

Abschlussbericht

zum Vorhaben

Energieautarke Kläranlage Jena



Aktenzeichen: NKa3 - 001910

Zuwendungsempfänger/-in

JenaWasser

Umweltbereich

Wasser/Abwasser, Energie

Laufzeit des Vorhabens

27.09.2011 – 31.05.2016

Autor/-en

*Herr René Stubenrauch
Leiter der Zentralen Kläranlage Jena*

*Herr Robert Köllner
Management Abwasser*

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und
Reaktorsicherheit**

Datum der Erstellung

07.10.2016



Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen : NKa3	Projekt-Nr.: 001910
Titel des Vorhabens: Energieautarke Kläranlage Jena	
Autor/-en (Name, Vorname): Herr Stubenrauch René Herr Köllner Robert	Vorhabenbeginn: 27.09.2011 Vorhabenende (Abschlussdatum): 31.05.2016
Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift): JenaWasser Rudolstädter Straße 39 07745 Jena	Veröffentlichungsdatum: Seitenzahl: 64
Gefördert im BMUB-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.	
Kurzfassung: Die Zentrale Kläranlage Jena (ZKA) wurde bis zum Jahr 2001 in weiten Teilen rekonstruiert und erweitert. Zwischen 2005 und 2007 erfolgte eine Erneuerung der kompletten Belüftungstechnik der Belebungsbecken durch den Einsatz hocheffizienter Membran-Rohrbelüfter und zwei magnetgelagerter Turboverdichter mit höherer Leistung. Das führte zu einer Senkung der Energiekosten von 20 kWh/(E a) auf rund 17 kWh/(E a). Der Senkung des Energieverbrauches standen unbefriedigende Leistungen der Eigenstromerzeugung gegenüber. Deshalb wurden im Zusammenhang mit der Anpassung der Schlammbehandlung umfangreiche Untersuchungen zur Erhöhung der Eigenenergieerzeugung durchgeführt. In Vorversuchen zur Faulzeit (Restgas-potential), zum Einsatz von Aufschlussverfahren (Desintegration) und Berechnungen zu Wirkungsgradverbesserungen der BHKW wurden Potentiale zur Erhöhung der Klärgas-Produktion festgestellt, die geeignet waren, eine nahezu vollständige Eigenversorgung mit Strom zu erreichen. Das veranlasste uns, ein konkretes Projekt zur Erreichung der Energieautarkie vorzubereiten und uns damit im Rahmen des BMUB Umweltinnovationsprogramms zu bewerben.	
Beginn des Vorhabens: 27.09.2011 Ende der Investition: 31.12.2014 Laufzeit des Messprogramms: 01.05.2015 bis 30.04.2016	
Schlagwörter: Energieautarke Kläranlage, Senkung des Eigenstromverbrauches, Steigerung der Faulgasproduktion, Stromeinspeisung, Grundlast-BHKW, Erweiterung der Faulraumkapazität, Senkung des Fremdwasseranteils	
Anzahl der gelieferten Berichte 12 Papierform: 10 Elektronischer Datenträger: 2	Sonstige Medien: Nein Veröffentlichung im Internet gepl. auf der Webseite des UBA

