumpwerk – Faulturm	Dickschlammpumpe	7,5
	Dünnschlammpumpe	4,0
	Umwälzpumpe 1	7,5
	Umwälzpumpe 2	7,5

Verfahrensgruppe	Aggregat	Nennleistung [kW]
Generatorhalle BHKW	Zuluft G1	3,0
	Abluft G1	2,2
	Zuluft G2	3,0
	Abluft G2	2,2
Nachklärung 1	Antriebsmotor 1	0,55
	Antriebsmotor 2	0,55
	Rinnenreinigung groß	0,75
	Rinnenreinigung klein	0,75
Nachklärung 2	Antriebsmotor 1	0,55
	Antriebsmotor 2	0,55
	Rinnenreinigung groß	0,75
	Rinnenreinigung klein	0,75
Brauchwasserpumpwerk	Pumpe	17,0

Da für keines der Aggregate eine gesonderte Energieverbrauchsmessung erfolgt, wurden die Energieverbräuche der Aggregate auf Grundlage der Motor-kenndaten sowie der jährlichen Betriebsstunden wie folgt gemäß DWA-A 216 bestimmt:

$$E_{el} = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot t$$

mit

E_{el} elektrischer Energiebedarf, kWh
 t Betriebsdauer, h
 U elektrische Spannung, V
 I elektrische Stromstärke, A
 $\cos \varphi$ Phasenwinkel

Bei Motoren, die in Teillast betrieben wurden, erfolgten sowohl beim Motorwirkungsgrad als auch beim Faktor $\cos \varphi$ Abminderungen. Die so berechneten Stromverbräuche wurden für relevante Verbraucher durch Verbrauchsmessungen über 24 h validiert.

Über die Differenz zwischen den berechneten Verbräuchen zu dem tatsächlichen Gesamtstromverbrauch wurde der Stromverbrauch sonstiger Verbraucher ermittelt. Hierunter fallen u. a. Heizung, Beleuchtung, Lüftung und EDV.

In Abbildung 3 sind die Anteile der Verfahrensgruppe am Gesamtverbrauch der Kläranlage dargestellt. Die gesamte Verbrauchermatrix ist in Beilage 3 dargestellt.

Anlagenspezifischer Stromverbrauch der Verbandskläranlage Schwandorf-Wackersdorf

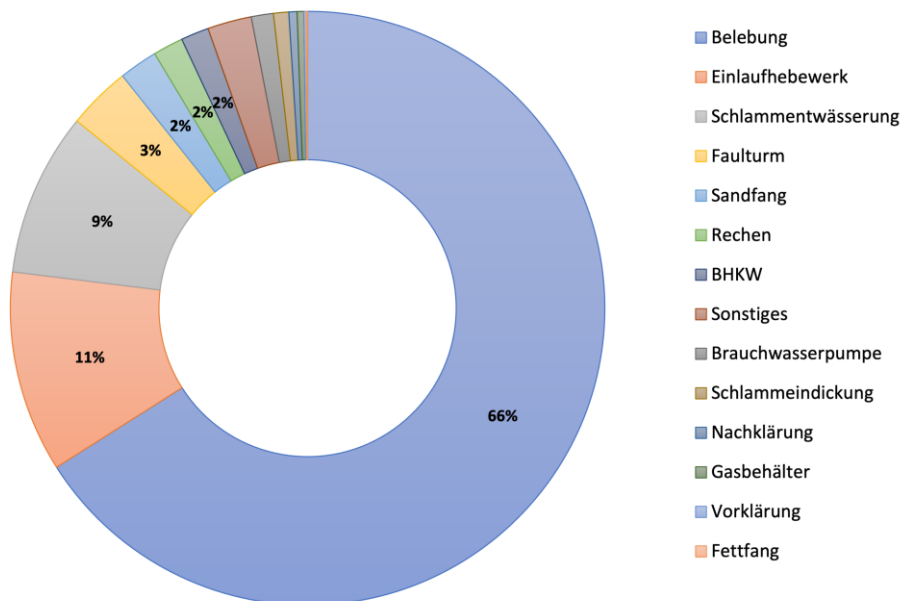


Abbildung 3: Verteilung des Stromverbrauchs der Anlagenteile, ausgewertet für das Jahr 2022

5.2 Wärmebedarf

Der Wärmebedarf auf der Kläranlage ist vorwiegend durch den Betrieb der Faulung bedingt, wofür der Schlamm auf die Faulraumtemperatur aufgeheizt werden muss. Zusätzlich sind die Abstrahlverluste der Faulbehälter und Rohrleitungen zu kompensieren. Abhängig von der Außentemperatur werden darüber hinaus folgende Gebäude beheizt.

- Einlaufhebewerk
- Rechengebäude
- Schlammwässerung
- Aufgangsturm (Faulturm)
- Heizgebäude
- Generatorenhalle
- Betriebsgebäude
- Werkstatt
- Gebläsehalle

Ebenfalls ist Wärme für die Warmwasserbereitung erforderlich.

Der Wärmebedarf der Betriebsgebäude betrug im Jahr 2022 336.000 kWh/a. Insgesamt beträgt der Wärmebedarf der Kläranlage gemäß Wärmebilanz ca. 2.170.000 kWh/a (Abbildung 4). Der berechnete Wärmebedarf für die Faulung basiert auf der gemessenen Faulraumtemperatur, daher ist der Wärmebedarf für die Schlammwässerung im Sommer erhöht. Somit kann die Faulung als Wärmespeicher zur vollständigen Nutzung der BHKW-Abwärme genutzt werden.

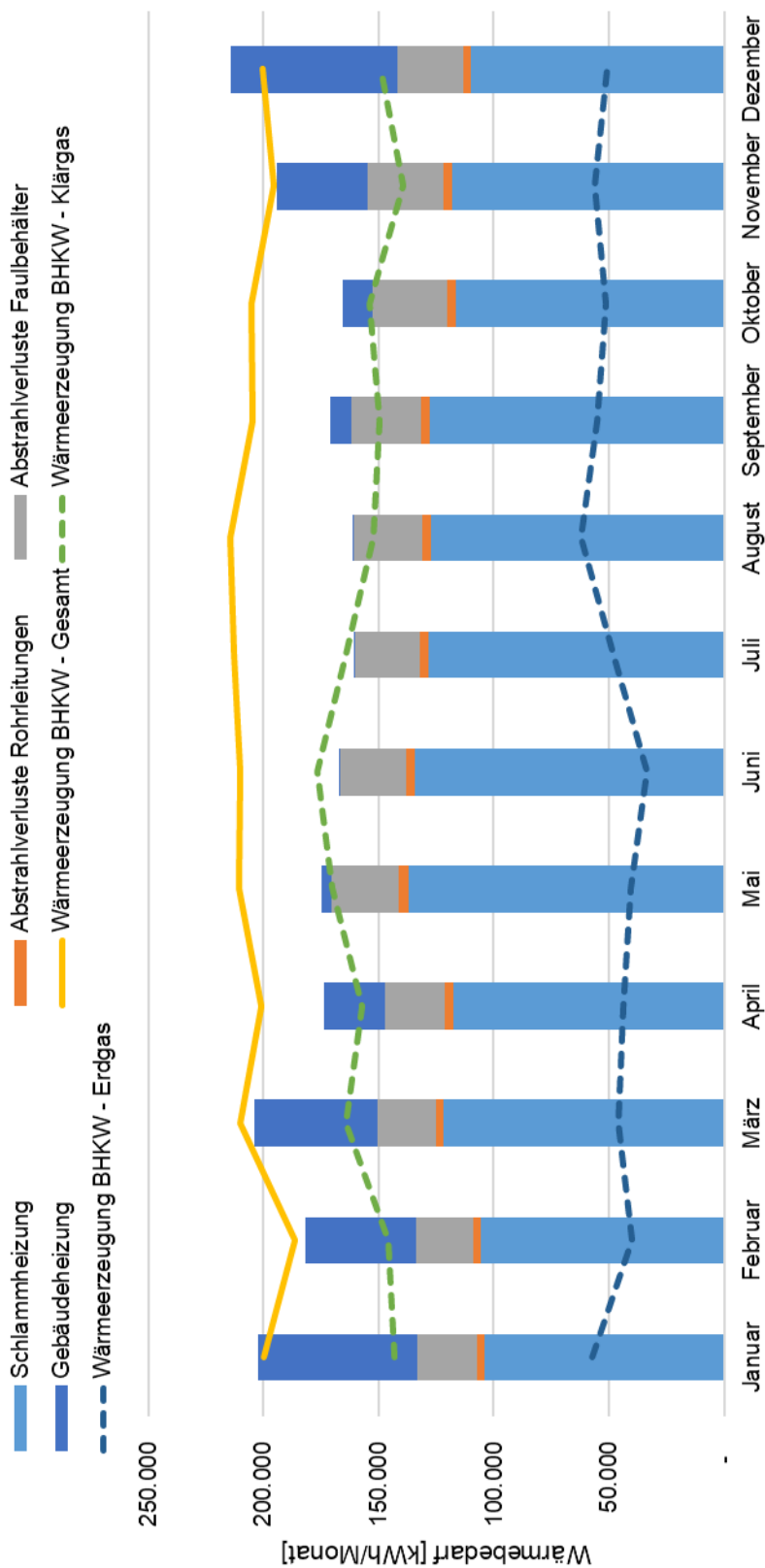


Abbildung 4: Wärmebilanz der Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf

5.3 Anlagenbezogene Idealwerte

In diesem Kapitel werden die anlagenbezogenen Idealwerte der einzelnen Aggregategruppen anhand der Vorgaben des DWA-A 216 abgeschätzt, um daraus Hinweise für die energetische Optimierung zu erhalten. Die Berechnung ist der Beilage 4 zu entnehmen.

Die Reihenfolge der nachfolgend beschriebenen Verfahrensgruppen ist entsprechend der Fließrichtung des Abwassers gewählt.

5.3.1 Einlaufhebewerk

Das anfallende Abwasser wird im Zulauf über 3 Förderschnecken auf das Niveau der Kläranlage gefördert. Der Idealwert der Zulaufschnecken ist von der zu fördernden Abwassermenge, der Förderhöhe sowie dem spezifischen Stromverbrauch abhängig. Gemäß DWA-A 216 liegt der spezifische Stromverbrauch zwischen 4,5 und 5,4 Wh/(m³·m). Der Idealwert des Zulaufhebewerkes ergibt sich somit zu

$$E = 4,6 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}} * 4.985.334 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} * 8,50 \text{ m} = 194.927 \text{ kWh/a}$$

Bei einem aktuellen Verbrauch von 197.100 kWh/a ergibt sich kein Einsparpotenzial.

5.3.2 Rechen

Gemäß DWA-A 216 liegt der spezifische Idealwert für eine Rechanlage zwischen 0,05 und 0,1 kWh/(E·a). Der mittlere anlagenspezifische Idealwert beträgt somit

$$E = 0,06 \frac{\text{kWh}}{\text{E} \cdot \text{a}} * 82.800 \text{ E} = 4.968 \text{ kWh/a}$$

Bei dem derzeitigen Verbrauch von 2.648 kWh/a ergibt sich kein relevantes Einsparpotenzial.

5.3.3 Sandfang

Das relevanteste Aggregat des Sandfangs ist das Sandfanggebläse aufgrund dessen hoher Betriebsdauer (und Leistung). Die Mammutpumpe für den Sandklassierer wurde nicht weiter betrachtet, da hier aufgrund der geringen Betriebsdauer und physikalischen Zwängen wenig Optimierungspotenzial zu erwarten ist.

Gemäß DWA-A 216 errechnet sich der anlagenspezifische Idealwert für das Sandfanggebläse nach

$$E_{SFG} = \frac{q_{L,SF} \cdot V_{SF} \cdot \Delta p \cdot t}{\eta_{ges} \cdot 367} [kWh/a]$$

mit

$q_{L,SF}$ spezifischer Lufteintrag 0,5 bis 1,3: hier gewählt 0,7 $m^3_{Luft}/(m^3_{Volumen} \cdot h)$

V_{SF} Volumen des Sandfangs: hier 270 m^3

Δp Einblastiefe plus Druckverlust: hier 4,5 m

η_{Ges} Wirkungsgrad Drehkolbengebläse 0,55 bis 0,62: hier gewählt 0,59

$$E_{SFG} = \frac{0,7 \cdot 270 \cdot 4,5 \cdot 8.760}{0,59 \cdot 367} = 34.702 [kWh/a]$$

als spezifischer Wert ergibt sich hier

$$e_{SFG} = 44.617 / 83.000 = 0,44 \text{ kWh}/(E \cdot a)$$

In der Verbrauchsmatrix wurde ein Wert von 32.850 kWh/a berechnet. Somit ergibt sich im Bereich des Sandfanggebläses kein Einsparpotenzial.

5.3.4 Räumervorklärbecken

Der spezifische Stromverbrauch eines Räumers ist abhängig von dessen elektrischer Leistung, der Laufzeit sowie der Anzahl an Becken. Der Idealwert ergibt sich zu

$$E = 0,7 \text{ kW} * 1.095 \frac{h}{a} * 2 \text{ St} = 1.423 [kWh/a]$$

Der aktuelle Verbrauch der Vorklärbeckenräumer liegt bei 172 kWh/a. Somit ergibt sich im Bereich des Vorklärbeckenräumers kein Einsparpotenzial.

5.3.5 Primärschlammumpfen Vorklärbecken

Der spezifische Stromverbrauch einer Pumpe ist abhängig von deren spezifischen Energieverbrauch, der zu fördernden Schlammmenge und der geodätischen Förderhöhe. Bei einem spezifischen Energieverbrauch von 3,6 bis 4,2 $Wh/(m^3 \cdot m)$ ergibt sich ein Idealwert von

$$E = \frac{3,8 \frac{Wh}{m^3 \cdot m} * 38.582 \frac{m^3}{a} * 5,5 \text{ m}}{1.000} = 806 [kWh/a]$$

Der aktuelle Verbrauch der Primärschlammumpfen liegt bei 1.971 kWh/a. Das Einsparpotenzial ist aufgrund der geringen Differenz von 1.165 kWh/a zu vernachlässigen.

5.3.6 Belüftung, Rührwerke

Auf Grundlage der mittleren Frachten im Zulauf der biologischen Stufe (Tabelle 3) wurde für den IST-Zustand die erforderliche Sauerstoffzufuhr bestimmt, um den idealen Energieverbrauch der Belüftung zu berechnen. Die gesamte Berechnung der Belebungsanlage gemäß DWA-A 131 (2016) befindet sich in Beilage 2.

Tabelle 3: Mittlere Zulauffrachten der Kläranlage Schwandorf im IST-Zustand

	Fracht kg/d
CSB	9.940
TS	5.800
TKN**	920
NH ₄ -N***	735
P _{ges}	210

* Annahme 70 g/(E·d) gem. (ATV-DVWK-A 198)

** Annahme: TKN = GesN im Zulauf

*** Annahme 70 % von TKN

Der Energieverbrauch der Belüftung wurde gemäß DWA-A 216 wie folgt ermittelt:

$$E_{Bel} = \frac{SOTR * \Delta p * t * 2,72}{SSOTR * \eta_{ges} * h_d}$$

mit

SOTR Standard-Sauerstoffzufuhr [kg/h] im Mittel, hier 287 kg/h je Belebungsbecken

Δp Druckdifferenz am Gebläse in m Wassersäule [m]

t jährliche Dauer der belüfteten Phasen [h/a]

SSOTR spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr [g/(m³·m)], hier angesetzt 19 g/(m³·m)

η_{ges} Gesamtwirkungsgrad, hier angesetzt 0,79 für effiziente Turboverdichter mit Hochfrequenzmotor

h_d Einblastiefe [m]

Für die beiden Belebungsbecken ergibt sich entsprechend der Idealwert von 1.013.400 kWh/a bzw. 12,2 kWh/(E·a). Somit liegt der Ideal-Wert geringfügig über dem Ist-Wert von 11,8 kWh/(E·a).

Die im Belebungsbecken installierten Rührwerke unterschreiten mit einem Energiebedarf von 108.799 kWh/a bzw. 1,31 kWh/(E·a) den Idealwert von

1,43 kWh/(E·a), dementsprechend ist für diese Aggregate kein Optimierungspotenzial vorhanden.

5.3.7 Rezirkulationspumpen

Gemäß dem Betriebstagebuch wurden im Jahr insgesamt ca. 16.000.000 m³/a Abwasser in der Belebung rezirkuliert.

Die Förderhöhe wurde auf Grundlage der Bestandspläne mit 0,7 m abgeschätzt. Hieraus ergibt sich ein Idealwert von 41.440 kWh/a bzw. 0,50 kWh/(E·a). Dieser wird derzeit mit 0,59 kWh/(E·a) leicht überschritten. Durch den Tausch der bestehenden Pumpen durch effizientere Aggregate ließen sich somit rund 7.300 kWh/a einsparen. Aufgrund des geringen Einsparpotenzials wird der Austausch der Pumpen aktuell jedoch nicht empfohlen.

5.3.8 Nachklärung

Der Betrieb der beiden Nachklärbecken verursacht einen Strombedarf von ca. 8.034 kWh/a oder 0,10 kWh/(E·a).

Die relevanten Verbraucher an den Nachklärbecken sind die Antriebe der Räumler. Der Idealwert für die Räumler der beiden Nachklärbecken liegt bei einem 24-Stunden-Betrieb gemäß DWA-A 216 bei rund 15.100 kWh/a. Somit liegt der Stromverbrauch der gesamten Nachklärung bereits unterhalb des Idealwerts. Es liegt somit kein Einsparpotenzial vor.

5.3.9 Rücklaufschlammumpen

Gemäß dem Betriebstagebuch der Kläranlage wurden im Jahr 2020 6.957.877 m³/a Rücklaufschlamm gefördert.

Die Förderhöhe wurde auf Grundlage der Bestandspläne mit 1,5 m abgeschätzt. Hieraus ergibt sich ein Idealwert von rund 37.900 kWh/a bzw. 0,46 kWh/(E·a). Dieser wird derzeit mit 0,58 kWh/(E·a) überschritten. Es liegt ein geringes Einsparpotenzial von 9.936 kWh/a vor. Zur Erneuerung der Rücklaufschlammumpen steht aufgrund des geringen Energiesparpotenzials maximal eine Investitionssumme von ca. 21.000 € (brutto inkl. Nebenkosten) zur Verfügung, um ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von 1 zu erreichen (siehe Beilage 12). Da für die Erneuerung der Rücklaufschlammumpen von höheren Investitionskosten auszugehen ist, wird die Optimierung als abhängige Maßnahme im Zuge der Erneuerung angesehen. Da im Wesentlichen je Belebungsbecken nur eine der drei Rücklaufschlammumpen in Betrieb ist und somit die zwei anderen Pumpen kaum Verschleiß aufweisen, wird die Erneuerung als mittelfristige Maßnahme angesetzt (7.2.2).

5.3.10 Überschussschlammumpen

Die zu fördernde Überschussschlammmenge lag im Jahr 2022 bei rund 123.216 m³/a. Die Förderhöhe von 5,7 m wurde über die Bestandspläne abgeschätzt. Bei einem mittleren spezifischen Energiebedarf von 3,7 Wh/(m³·m) gemäß DWA-A 216 liegt der Idealwert bei 2.600 kWh/a. Dieser Wert wird im

Betrieb mit 4.927 kWh/a überschritten. Aufgrund des geringen Einsparpotenzials werden die Überschussschlammumpen nicht weiter betrachtet.

5.3.11 Dickschlammpumpe Überschussschlamm

Die Dickschlammpumpe fördert den eingedickten Überschussschlamm vom Bandeindicker zur Faulung.

Die zu fördernde Dickschlammmenge lag im Jahr 2022 bei rund 47.690 m³/a. Die Förderhöhe von 20,0 m ergibt sich aus den Bestandsplänen. Bei einem mittleren spezifischen Energiebedarf von 3,7 Wh/(m³·m) gemäß DWA-A 216 liegt der Idealwert bei 3.530 kWh/a. Dieser Wert wird im Betrieb mit 4.927 kWh/a überschritten. Aufgrund des geringen Einsparpotenzials werden die Dickschlammumpen nicht weiter betrachtet.

5.3.12 Primärschlammeindickung (Krähwerk)

Das Krähwerk dient zur verbesserten Eindickung des anfallenden Primärschlammes im statischen Eindicker. Der aktuelle Verbrauch der Primärschlammeindickung liegt bei 2.269 kWh/a bzw. 0,03 kWh/(E·a).

Für den Betrieb eines Krähwerks ist von einer erforderlichen spezifischen Leistung von 0,5 W/m³ auszugehen (Pinnekamp, et al., 2017). Demnach entspricht der Idealwert für die Anlage bei einem Volumen des statischen Eindickers von 760 m³ und einer Betriebsdauer des Krähwerks von 24 h/d 3.329 kWh/a bzw. 0,04 kWh/(E·a). Somit ergibt sich im Bereich der Primärschlammeindickung kein Einsparpotenzial.

5.3.13 Überschussschlammeindickung

Die maschinelle Schlammeindickung des Überschussschlammes erfolgt mit einem Bandeindicker. Inklusiv Nebenaggregate benötigt die maschinelle Eindickung 4.360 kWh/a bzw. 0,05 kWh/(E·a).

Der Idealwert wurde auf Grundlage des eingedickten Dünnschlammvolumenstroms von 123.216 m³/a und des spezifischen Energiebedarfs von 0,2 kWh/m³ inkl. Nebenaggregate berechnet (Pinnekamp, et al., 2017). Der Idealwert beträgt 24.643 kWh/a bzw. 0,30 kWh/(E·a). Somit ergibt sich im Bereich der Schlammeindickung kein Einsparpotenzial.

5.3.14 Faulung

Der Stromverbrauch der Faulung ist abhängig vom Volumen, der spezifischen Leistungsdichte sowie der Laufzeit der Durchmischung. Bei einem aktuellen Volumen von je 1.320 m³ und einer Laufzeit von 2.920 h/a ergibt sich ein Idealwert von 34.689 kWh/a. Der aktuelle Verbrauch der Faulung liegt bei ca. 53.000 kWh/a und überschreitet den Idealwert um rund 18.000 kWh/a. Zur Optimierung der Faulung steht aufgrund des vergleichsweise geringen Energiesparpotenzials maximal eine Investitionssumme von ca. 54.000 € (brutto inkl. Nebenkosten) zur Verfügung, um ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von 1 zu erreichen (siehe Beilage 12). Da für den Austausch der Rührwerke von höheren

Investitionskosten auszugehen ist, erfolgt die Optimierung als abhängige Maßnahme im Zuge der Erneuerung.

5.3.15 Schlammwässerung

Die Schlammwässerung unter Einsatz einer Zentrifuge verbraucht inklusive Beschickungspumpen und Flockungshilfsmittelaufbereitung 97.700 kWh/a bzw. 1,18 kWh/(E·a).

Bei einem Feststoffanfall von 911 Mg TM/a und einem spezifischen Energieverbrauch von 90 kWh/Mg TM beträgt der Idealwert 81.990 kWh/a bzw. 0,99 kWh/(E·a). Der Verbrauch liegt folglich mit 0,19 kWh/(E·a) geringfügig über dem Idealwert. Da die Anlage erst kürzlich neu installiert wurde, ist nicht davon auszugehen, dass im Realbetrieb ein relevantes Einsparpotenzial vorliegt.

5.3.16 Brauchwasseranlage

Der Brauchwasserbedarf der Kläranlage liegt aktuell bei ca. 24.000 m³/a. Bei einem spezifischen Energiebedarf der Pumpe von 0,4 kWh/m³ ergibt sich ein Idealwert von 9.000 kWh/a. Dieser wird aktuell mit 21.600 kWh/a überschritten. Nach Rücksprache mit dem Kläranlagenpersonal gab es in diesem Bereich bereits Gespräche mit Anlagenbauern. Daraus ergab sich, dass es für den aktuellen Betrieb keine Alternative zu dem bestehenden Brauchwasserpumpwerk gibt.