Report Coversheet

Reference-No. Federal Environment Agency:	Project–No.: 001910
Report Title: energy self-sufficient wastewater treatment plant Jena	
Author/Authors (Family Name, First Name): Mr. Stubenrauch René Mr. Köllner Robert	Start of project: 27.09.2011
	End of project: 31.05.2016
Performing Organisation (Name, Address): JenaWasser Rudolstädter Straße 39 07745 Jena	Publication Date:
	No. of Pages: 64
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety.	
<p>Summary (max. 1.500 characters): The Central wastewater treatment plant Jena (ZKA) was reconstructed by 2001 in large parts and expanded. Between 2005 and 2007 there was a renewal of the complete aeration system of aeration tanks by placing highly efficient membrane tube diffusers and two magnetically levitated turbo compressor with higher performance. This led to a reduction in energy costs per capita per year of 20 to around 17 kWh. The reduction of energy consumption faced unsatisfactory performance of its own production. Therefore, in connection with the adjustment of the sludge treatment extensive studies to increase own energy production were conducted. In preliminary tests the digestion time (residual gas potential), the use of separation techniques (disintegration) and calculations to improvements in efficiency of the cogeneration unit potentials were found to increase the sewage gas production, which were likely to achieve an almost complete self-sufficiency in electricity. This caused us a specific project to achieve energy self-sufficiency and prepare us to apply so under the BMUB environmental innovation program. Beginning of the project 27.09.11/ End of the investment 31.12.14 / Running time of the measuring program 01.05.15 - 30.04.16</p>	
<p>Keywords: Self-powered sewage plant , lowering the intrinsic power consumption, increase in biogas production, electricity supply, baseload CHP, expansion of digester capacity, reduction of extraneous water</p>	

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und der Projektpartner	8
1.2. Ausgangssituation.....	8
2. Vorhabenumsetzung.....	19
2.1. Ziel des Vorhabens	19
2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	20
2.3. Umsetzung des Vorhabens	26
2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	27
2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	27
2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms	28
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung.....	30
3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung	30
3.2. Stoff- und Energiebilanz.....	30
Betriebs- und Messergebnisse.....	30
Verfahrenstechnische Kennwerte und Abbauleistung Faulbehälter.....	32
3.3. Gasanfall.....	35
Organischer Abbaugrad und CSB.....	39
Entwässerungsgrad Zentrifuge.....	43
Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	44
3.4. Umweltbilanz	49
3.5. Wirtschaftlichkeitsanalyse	50
3.6. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	52
4. Übertragbarkeit	52
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung	52
4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)	52
5. Zusammenfassung/ Summary	53
6. Abkürzungsverzeichnis.....	61
7. Literatur	63
8. Anhang.....	64

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abbildung 1.1** Zentralkläranlage Jena
- Abbildung 1.2** Gebläsestation mit Drehkolbengebläsen und Turboverdichtern
- Abbildung 1.3** neues Belüftungskonzept 1
- Abbildung 1.4** neues Belüftungskonzept 2
- Abbildung 2.1** neuer Faulbehälter III, dahinter Faulbehälter I + II
- Abbildung 2.2** Konzeption Erweiterung Faulbehälter
- Abbildung 2.3** Gasspeicher mit Fackel und Gasvorschacht
- Abbildung 2.4** Konzeption der Gasspeicherung mit Fackel
- Abbildung 2.5** Grundlast BHKW, 400 KW
- Abbildung 2.6** Auslegung Wärmeversorgung
- Abbildung 3.1** Hochwassersituation während der Bauphase
- Abbildung 3.2** CSB Bilanz ZKA Jena anhand der Messwerte

DIAGRAMMVERZEICHNIS

- Diagramm 1.1** Energieverbrauch ZKA Jena 2001 – 2011
- Diagramm 1.2** Entwicklung Energiebezug 2000 bis 2015
- Diagramm 3.1** Statistische Auswertung der hydraulischen Belastung (Tagesmittel)
- Diagramm 3.2** Volumenströme Schlamm Juni 2015 bis Mai 2016
- Diagramm 3.3** Häufigkeitsverteilung der Faulzeit (gleitende 14 d-Mittelwerte)
- Diagramm 3.4** Verlauf der Faulbehältertemperaturen (Januar 2014 bis Mai 2016)
- Diagramm 3.5** Gasanfall der Faulbehälter ZKA Jena 2014 bis 2016
- Diagramm 3.6** Statistische Auswertung Gasanfall -alle Werte vom 01.04.2015 bis 31.05.2016
- Diagramm 3.7** Statistische Auswertung Gasanfalls vom 01.04.2014 bis 31.05.2016
- Diagramm 3.8** Verlauf der Summe organischer Säuren (Essigsäureäquivalent) in den verschiedenen Schlämmen
- Diagramm 3.9** Vergleich Häufigkeitsverteilungen Entwässerungsgrad Zentrifuge