5.3.17 Zusammenstellung des Einsparpotenzials

In Tabelle 4 und Abbildung 5 sind die ermittelten Ist-Energieverbräuche mit den anlagenspezifischen Idealwerten nach DWA-A 216 und dem Einsparpotenzial zusammengefasst.

Der derzeitige spezifische Ist-Verbrauch liegt mit 21,5 kWh/(E·a) knapp unterhalb des spezifischen Ideal-Verbrauchs der Anlage von 21,6 kWh/(E·a). Somit wird die Anlage bereits sehr energieeffizient betrieben.

Tabelle 4: Zusammenfassung des IST-Verbrauchs, des idealen Verbrauchs gemäß DWA-A 216 und des daraus resultierenden Einsparpotenzials

Verfahrensgruppe	IST-Verbrauch	Spez. Ist-Verbrauch	Ideal-Verbrauch	Spez. Ideal-Verbrauch	Spez. Einsparpotenzial	Einsparpotenzial
	kWh/a	kWh/(E-a)	kWh/a	kWh/(E-a)	kWh/(E-a)	kWh/a
Belüftung, Belebungsbecken	975.864	11,79	1.013.440	12,2	0,0	0
Einlaufhebewerk	197.100	2,38	194.927	2,4	0,0	2.173
Rührwerke, Belebungsbecken	108.799	1,31	118.260	1,43	0,0	0
Filter- und Lüftungsanlagen	100.652	1,22	100.652	1,22	0,0	0
Schlammentwässerung	96.953	1,18	81.990	0,99	0,2	15.927
Faulturm	52.998	0,64	34.690	0,42	0,2	18.308
Rezirkulationspumpen	48.728	0,59	41.440	0,50	0,1	7.288
Rücklaufschlammumpen	48.180	0,58	37.926	0,46	0,1	10.254
Sonstige Verbraucher	43.185	0,52	43.185	0,52	0,0	0
Sandfanggebläse	32.932	0,40	34.702	0,42	0,0	0
Brauchwasseranlage	21.624	0,26	9.000	0,11	0,2	12.624
Nachklärbecken	8.043	0,10	15.148	0,18	0,0	0
Gasverdichter	6.570	0,08	6.570	0,08	0,0	0
Dickschlammumpen	4.928	0,06	3.529	0,04	0,0	1.398
Überschussschlammumpen	4.928	0,06	2.613	0,03	0,0	2.314
Mammutpumpe	4.818	0,06	4.818	0,06	0,0	0
Überschussschlammeindickung	4.359	0,05	24.643	0,30	0,0	0
Verladesystem (Schlamm)	3.295	0,04	3.295	0,04	0,0	0
Rechen	2.648	0,03	4.968	0,06	0,0	0
Dünnschlammumpen	2.628	0,03	2.628	0,03	0,0	0
Primärschlammeindickung (Krählwerk)	2.269	0,03	3.329	0,04	0,0	0
Pumpen, Vorklärbecken	1.971	0,02	806	0,01	0,0	1.165
Fettfang	1.404	0,02	1.404	0,02	0,0	0
Trinkwasserpumpe	602	0,01	602	0,01	0,0	0
Entwässerungspumpe	569	0,01	569	0,01	0,0	0
Kompressor, Werkstatt	438	0,01	438	0,01	0,0	0
Räumer, Vorklärbecken	172	0,00	1.424	0,02	0,0	0
Gesamt	1.776.657	21,5	1.786.996	21,6	0,9	71.451

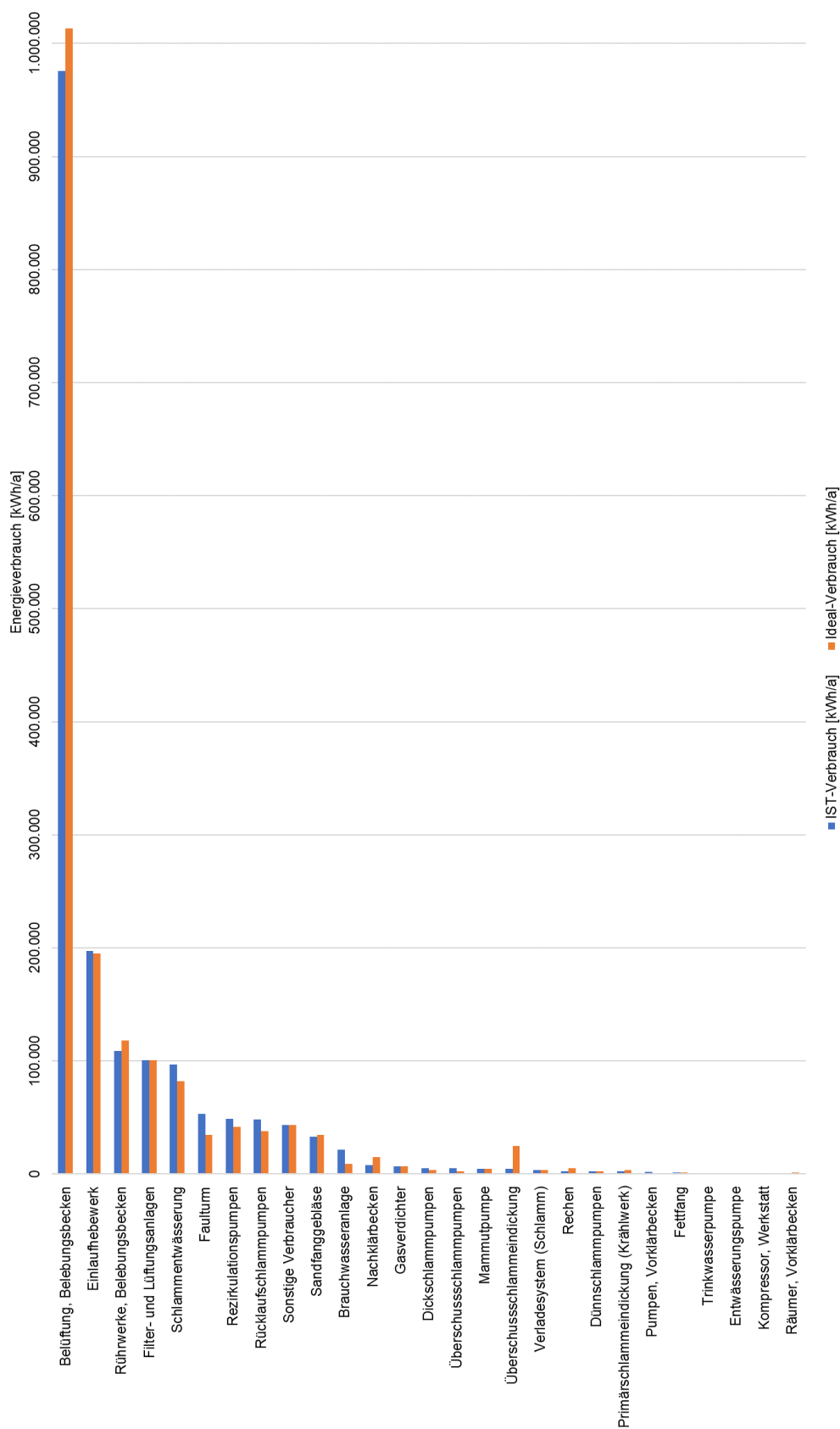


Abbildung 5: Zusammenfassung des IST-Verbrauchs, des idealen Verbrauchs gemäß DWA-A 216 und des Einsparpotenzials

5.4 Eigenversorgung

5.4.1 Strom

Blockheizkraftwerke

Im Auswertungszeitraum 2021 bis 2022 fiel auf der Kläranlage 585.000 Nm³/a Faulgas an. Dieses wurde mittels des bestehenden BHKWs (vorwiegend BHKW 2015) in ca. 1.114.000 kWh/a Strom umgewandelt. Dies entspricht rund 62 % des Stromverbrauchs der Kläranlage (Abbildung 6).

Zusätzlich zum Klärgas wurde im Auswertungszeitraum durchschnittlich 149.000 m³/a Erdgas (entspricht 1.531.000 kWh/a) über die Stadtwerke Amberg bezogen, welches in den bestehenden BHKWs genutzt wurde. Hierbei wurden ca. 375.000 kWh_{el}/a Strom erzeugt. Dies entspricht rund 21 % des Stromverbrauchs der Kläranlage. Ein geringer Anteil hiervon (<5 %) wird für die Teilnahme am Regelenergiemarkt erzeugt (BHKW 2011). Die Bilanz zur Gasnutzung, Strom- und Wärmeerzeugung mittels der BHKWs ist Beilage 5 zu entnehmen.

Photovoltaik

Derzeit werden auf der Kläranlage mit Hilfe von Dach-Photovoltaikanlagen ca. 279.000 kWh/a Strom erzeugt. Hiervon werden vor Ort ca. 123.000 kWh/a verbraucht, was 44 % des erzeugten PV-Stroms entspricht. Dies zeigt, dass die installierte Leistung (Peakleistung) zusammen mit der elektrischen BHKW-Leistung den Bedarf übersteigt, was zu einem vergleichsweise großen Anteil an Netzeinspeisung des PV-Stroms führt (siehe Abbildung 7).

Durch die Stromerzeugung der BHKWs sowie der PV-Anlage wird derzeit ein elektrischer Eigenversorgungsgrad von ca. 90 % erreicht. Dies ist im Vergleich zu anderen Anlagen ein hoher Wert. Gemäß DWA-A 216 haben 90 % der Kläranlagen einen geringeren Eigenversorgungsgrad. Es ist jedoch festzuhalten, dass der hohe Eigenversorgungsgrad nur durch die Nutzung von Erdgas erzielt wird. Ohne die Erdgasnutzung läge der elektrische Eigenversorgungsgrad bei ca. 69 %.

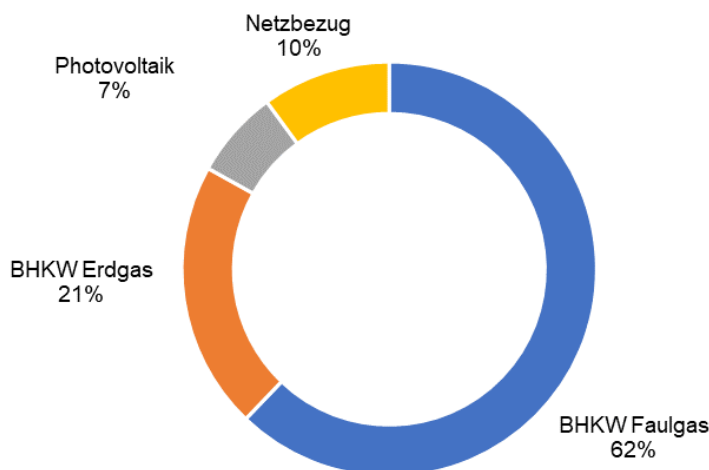


Abbildung 6: Anteile der verschiedenen Energiequellen zur Stromversorgung der Kläranlage, Auswertungsjahr 2022

Zeitliche Variabilität

Zur Beurteilung der zeitlichen Variabilität der Stromerzeugung und des Stromverbrauchs wurden 15-minütige Messdaten des Bayernwerks ausgewertet. Da für die Photovoltaik-Anlage nur monatliche Daten vorlagen, wurde die Erzeugung mittels der Software PV-Sol simuliert und anschließend skaliert, so dass der jährliche Eigenverbrauch der Abrechnung entspricht. In Abbildung 7 ist der Tagesverlauf im Jahresmittel dargestellt. Hierin ist zu erkennen, dass der Gesamtverbrauch der Kläranlage vergleichsweise konstant ist, was im Wesentlichen durch die Ausbaugröße der Kläranlage begründet ist. Ebenfalls ist erkennbar, dass die Stromerzeugung durch die BHKWs bei einer Regelbetriebsdauer eines der Aggregate von 24 h/d sehr konstant ist. Diese Betriebsweise deckt sich sehr gut mit dem nahezu konstanten Stromverbrauch. Dem gegenüber steht die zeitlich stark schwankende Stromerzeugung der PV-Anlage. Aufgrund der installierten Leistung wird hierdurch in den Mittagsstunden ein großer Anteil des erzeugten Stroms in das Netz eingespeist (vergleiche voriger Abschnitt).

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Jahresdauerlinien des gesamten Stromverbrauchs und des Netzbezugs dargestellt.

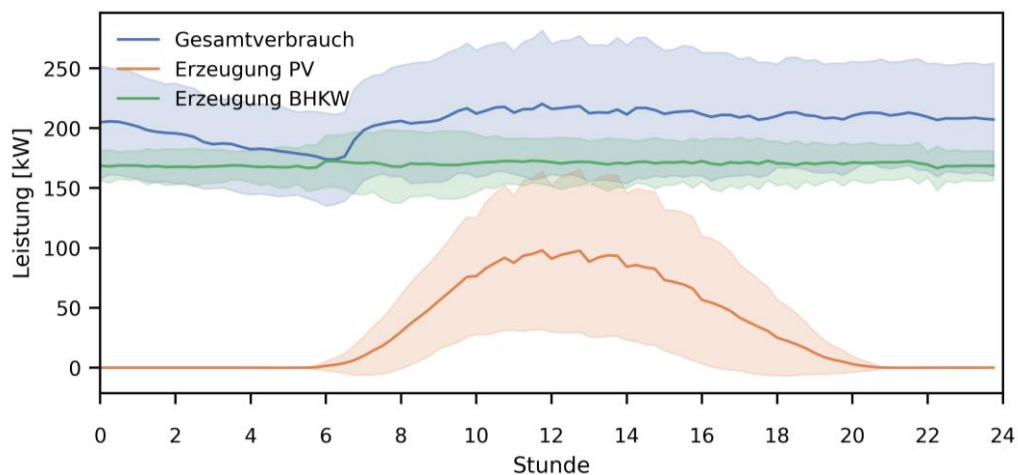


Abbildung 7: Mittlerer Tagesverlauf des Gesamtverbrauchs der Kläranlage und der Stromerzeugung durch die PV- und BHKW-Anlage, der transparente Bereich zeigt die Standardabweichung, Daten des Jahres 2022

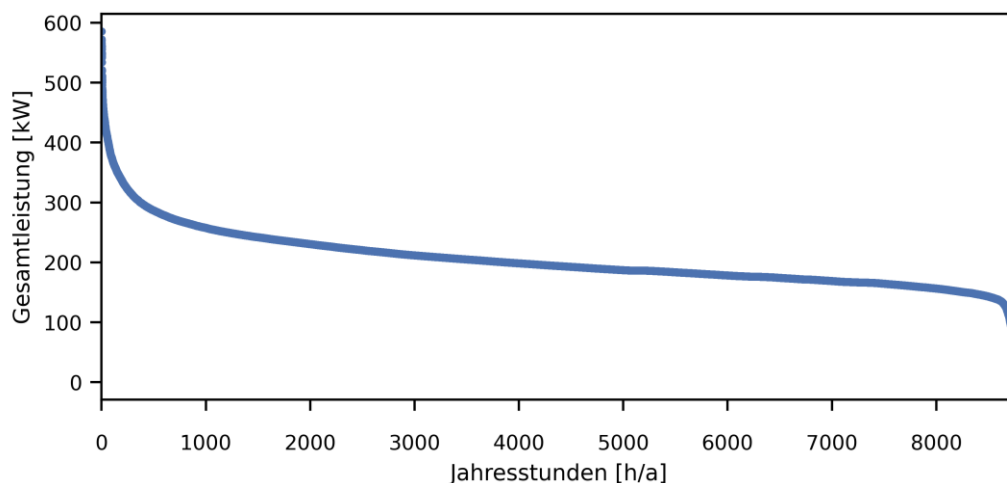


Abbildung 8: Jahresdauerlinie des gesamten Stromverbrauchs der Kläranlage, Daten des Jahres 2022

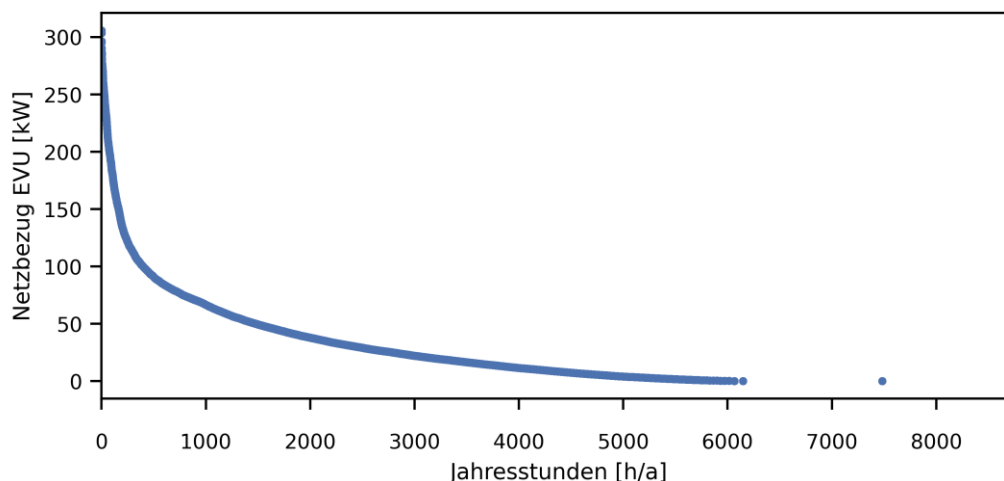


Abbildung 9: Jahresdauerlinie des Netzbezugs der Kläranlage, Daten des Jahres 2022

5.4.2 Wärme

Der Wärmebedarf wird auf der Kläranlage vollständig durch die Abwärme der BHKWs gedeckt (vgl. Wärmebilanz in 5.2). Hiervon werden jedoch ca. 24 % durch die Nutzung von Erdgas gedeckt (586.000 kWh_{th}/a). Dies entspricht einem spezifischem externen Wärmebezug von 7,1 kWh/(E·a), was gemäß DWA-A 216 lediglich von ca. 10 % der untersuchten Kläranlagen überschritten wird (Abbildung 10). Der erhöhte externe Wärmebezug ist vorwiegend durch die Erdgasnutzung zur Stromerzeugung im BHKW und die daraus folgende erhöhte Faulraumtemperatur begründet (vgl. 5.4.1, 5.2).

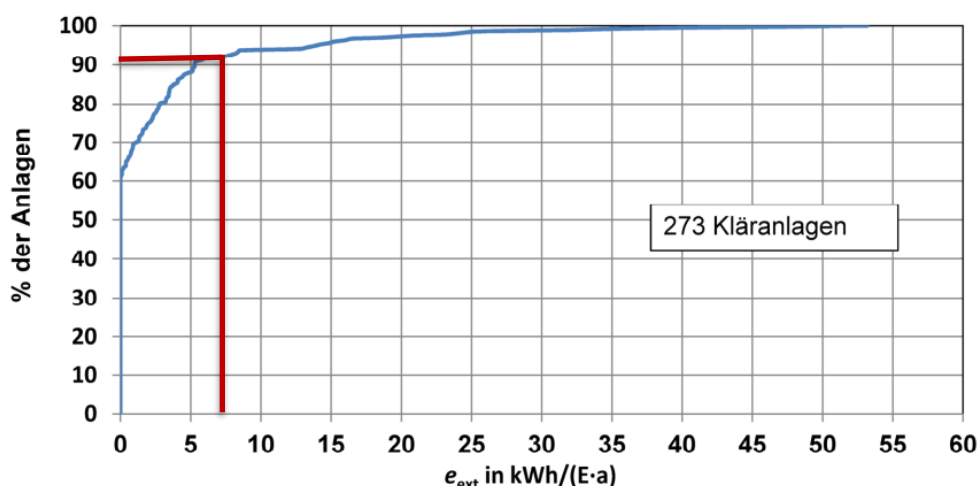


Abbildung 10: Spezifischer externer Wärmebezug der Kläranlage im Vergleich zu anderen Kläranlagen, Grafik: DWA-A 216

Der bestehende Fernwärmeanschluss von der nahegelegenen Biogasanlage wurde im Jahr 2022 nicht genutzt. Der Weiterbetrieb der Biogasanlage ist ferner nur bis Ende des Jahres 2026 gesichert.

6 Potenzialanalyse

6.1 Reduktion Erdgasbezug

Derzeit werden auf der Kläranlage ca. 149.000 m³/a Erdgas (1.531.000 kWh/a) zur Stromerzeugung mittels der BHKWs sowie zur Deckung des Wärmebedarfs genutzt. Dies erfolgt vorwiegend aus betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten, da bisher durch die vergleichsweise geringen Bezugskosten die Erdgasnutzung in den BHKWs bereits ohne Wärmebedarf wirtschaftlich ist. Ab einem Gaspreis von ca. 9,5 ct/kWh ist die Erdgasnutzung zur reinen Stromerzeugung jedoch nicht wirtschaftlich und sollte somit eingestellt bzw. reduziert werden, siehe Abbildung 11.

Ohne die Erdgasnutzung würde gemäß der Wärmebilanz ein jährliches Wärmedefizit von 318.000 kWh/a vorliegen (5.2). Bei der Berechnung wurde jedoch die Faulraumtemperatur beim derzeitigen Betrieb zugrunde gelegt. Hierbei wird aufgrund der (noch) wirtschaftlichen Stromerzeugung mit Erdgas die Abwärme zur Erhöhung der Faulraumtemperatur genutzt, so dass die Rückerstattung der Energiesteuer möglich ist. Durch Begrenzung der Faulraumtemperatur auf 40 °C in den Monaten, in denen ohne Erdgas ein Wärmedefizit vorliegt, reduziert sich das jährliche Wärmedefizit bei ausschließlicher Faulgasnutzung auf 240.000 kWh_{th}/a, was einem faulgasbasierten Eigenversorgungsgrad von 93 % entspricht. Der spezifische externe Wärmebezug würde hierdurch auf 2,9 kWh_{th}/(E-a) reduziert (vgl. 5.4.2). Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die elektrische Eigenversorgung entsprechend abnimmt.

Durch die Reduktion des Erdgasbezugs ist beim derzeitigen Strommix, mit einem Emissionsfaktor von 0,38 kgCO_{2e}/kWh_{el}, von einem positiven Effekt auf die Treibhausgasbilanz der Kläranlage auszugehen.

Das maximale Wärmedefizit im Monatsmittel liegt bei ausschließlich faulgasbasierter Wärmeherzeugung bei 61.000 kWh_{th}/Monat, was einer Wärmeleistung von 85 kW entspricht.

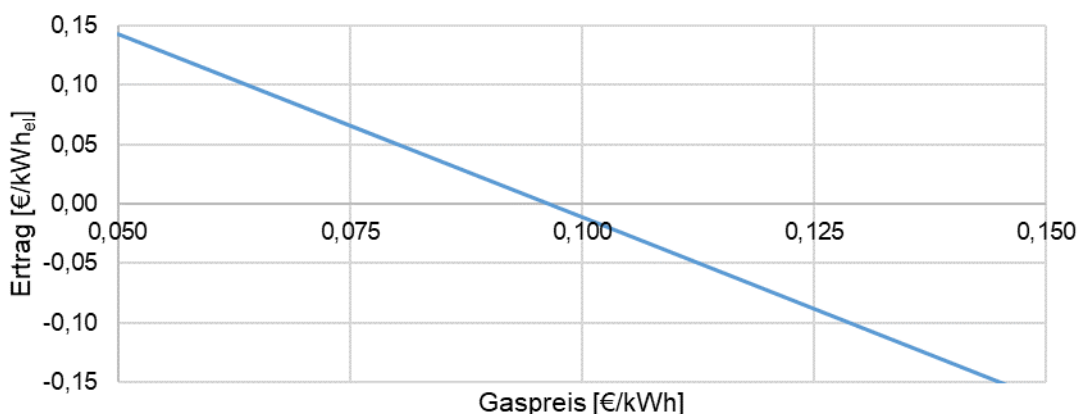


Abbildung 11: Betriebswirtschaftlicher Ertrag durch Reduktion der Strombezugskosten bei Erdgasnutzung im BHKW ohne Wärmebedarf, Berücksichtigung von Kosten für Gasbezug, Wartung des BHKWs und Strombezug

6.2 Nutzung erneuerbarer Energien

6.2.1 Faulgas

In der bestehenden Faulung mit 2 Faulbehältern wird bei der anaeroben Stabilisierung des Klärschlammes (Primär- und Überschussschlamm) Faulgas erzeugt. Die Faulbehälter mit je 1.319 m³ Volumen werden parallel beschickt. Der jährliche Gasanfall beträgt 584.000 m³/a, dies entspricht 19,3 L/EW/d, was ein vergleichsweise geringer spezifischer Gasanfall ist. Dies ist im Wesentlichen durch die Abwasserzusammensetzung begründet, da das mittlere Schlammalter von 21 d und die organische Raumbelastung von ca. 0,8 kg oTM_{abb}/(m³·d) auf eine deutliche Kapazitätsreserve hinweist. Der Faulschlamm wird mit einem mittleren Glühverlust von 56 % gut stabilisiert. Die Bemessungswerte gemäß DWA-M 368 sind in der Größenklasse ein Schlammalter von 16–22 d sowie eine organische Raumbelastung durch leicht abbaubare Stoffe von 1,2 bis 1,7 kg oTM_{abb}/(m³·d).