**Diagramm 3.10 Energieverbrauch, Eigenerzeugung u. Eigenversorgungsgrad ZKA
1996 bis 2015**

**Diagramm 3.11 Prozentuale Verteilung der Energiebedarfsmenge nach
Klärwerkseinheiten**

Diagramm 3.12 Verteilung der Energiebedarfsmengen auf Verbrauchsgruppen

Diagramm 3.13 Jahresganglinie Eigenversorgungsgrad (Energieanalyse)

Diagramm 5.1 Energiebedarf STROM gesamt und CO₂-Emission 2014 (vor Umbau)

**Diagramm 5.2 Energieverbrauch, Eigenerzeugung und Eigenversorgungsgrad ZKA
1996 bis 2015**

Diagramm 5.3 Jahresganglinie Eigenversorgungsgrad (Energieanalyse)

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1.1	Schlammengen und Schlammfrachten ZKA Jena
Tabelle 1.2	Auswertung Gasanfall, Abbaugrad Januar 2009 bis Dezember 2010
Tabelle 1.3	Vergleich Energieverbrauch und Energiebezug
Tabelle 1.4	Vergleichswerte für Energiebezug 2014 (vor Umbau)
Tabelle 2.1	Kenndaten der vorhandenen BHKW-Anlage
Tabelle 2.2	Ergebnisse der Datenauswertung
Tabelle 2.3	Berechnung Faulbehälter
Tabelle 2.4	Proben- Messstellen und Häufigkeit
Tabelle 2.5	Matrix - Messparameter, Entnahmestelle
Tabelle 3.1	Frachtbelastung CSB
Tabelle 3.2	Frachtbelastung Stickstoff
Tabelle 3.3	Vergleich Gasanfall 2007-2011, 2012 sowie 2014-2015
Tabelle 3.4	Ergebnisse des Messprogrammes TR, oTR, CSB (Mittelwerte Juni 2015 bis Mai 2016)
Tabelle 3.5	CSB Bilanz
Tabelle 3.6	Vergleich der FOS-Gehalte (als Essigsäureäquivalent)
Tabelle 3.7	Vergleich der Entwässerungsgrade Zentrifuge

Tabelle 3.8 **Stromverbrauch und Energieeffizienz von Verbrauchsgruppen
(vor und nach der Investition)**

Tabelle 3.9 **zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse 2015**

Tabelle 3.10 **Kostenvergleichsrechnung**

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und der Projektpartner

JenaWasser ist ein Zweckverband im Sinne des Thüringer Gesetzes über die kommunale Gemeinschaftsarbeit (ThürKGG). Er ist ein Zusammenschluss mehrerer Städte und Gemeinden zur gemeinsamen Erfüllung der kommunalen Aufgaben der Wasserversorgung sowie Abwasserableitung und –behandlung in und um Jena. Der Zweckverband ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts.

Im Rahmen der **Trinkwasserversorgung** betreibt JenaWasser im Verbandsgebiet derzeit 4 Wasserwerke, 45 Hochbehälter, 16 Pumpwerke und 13 Druckerhöhungsanlagen. Durch 670 km Rohrnetz wird Trinkwasser für ca. 20.000 Grundstücksanschlüsse geliefert. Weiterhin werden 271 km Hauanschlussleitungen betrieben.

Im Rahmen der **Abwasserbeseitigung** obliegt dem Zweckverband die Beseitigungspflicht in seinen Mitgliedsgemeinden. Dabei umfasst das Abwasser sowohl Schmutz- als auch Niederschlagswasser sowie das aus Anlagen zum Behandeln, Lagern oder Ablagern von Abfällen austretende oder gesammelte Wasser. Die Beseitigungspflicht beinhaltet bei Kleinkläranlagen das Transportieren des anfallenden Schlammes und bei Gruben das Entleeren und Transportieren des Grubeninhaltes.