Die Faulung wird vorwiegend mesophil (30–45 °C) betrieben, jedoch erreicht die Faulraumtemperatur im Sommer mit bis zu 51 °C den thermophilen Bereich. Dies erfolgt, um die Abwärme der BHKWs vollständig zu nutzen (vgl. 7.1.2) und eine bessere Stabilisierung des Faulschlammes zu erreichen, wodurch dieser besser entwässerbar ist. Dies wirkt sich jedoch nicht relevant auf den Gasanfall aus, siehe Abbildung 12.

Derzeit wird die Faulung nicht kontinuierlich beschickt, der eingedickte Überschussschlamm wird lediglich werktags innerhalb von ca. 6 h/d zugegeben. Sofern zukünftig Umbaumaßnahmen an der Schlammbehandlung durchgeführt werden, sollte geprüft werden, ob die Beschickung verstetigt werden kann, was sich positiv auf den Gasertrag auswirken kann.

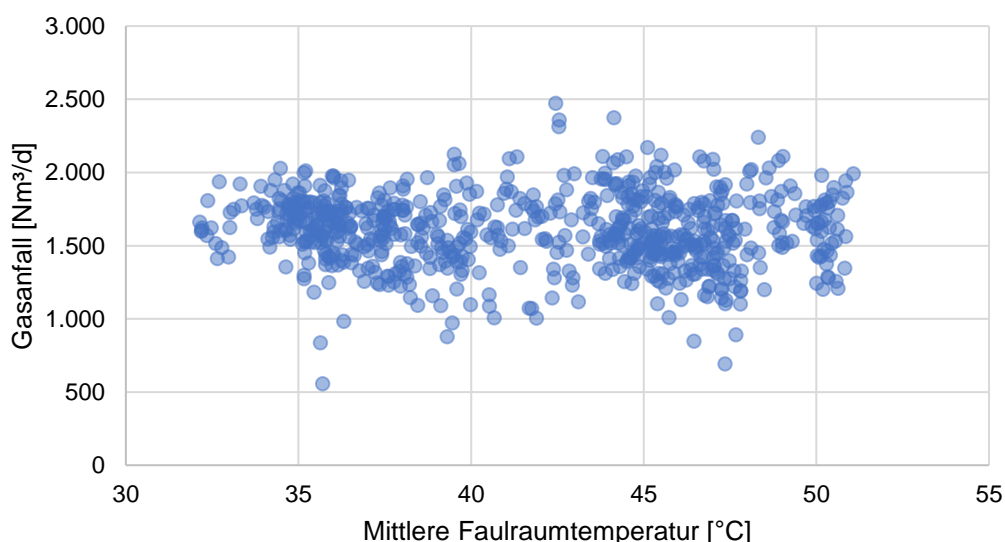


Abbildung 12: Täglicher Gasanfall in Abhängigkeit von der mittleren Faulraumtemperatur (Faulurm 1 und 2), Daten: 2021 und 2020

Zur Erhöhung des Faulgasanfalls ist prinzipiell die Nutzung von Co-Substraten bei freier Kapazität der Faulung möglich. Gemäß Abbildung 13 ist überschlägig

die Annahme von ca. 20-30 m³/d Co-Substrat möglich. Hierbei ist jedoch im Einzelfall die Qualität des Co-Substrats sowie die Auswirkung auf die Faulung zu prüfen, da diese ggf. negative Auswirkungen auf den Betrieb der Anlage wie z. B. die Entwässerbarkeit des Klärschlammes haben. Folglich ist die Nutzung von Co-Substraten nicht generell empfehlenswert, kann jedoch den Eigenversorgungsgrad (Strom und Wärme) erhöhen. Für die Annahme und Aufbereitung von Co-Substraten fallen Investitionskosten an, welche sich je nach Substrat z. T. deutlich unterscheiden. Da dem Betreiber derzeit keine mögliche Quelle bekannt ist, wurde auf eine weitere Betrachtung verzichtet.

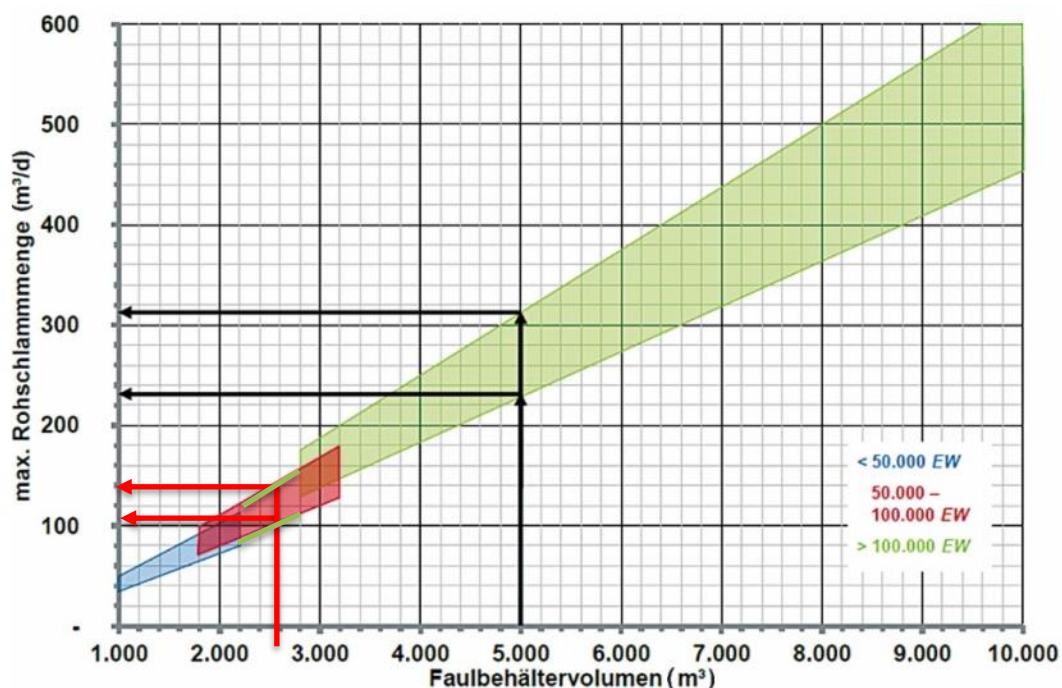


Abbildung 13: Bestimmung der freien Kapazität der Faulung über das Schlammalter (die Faulzeit), Quelle: Urban et al. 2017 zitiert in DWA-M 380

6.2.2 Biogas

In unmittelbarer Nähe zur Kläranlage befindet sich eine Biogasanlage, welche nachwachsende Rohstoffe als Substrat nutzt. Zwischen dieser und der Kläranlage existiert bereits eine Fernwärmeleitung. Der Weiterbetrieb der Anlage ist jedoch nach dem derzeitigen Stand nach 2026 nicht gesichert.

Laut Angabe des Betreibers fallen durchschnittlich 165 m³_N/h Biogas an, wovon im Sommer bis zu 100 % an die Kläranlage abgegeben werden könnten, im Winter reduziert sich dies auf 120 bis 140 m³_N/h, bei extremer Kälte auf 0–75 m³_N/h. Bei einem angenommenen Heizwert von 5 kWh/m³_N entspricht dies einer Brennstoffleistung von bis zu 825 kW beziehungsweise 0–700 kW im Winter. Bei der möglichen Biogasnutzung sollte eine Mindestabnahmemenge im Winter garantiert werden. Entsprechend der Wärmebilanz sind im Monat mit dem höchsten Bedarf ca. 85 kW_{th} erforderlich (Mittelwert), was einer Brennstoffleistung von 173 kW bzw. einem Biogasbedarf von 35 m³_N/h entspricht.

Das Biogas wird über eine technische Gaskühlung mit nachgeschaltetem Aktivkohlefilter gereinigt und ist folglich voraussichtlich geeignet, um in den BHKWs der Kläranlage genutzt zu werden. Für weitere Aussagen sind jedoch Gasanalysen und die Beurteilung durch den BHKW-Hersteller erforderlich. Ebenfalls ist zu klären wie der erforderliche Gasdruck realisiert wird und wo die Einbindung in das Gassystem der Kläranlage erfolgen kann.

Gemäß dem Betreiber der Biogasanlage ist von einem Biogaspreis von 0,45 €/m³_N auszugehen. Dies entspricht einem Biogaspreis von 0,09 €/kWh. Im Vergleich zu den bisherigen Erdgaspreisen von 0,05 €/kWh ist die Nutzung des Biogases nicht wirtschaftlich, insbesondere da darüber hinaus Investitionskosten für die Verlegung der ca. 750 m langen Gasleitung und für die Einbindung in das Gassystem anfallen. Auch angesichts der stark gestiegenen Erdgaspreise ist die Biogasnutzung auf der Kläranlage derzeit wirtschaftlich nicht empfehlenswert.

Um die Auswirkungen steigender Erdgaspreise zu untersuchen, wurde die Entwicklung der Betriebskosten zur Deckung des Wärmedefizits in Abhängigkeit des Erdgaspreises untersucht. Da davon auszugehen ist, dass die Bezugskosten für die Fernwärme und das Biogas proportional zum Erdgaspreis steigen, wurde dies bei der Berechnung entsprechend angesetzt. Es zeigt sich, dass ab einem Erdgaspreis von ca. 10,5 ct/kWh die Betriebskosten für den Bezug der Fernwärme aus der Biogasanlage geringer sind als für die Nutzung des Biogases auf der Kläranlage (Abbildung 14). Da hierfür keine Investitionskosten anfallen, ist der Bezug der Fernwärme wirtschaftlicher. Die Erdgasnutzung ist jedoch bis zu einem Preis von ca. 14 ct/kWh weiterhin die wirtschaftlichste Lösung zur Deckung des Wärmedefizits.

Aufgrund der beschriebenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist der Bezug von Biogas zur Nutzung auf der Kläranlage keine empfehlenswerte Maßnahme.

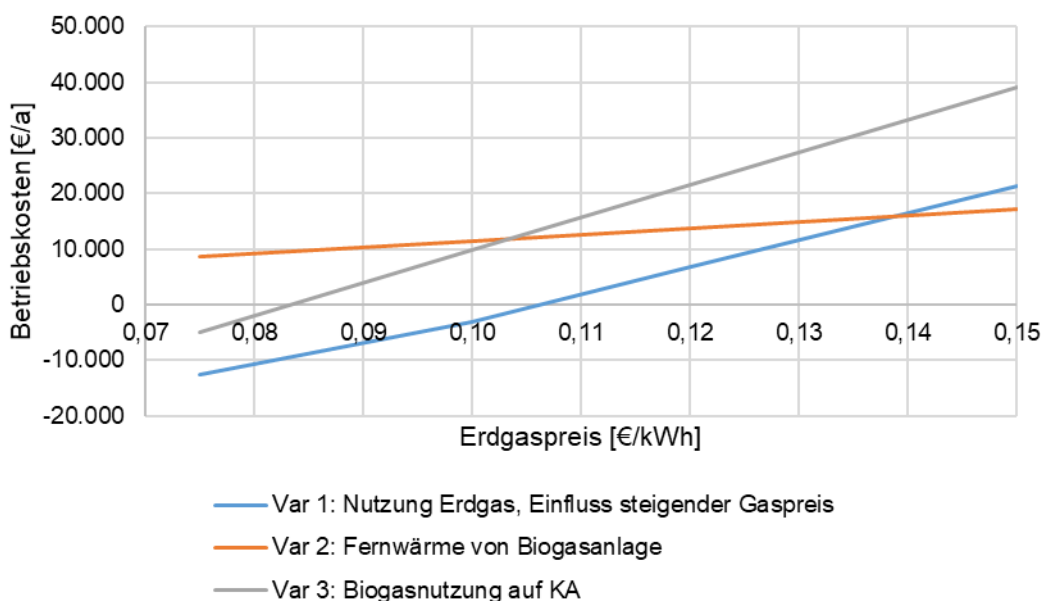


Abbildung 14: Auswirkung Anstieg des Erdgaspreises auf die Betriebskosten für die Deckung des Wärmedefizits im Winter

6.2.3 Photovoltaik

Bestand

Auf der Kläranlage bestehen bereits Aufdach-Photovoltaikanlagen mit einer Gesamt-Peakleistung von ca. 330 kWp. Die Anlagen sind vorwiegend in Nord- und Südausrichtung installiert, ein kleinerer Anteil ist in West-Ost-Ausrichtung montiert. Die Anlage wurde von einem externen Betreiber installiert, der den PV-Strom an die Kläranlage verkauft.

Da keine Beschreibung zur PV-Anlage vorlag, wurden die Modulfläche je Ausrichtung auf Grundlage des Luftbilds abgeschätzt entsprechend Tabelle 5. Zur Ermittlung der PV-Generationsenergie und dem Eigenverbrauchsanteil wurde die PV-Anlage anschließend in der Software PV-Sol simuliert, da lediglich Monatswerte zum PV-Ertrag verfügbar waren. Der Stromverbrauch der Kläranlage wurde hierbei mittels des 15-minütigen Stromverbrauchs aus dem Jahr 2022 berücksichtigt (Messung Bayernwerk). Der durch die BHKW-Erzeugung gedeckte Anteil des Verbrauchs wurde vom Gesamtverbrauch abgezogen, da eine relevante Änderung der Betriebsweise nicht empfohlen wird. Die Simulationsergebnisse zeigten eine ausreichend Übereinstimmung mit den Verbrauchsabrechnungen und wurden an diese angepasst gemäß der jährlichen Abrechnung.

Tabelle 5: Ausrichtung der bestehenden PV-Flächen

Ausrichtung	Anteil an PV-Fläche
Nord	41 %
Ost	9 %
Süd	41 %
West	9 %

Die bestehende Aufdach-PV-Anlage erzeugt derzeit 279.000 kWh/a, wovon 123.000 kWh/a von der Kläranlage verbraucht werden. Dies entspricht 44 % der erzeugten Energie. Dies zeigt, dass die Peakleistung zu hoch ist um Mittags den erzeugten Strom vorwiegend durch die Kläranlage zu nutzen. Ein großer Anteil des erzeugten Stroms wird in das Netz eingespeist (Abbildung 15).

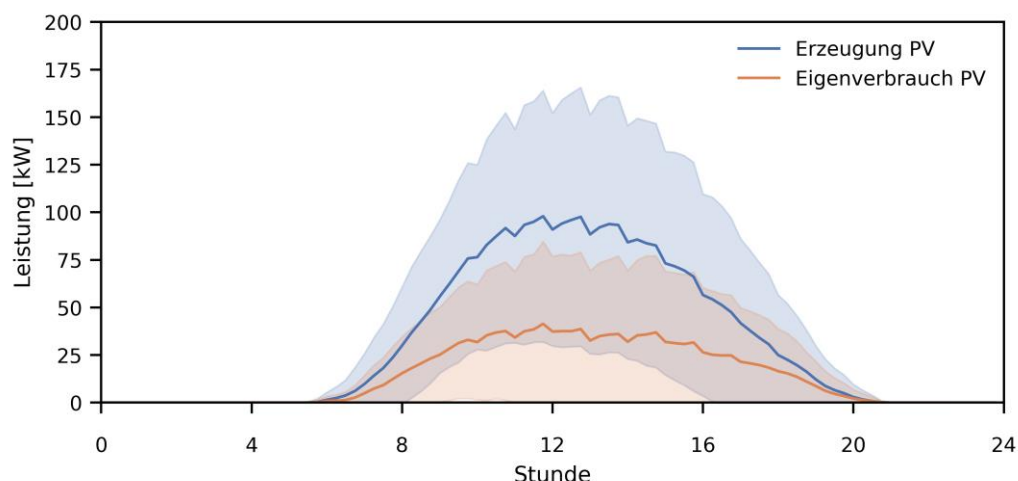


Abbildung 15: Tagesgang der Stromerzeugung durch die bestehende PV-Anlage sowie der Eigenverbrauch hiervon, Simulationsergebnis PV-Sol angepasst an Verbrauchsabrechnung 2022

Um die Netzeinspeisung zu reduzieren wurde der Einsatz eines Batteriespeichers geprüft. Zur Deckung des mittleren Stromverbrauchs in der Nacht durch den Batteriespeicher wurde eine Batteriekapazität von 280 kWh gewählt (100 kW Leistung). Hierbei wurde berücksichtigt, dass weiterhin ein BHKW konstant in der Nacht betrieben wird. Für den Batteriespeicher kann von Investitionskosten in Höhe von ca. 200.000 € (netto) ausgegangen werden.

Durch die Installation des Batteriespeichers würde der PV-Eigenverbrauchsanteil auf 74 % ansteigen. Die Amortisationsdauer für den Batteriespeicher beträgt aufgrund der PV-Strombezugskosten ca. 9 Jahre. Da Ende 2030 der Vertrag über den PV-Strombezug ausläuft und die PV-Anlage dann ihre Nutzungsdauer erreicht hat, kann die Maßnahme ohne ein Konzept zum Austausch der PV-Anlage nicht empfohlen werden.

Neubau Freiflächenanlage

Da die derzeitigen Strombezugskosten des PV-Stroms deutlich über den Stromgestehungskosten einer PV-Freiflächenanlage liegen, wurde im Folgenden der Neubau einer Freiflächenanlage geprüft. Auf dem Grundstück der Kläranlage stehen hierzu potenzielle Flächen zur Verfügung.

Bei der Berechnung wurde mit zwei Varianten die Auswirkung der Ausrichtung der PV-Module untersucht. Die Anlagen wurden so bemessen, dass diese einen zum Bestand vergleichbaren PV-Eigenstromverbrauch ermöglichen.

Bei angenommenen spezifischen Investitionskosten von 1100 €/kWp beträgt die Amortisationsdauer für Variante 2a mit West-Ost-Ausrichtung 6,5 Jahre und für Variante 2b mit Süd-Ausrichtung 6,8 Jahre. Dies zeigt, dass durch die West-Ost-Ausrichtung bei geringerer Peakleistung und folglich geringeren Investitionskosten ein höherer Eigenverbrauchsanteil erzielt wird (Tabelle 6). Dies ist durch die gleichmäßigere Stromerzeugung über den Tagesverlauf begründet, welche

besser zum Verbrauchsprofil der Kläranlage passt. Bei der Berechnung wurde eine Überschusseinspeisung mit einer Vergütung von 3,5 ct/kWh angenommen.

Aufgrund der geringen Amortisationsdauer wird die Umsetzung der Maßnahmen kurz- bis mittelfristig empfohlen.

Der PV-Ertrag mit Eigenverbrauch und Netzeinspeisung der Variante 2a ist in Abbildung 16 dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Berechnung zu möglichen PV-Freiflächenanlagen

Variante	Ausrichtung	Peakleistung	PV-Generationsenergie	Eigenverbrauchsanteil
2a	West-Ost	240 kWp	233.000 kWh/a	57 %
2b	Süd	280 kWp	316.000 kWh/a	45 %

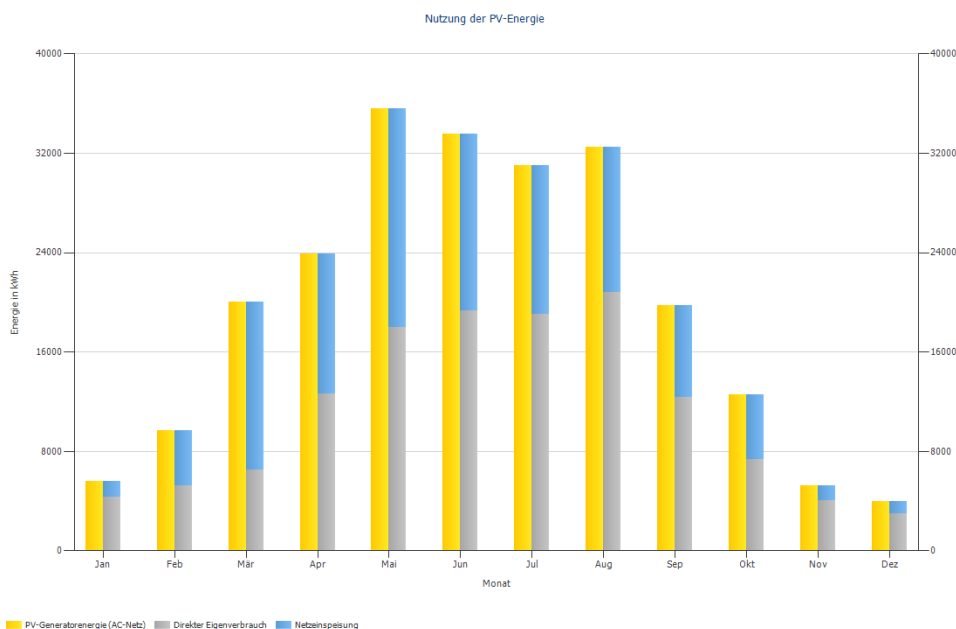


Abbildung 16: Ertrag der Freiflächen-PV-Anlage Variante 2a mit Eigenverbrauch und Netzeinspeisung

Der Flächenbedarf für die Freiflächenanlage kann inkl. Zuwegung mit ca. 10 m²/kWp angenommen werden. Somit ist für die Vorzugsvariante 2a ein Flächenbedarf von ca. 2.400 m² erforderlich. Eine mögliche Aufstellung ist in Abbildung 17 dargestellt. Bei der weiteren Planung ist zu beachten, dass keine Verschattung durch die nahegelegene Vegetation auftritt. Die Fläche nördlich der Nachklärbecken wurde als Erweiterungsfläche für die 4. Reinigungsstufe angenommen und daher als möglicher PV-Standort nicht berücksichtigt.



Abbildung 17: Mögliche Aufstellungsfläche für den Neubau einer Freiflächen-PV-Anlage, Quelle des Luftbilds: BayernAtlas

In Variante 2c wurde untersucht, wie durch den Einsatz eines Batteriespeichers der Eigenverbrauchsanteil gesteigert werden kann. Bei dieser Variante entspricht die Bemessung und Aufstellung der PV-Anlage der Variante 2a.

Um den mittleren Verbrauch in der Nacht durch den Batteriespeicher zu decken, wurde eine Batteriekapazität von 280 kWh gewählt (100 kW Leistung). Hierbei wurde berücksichtigt, dass ein BHKW konstant in der Nacht betrieben wird.

Durch den Einsatz des Batteriespeichers erhöht sich der PV-Eigenverbrauchsanteil auf 81 %. Der PV-Eigenverbrauch erhöht sich demnach auf 188.000 kWh/a. Der elektrische Eigenversorgungsgrad der Kläranlage steigt auf 92 %. In Abbildung 18 ist das Ergebnis der Berechnung dargestellt.

Für den Batteriespeicher kann von Investitionskosten in Höhe von ca. 200.000 € (netto) ausgegangen werden. Die Investition inklusive der oben beschriebenen PV-Freiflächenanlage amortisiert sich in ca. 9 Jahren und ist daher kurz- bis mittelfristig empfehlenswert.

Die gesamten Berechnungen zur Photovoltaik inklusive Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind der Beilage 6 zu entnehmen.

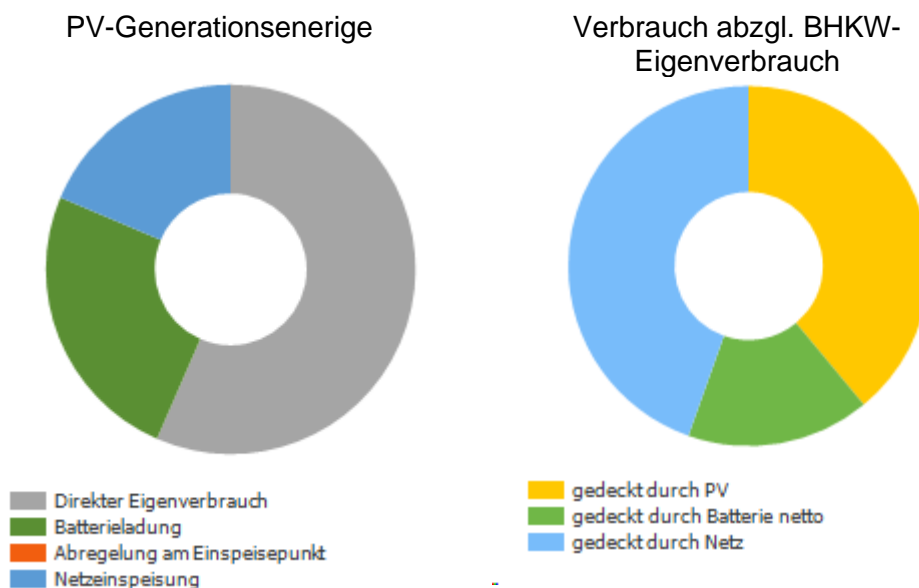


Abbildung 18: Ertrag und Nutzung des erzeugten Stroms der PV-Freiflächenanlage mit Batteriespeicher (Variante 2c)

6.2.4 Abwasserwärme

Die im Abwasser enthaltene Wärme kann mittels Abwasserwärmetauscher und Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung genutzt werden. Die Wärme kann sowohl im Zulauf als auch Ablauf zur Kläranlage entnommen werden. Die mögliche Entnahmemenge ist im Zulauf höher aufgrund der höheren Abwassertemperatur. Da sich die Reduktion der Zulufttemperatur jedoch negativ auf die Abwasserreinigung auswirken kann, wurde lediglich die Wärmeentnahme aus dem gereinigten Abwasser im Ablauf untersucht. Dies birgt ebenfalls betriebliche Vorteile aufgrund des geringeren Feststoffgehalts im Ablauf.

Die Wärmeentzugsleistung kann mit Hilfe nachfolgender Formel gemäß DWA-M 114 berechnet werden. Die Temperaturdifferenz wurde als üblicher Wert mit 3 K angenommen.

$$W_{ABW} = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T$$

mit

- W_{ABW} Wärmeentzugsleistung in kW
- c spezifische Wärmekapazität des Abwassers = 4,19 kJ/(kg·K)
- ρ Dichte des Abwassers, vereinfacht angenommen zu 1 kg/l
- Q Durchfluss in l/s
- ΔT Temperaturdifferenz infolge des Wärmeentzugs in K

Die Heizleistung der Wärmepumpe berechnet sich anschließend wie folgt:

$$P_{WP} = W_{ABW} \cdot (JAZ / (JAZ - 1))$$

mit

P_{WP} Heizleistung der Wärmepumpe in kW

JAZ Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe, angenommen mit 2,8

Entsprechend der täglichen Betriebsdaten des Jahres 2022 kann über eine Wärmepumpe eine Wärmemenge von bis zu 27.314 MWh/a bereitgestellt werden. Der jährliche Verlauf ist in Abbildung 19 dargestellt. Die mögliche Wärmemenge liegt erheblich oberhalb des Wärmebedarfs der Kläranlage von ca. 2.200 MWh/a (vgl. 5.2), was zeigt, dass die Abwasserwärmenutzung insbesondere in Verbindung mit einem kommunalen Wärmenetz großes Potenzial hat. Die ermittelten Daten wurden daher an das Klimaschutzmanagement der Stadt Schwandorf weitergeleitet.

In deutlich geringerem Umfang kann die Abwasserwärme jedoch auch zur Deckung des Wärmedefizits (ohne Erdgasnutzung) auf der Kläranlage genutzt werden. Da der Erdgasbetrieb der BHKWs bei Nutzung der Wärme wirtschaftlicher ist, wurde die Maßnahme nicht weiter betrachtet (vgl. 6.1 und 6.2.2). Bei Nutzung der Abwasserwärme zur Deckung des Wärmedefizits ohne Erdgasnutzung ist von einem zusätzlichen Stromverbrauch von 85.700 kWh/a auszugehen, welcher der Stromerzeugung beim Erdgasbetrieb der BHKWs gegenüber steht.

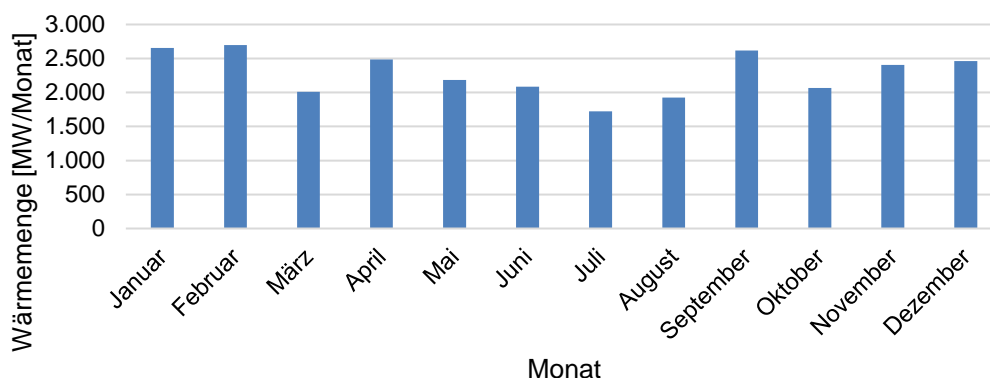


Abbildung 19: Verlauf der mittels einer Wärmepumpe bereitstellbaren Wärmemenge durch Abwasserwärmenutzung, Betriebsdaten des Jahres 2022

6.2.5 Wärme aus Faulschlamm

Aus dem Faulschlamm kann mit Hilfe eines Schlamm-Rekuperators (Schlamm-Schlamm-Wärmetauscher) Wärme zur Voraufheizung des Rohschlammes entzogen werden. Durch die Nutzung der Wärme aus dem Faulschlamm, kann das Wärmedefizit bei Reduktion der Erdgasnutzung in den BHKWs reduziert werden.

Die Berechnung der nutzbaren Wärmeleistung erfolgt analog zur Wärmeeinzugsleistung bei der Abwasserwärmenutzung, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, mit nachfolgenden Werten (Tabelle 7). Hierbei wurde die Temperaturdifferenz auf 10 K begrenzt, da die Entwässerbarkeit des Faulschlammes mit sinkender Temperatur abnimmt.

Tabelle 7: Bemessungsgrundlage Faulschlammwärmenutzung

Mittlerer Faulschlammanfall	135	m ³ /d
Faulschlammtemperatur	35	°C
Temperaturdifferenz infolge des Wärmeeinzugs	10	K
Dichte des Faulschlammes	1	kg/l
Spezifische Wärmekapazität des Schlammes	4,19	kJ/(kg·K)

Die nutzbare Wärmeleistung beträgt 65 kW_{th} bei dauerhafter Beschickung der Faulung. Hierdurch steht in den sechs Monaten, in denen ohne Erdgasnutzung ein Wärmedefizit vorliegt, eine Wärmemenge von ca. 280.000 kWh zur Verfügung. Somit könnte das gesamte Wärmedefizit ohne Erdgasnutzung gedeckt werden (bei reduzierter Faulraum-Solltemperatur, vgl. 6.1).

Es ist jedoch zu beachten, dass durch den Verzicht auf die Erdgasnutzung in den BHKWs zusätzliche Kosten für den Strombezug anfallen. Bei geschätzten Investitionskosten von ca. 285.000 € (brutto inkl. Nebenkosten) für die Schlammrekuperatoren inkl. verfahrenstechnischer und elektrischer Einbindung beträgt das Kosten-Nutzen-Verhältnis 0,7. Die Maßnahme weist eine Amortisationszeit von ca. 29 Jahren auf und ist daher wirtschaftlich nicht empfehlenswert (siehe Beilage 12). Hierbei ist darüber hinaus der erhöhte Stromverbrauch für die Schlammförderung in Folge der Druckverluste im Wärmetauscher unberücksichtigt. Ferner kann es je nach Schlammzusammensetzung zu erhöhten Wartungskosten durch Ablagerungen kommen.

Nichtdestotrotz ermöglicht der Einsatz von Schlammrekuperatoren den vollständigen Verzicht auf Erdgas zur Wärmeversorgung der Kläranlage, was sich beim Ansatz des derzeitigen Strommixes positiv auf die Treibhausgasbilanz der Anlage auswirkt.

6.2.6 Windkraft

Durch die Nutzung von Windkraft wäre es möglich die Eigendeckungsquote für Strom über den gesamten Tag wie auch jahreszeitlich zu verbessern, da PV nachts, wie auch im Winterhalbjahr keinen bzw. zu wenig Strom erzeugt. Aufgrund der geringeren genehmigungsrechtlichen Anforderungen stellen Kleinwindenergieanlagen (KWEA) eine vielversprechende Möglichkeit dar, um die Umsetzbarkeit am Standort zu verbessern und eine zeitnahe Realisierung zu ermöglichen.

Da sich für die verhältnismäßig niedrigen KWEA die Anströmverhältnisse stark auf den Ertrag und folglich die Wirtschaftlichkeit auswirken, sollten die örtlichen Windverhältnisse über einen repräsentativen Zeitraum gemessen werden (Pinnekamp, et al., 2017). Dies kann durch Messung der Windgeschwindigkeit in ca. 10 m über einen Zeitraum von mindestens drei Monaten erfolgen. Bei einer

Messung über ein Jahr können die gesamten jahreszeitlichen Effekte erfasst werden.

Gemäß Windenergie-Erlass (BayWEE) ist die Errichtung von Windenergieanlagen mit einer Gesamthöhe von bis zu 10 m verfahrensfrei, bis 50 m benötigt sie eine bauaufsichtliche Genehmigung und höhere Anlagen sind darüber hinaus immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtig.

Am Standort treten mittlere Windgeschwindigkeiten von 2,25 - 2,75 m/s in 10 m Höhe auf (Energie-Atlas Bayern, <https://www.karten.energieatlas.bayern.de>). Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe lässt sich über folgende Formel abschätzen.

$$v_h = v_{10} \cdot (h / 10)^g$$

mit

v_h	Windgeschwindigkeit in der Höhe h
v_{10}	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe
h	Höhe
g	Exponent in Abhängigkeit der Landnutzung, hier 0,16 für Ackerland

Für eine Beispielanlage mit 24 m Nabenhöhe ergibt sich eine mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 3,0 m/s. Hierbei kann die angesetzte Windturbine mit 10 kW Nennleistung einen Ertrag von 6.000 kWh/a erzielen.

Aufgrund der hohen Stromgestehungskosten von ca. 60 ct/kWh (netto) und der langen Amortisationszeit wurde die Windkraftnutzung nicht weiter berücksichtigt.

6.2.7 Wasserkraft

Aufgrund der geringen Höhendifferenzen innerhalb der Kläranlage wurde die Wasserkraftnutzung nicht betrachtet, da sie erfahrungsgemäß unter den örtlichen Begebenheiten nicht wirtschaftlich ist.

7 Optimierungsmaßnahmen

Die für die Kläranlage erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen werden nachfolgend unterteilt in:

- K Kurzfristige Maßnahmen, die entweder keine oder geringe Investitionen erfordern, hohe Energieeinsparungen ermöglichen oder zur Gewährleistung der Betriebssicherheit erforderlich sind
- M Mittelfristige Maßnahmen, die aufgrund der Energieeinsparung wirtschaftlich sind, jedoch entweder größere Investitionen erfordern oder aus betrieblichen Gründen zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll sind (z. B. bisher guter Zustand der Anlagenteile)
- L Langfristige Maßnahmen, die lediglich zur Energieeinsparung (noch) nicht wirtschaftlich sind und große Investitionen erfordern

7.1 Kurzfristige Maßnahmen

7.1.1 Energiemanagementsystem

Durch ein im Prozessleitsystem hinterlegtes Energiemanagementsystem kann die Energieeffizienz der Kläranlage gesteigert werden sowie der Stromverbrauch, sofern verfahrenstechnisch möglich, an die Verfügbarkeit von günstigen Energiequellen angepasst werden.

Wie in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, wird ca. die Hälfte des PV-Stroms in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Um den Eigenverbrauch zu erhöhen, sollten regelbare Verbrauchergruppen vorwiegend bei einem Überschuss an PV-Strom angeschaltet werden. Beispiel hierfür ist insbesondere die Schlamm-entwässerungsanlage.

Ebenfalls sollte der BHKW-Betrieb in Abhängigkeit des Netzbezugs, PV-Ertrags, der Faulraumtemperatur sowie des Gasspeicherfüllstands erfolgen.

Die Einrichtung des Energiemanagementsystems wird bereits zeitnah umgesetzt. Diese wird durch den Auftraggeber betreut.

Die Erneuerung der Belüftungssteuerung inkl. Stickstoffmessung wird im Zuge dieser Maßnahme nicht umgesetzt, da der Stromverbrauch der Belebung bereits dem Idealwert entspricht und folglich nicht von einer relevanten Stromeinsparung auszugehen ist. Dem gegenüber stehen jedoch Investitionskosten für die Installation der Messtechnik.

7.1.2 Reduktion Erdgasnutzung und Faulraumtemperatur

Wie unter 6.1 beschrieben, sollte die Erdgasnutzung in den BHKWs reduziert bzw. aufgegeben werden, sofern kein Wärmebedarf vorliegt. Sobald der Gaspreis über ca. 9,5 ct/kWh steigt, ist diese Betriebsweise nicht wirtschaftlich. Ebenfalls sollte die Solltemperatur der Faulung auf 40 bzw. 38 °C begrenzt werden, sofern zur Aufrechterhaltung der Temperatur Erdgas erforderlich ist. Dies reduziert die Betriebskosten und verbessert die Treibhausgasbilanz der Kläranlage.

Die Begrenzung der Soll-Faulraumtemperatur kann im Zuge der Einrichtung des Energiemanagements im Prozessleitsystem durchgeführt werden (7.1.1).

7.1.3 Verzicht auf Teilnahme am Regelenergiemarkt

Derzeit wird eines der BHKWs (BHKW 2011) zur Teilnahme am Regelenergiemarkt genutzt (5.4.1). Die Wirtschaftlichkeitsrechnung (Beilage 11) zeigt, dass hierdurch kein Gewinn erwirtschaftet wird, da hierdurch kurzzeitig beide BHKWs mit Erdgas betrieben werden, was zu deutlich erhöhten Gasbereitstellungskosten führt. Die erforderliche Erdgasleistung beträgt hierdurch ca. 1000 kW statt 500 kW.

Unter den derzeitigen Bedingungen ist daher die Teilnahme am Regelenergiemarkt nicht empfehlenswert. Das zweite BHKW (2011) kann nach Kündigung des Vertrags zur Deckung von länger anhaltender Spitzenlast genutzt

werden. Ebenfalls ist es weiterhin zur Gewährleistung der Betriebssicherheit erforderlich (Redundanz).

Die Anpassung der BHKW-Steuerung kann im Zuge des Aufbaus des Energiemanagementsystems erfolgen (7.1.1). Zur Abschätzung, ob eine länger anhaltende Spitzenlast vorliegt, können unter anderem folgende Parameter genutzt werden: die Entwicklung des Durchflusses bzw. der Zulauffracht, der PV-Ertrag, der Gasbehälterfüllstand, die Faulraumtemperatur und die Tageszeit.

7.2 Mittelfristige Maßnahmen

7.2.1 Bau einer PV-Freiflächenanlage

Der Bau einer PV-Freiflächenanlage stellt, wie unter 6.2.3 beschrieben, eine sehr wirtschaftliche Lösung zur Eigenversorgung mit elektrischem Strom dar. Aus diesem Grund sollte mittelfristig, spätestens zum Ende der Nutzungsdauer der bestehenden Aufdachanlage des externen Betreibers eine entsprechende Anlage errichtet werden. Zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils sollte hierbei die mögliche Nutzung eines Batteriespeichers berücksichtigt werden.

Alternativ zum Bau einer Freiflächenanlage sollte die Erneuerung der bestehenden Aufdachanlage geprüft werden, da hierdurch weniger Fläche verbraucht wird und der Planungs- sowie Genehmigungsaufwand geringer ist. Jedoch ist hierbei von höheren spezifischen Investitionskosten auszugehen.

7.2.2 Austausch Rücklaufschlammumpfen

Die bestehenden Rücklaufschlammumpfen (Baujahr 1996) sind mittelfristig zu erneuern, da sie am Ende ihrer Nutzungsdauer sind und einen erhöhten spezifischen Energieverbrauch aufweisen (siehe Punkt 5.3.9). Durch den Austausch der Pumpen durch energieeffizientere Ausführungen können zwischen 10 und 20 % des Energieverbrauches der Rücklaufschlammumpfen eingespart werden. Hierbei ist die Bemessung der bestehenden Pumpen zu prüfen, da derzeit je Belebungsbecken nur eine der drei Pumpen betrieben wird. Bei dem aktuellen Verbrauch beläuft sich die mögliche Reduktion des Stromverbrauchs auf rund 5.000 bis 10.000 kWh pro Jahr.

7.3 Langfristige Maßnahmen

7.3.1 Abwasserwärmenutzung

Die Abwasserwärmenutzung kann eine sinnvolle Maßnahme zur Wärmebereitstellung sein, insbesondere für externe Abnehmer. Da die Wirtschaftlichkeit von der Verfügbarkeit nahegelegener Abnehmer, dem Fernwärmenetz sowie den bestehenden Wärmeerzeugungsanlagen abhängt, sollte im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung die Abwasserwärmenutzung berücksichtigt werden. Die im Rahmen der Studie erarbeiteten Ergebnisse wurden hierzu bereits an die Verantwortlichen der Stadt Schwandorf weitergeleitet.

Da die Abwasserwärmenutzung mittels einer Wärmepumpe erfolgt, welche zu einem erhöhten Stromverbrauch führt, sollte die Maßnahme ebenfalls mit der Planung einer PV-Freiflächenanlage erfolgen.

8 Zusammenfassung

Der Zweckverband Verbandskläranlage Schwandorf-Wackersdorf betreibt die Kläranlage Schwandorf-Wackersdorf. Dieser strebt eine Reduzierung des fossilen Energiebezugs an, um langfristig die Autarkie zu erreichen. Hierfür wurde durch die GFM Bau- und Umweltingenieure GmbH ein Energiekonzept, bestehend aus einer Bestandsaufnahme und Potenzialanalyse erstellt.

Die Kläranlage ist seit 1997 in Betrieb und verfügt über eine mechanische und biologische Reinigungsstufe. Zur Energieerzeugung stehen zwei Blockheizkraftwerke sowie eine PV-Anlage, die durch einen externen Betreiber betrieben wird, zur Verfügung.

Die Kläranlage weist einen jährlichen Gesamtstromverbrauch von 1,8 Millionen kWh auf, was einem relativ niedrigen einwohnerspezifischen Verbrauch von 21,7 kWh/(EW-a) entspricht. Im Vergleich zu ähnlichen Kläranlagen in Deutschland zählt sie damit zu den effizientesten 10 %. Die Hauptverbraucher des Stroms sind diverse Aggregate und Pumpen, aufgeteilt nach verschiedenen Verfahrensgruppen. Zu den wesentlichen Energieverbrauchern gehört die Belebung mit Belüftung und Rührwerken sowie das Einlaufhebwerk. Der Energieverbrauch der Aggregate wurde unter anderem auf Basis der Motor肯ndaten, Betriebsstunden und Verbrauchsmessungen berechnet.

Der Wärmebedarf der Anlage wird hauptsächlich durch die Faulung bestimmt, wobei der Gesamtwärmebedarf für 2022 bei etwa 2,2 Millionen kWh/a lag.

Beim Vergleich der anlagenbezogenen Idealwerte mit den aktuellen Verbrauchswerten zeigte sich kein signifikantes Einsparpotenzial, was auf eine bereits hohe Effizienz der Anlage hinweist.

Bezüglich der Eigenversorgung mit Strom spielen die Blockheizkraftwerke (BHKWs) eine wichtige Rolle, indem sie rund 62 % des benötigten Stroms mittels Faulgas und rund 21 % mittels Erdgas erzeugen. Die vorhandene Photovoltaikanlage erzeugt etwa 279.000 kWh/a, wovon 44 % vor Ort auf der Kläranlage verbraucht wird. Insgesamt erreicht die Kläranlage damit einen elektrischen Eigenversorgungsgrad von etwa 90 %. Es ist jedoch festzuhalten, dass der hohe Eigenversorgungsgrad nur durch die Nutzung von Erdgas erzielt wird.

Eine Analyse der zeitlichen Variabilität der Stromerzeugung und des Verbrauchs zeigt einen vergleichsweise konstanten Gesamtverbrauch, der sich gut mit der konstanten Betriebsweise der BHKWs deckt. Die PV-Stromerzeugung hingegen variiert wetter- und jahreszeitlich stark, was zu einem hohen Anteil an Netzeinspeisung führt, besonders während der Mittagsstunden.

In der Potenzialanalyse für erneuerbare Energien wurden mehrere Bereiche betrachtet. Die Nutzung von Faulgas aus der Schlammstabilisierung ist aktuell begrenzt, bietet aber Potenzial für die Nutzung von Co-Substraten. Die Nutzung von Biogas von einer nahegelegenen Biogasanlage auf der Kläranlage ist derzeit wirtschaftlich nicht vorteilhaft. Photovoltaikanlagen, sowohl bestehende als auch potenzielle neue Freiflächenanlagen, zeigen großes Potenzial, insbesondere in Kombination mit Batteriespeichern. Die Nutzung von Abwasserwärme könnte

besonders für externe Wärmenetze interessant sein, wohingegen die Wärmeausnutzung aus Faulschlamm wirtschaftlich unattraktiv ist. Wind- und Wasserkraft sind aufgrund der Standortbedingungen nicht empfehlenswert.

Abschließend wurden verschiedene Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen. Kurzfristig sollte ein Energiemanagementsystem implementiert, die Erdgasnutzung reduziert und die Teilnahme am Regelenergiemarkt überdacht werden. Spätestens mittelfristig wird der Bau einer PV-Freiflächenanlage empfohlen. Ebenfalls sollten mittelfristig die Rücklaufschlammumpen im Zuge der Erneuerung durch energieeffizientere Pumpen ausgetauscht werden. Langfristig könnte die Nutzung von Abwasserwärme in Kombination mit einer PV-Freiflächenanlage sinnvoll sein. Insgesamt zeigt die Kläranlage eine hohe Energieeffizienz und nutzt bereits einen hohen Anteil an erneuerbaren Energiequellen, hat jedoch weiteres Potenzial zur Optimierung.

9 Literatur

- AbwV. (2020). Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Juni 2020 (BGBl. I S. 1287) geändert worden ist.
- ATV-DVWK-A 198. (2003). *Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen; Arbeitsblatt*. Hennef, Deutschland: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWA-A 131. (2016). *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWA-A 216. (2015). *Energiecheck und Energieanalyse: Instrument zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWA-M 114. (2020). *Abwasserwärmenutzung*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWA-M 368. (2014). *Biologische Stabilisierung von Klärschlamm*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWA-M 380. (2020). *Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWA-M 381. (2007). *Eindickung von Klärschlamm*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- Pinnekamp, J., Schröder, M., Bolle, F.-W., Gramlich, E., Gredigk-Hoffmann, S., Koenen, S., . . . Ooms, K. (2017). *Energie und Abwasser Handbuch NRW*. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.