Der Zweckverband betreibt eine Zentrale Kläranlage (ZKA) in Jena-Zwätzen und mehrere weitere Kläranlagen. Das Leitungsnetz Abwasser im Verbandsgebiet erstreckt sich über 856 km (Kanäle und Vakuum- bzw. Druckleitungen ohne Hausanschlüsse).

Jährlich werden rund 5,5 Mio. m³ Trinkwasser verkauft und rund 9,0 Mio. m³ Schmutzwasser behandelt. Zusätzlich erfolgt die Niederschlagswasserentsorgung, soweit dieses nicht auf den Grundstücken verwertet werden kann.

Der Jahresumsatz des Verbandes beträgt für die Wasserver- und Abwasserentsorgung insgesamt rund 39,6 Mio. €, wovon 16,0 Mio. € auf die Wasserversorgung und 23,6 Mio. € auf die Abwasserentsorgung entfallen.

1.2. Ausgangssituation

Die Ausgangssituation der ZKA Jena wird durch ein ständiges Bemühen geprägt, den Entsorgungsauftrag mit hoher Qualität und unter optimalen technischen und betriebswirtschaftlichen Bedingungen zu erfüllen. Dieser Anspruch hat sich, ausgehend von den Führungsebenen, seit Jahren durchgesetzt und bestimmt das Denken und Handeln aller Mitarbeiter. Der Zweckverband ist sinnvollen und effizienten Veränderungen gegenüber aufgeschlossen.



Abbildung 1.1 Zentralkläranlage Jena

Die verfahrenstechnische Besonderheit der ZKA Jena ist eine Kaskadendenitrifikation, kombiniert mit einem Teilstrom- Anaerobbecken zur vermehrten biologischen Phosphorelimination. Das Konzept der Teilstrom- Anaerobie gründet sich auf einen Vorschlag von Prof. Voigtländer, Bauhausuniversität Weimar aus dem Jahr 1995.

Das Verfahren führte zu einem sehr guten Behandlungsergebnis (N-Elimination ca. 90 %, Phosphorelimination > 95 %). Die gezielte biologische Phosphor-Elimination bewirkt, dass nur etwa 20 % des eliminierten Phosphors durch den Einsatz von Fällmitteln entfernt werden. Im Gegensatz zur Auslegung ($TS_{BB} = 4,0 \text{ g/l}$) konnte durch die stabilen Schlammabsetzeigenschaften und die prozessstabile Nachklärung ein Trockensubstanzgehalt in der Belebung von mehr als 5 g/l gefahren werden.

Die Zentralkläranlage Jena wurde in der Rekonstruktionsphase von 1998 – 2001 durch eine Erneuerung und Sanierung der Belüftung in ihrer Leistungsfähigkeit so optimiert, dass trotz deutlich höherer Belastung als in der Bemessung vorgesehen eine bauliche Erweiterung vermieden werden konnte. In dieser Zeit entwickelte sich ein **Energiemanagement**. Die Faulung wurde als geschlossenes System ausgestaltet. Seit Inbetriebnahme stieg durch Anschluss von zusätzlichen Einwohnern und Industrie die maximale Belastung sukzessive auf bis zu 200.000 $EW_{BSB60,85\%}$ (2004). Nachfolgend stabilisierte sich die Belastung auf ungefähr 175.000 $EW_{BSB60,85\%}$. Dagegen hat die hydraulische Belastung der Anlage bisher bei weitem nicht die Auslegungsgröße erreicht ($Q_{d,85\%} = 18.500 \text{ m}^3/\text{d}$ gegenüber 24.500 m^3/d als Auslegungswert).

Bereits 2005 zeigten sich Verschleißerscheinungen bei den bestehenden Belüfterelementen. Es traten Defizite bei der Sauerstoffversorgung der Biologie auf, die sich negativ auf die Prozessstabilität auswirkten. Aus diesem Grunde wurde in den Jahren 2005 bis 2007 die Belüftungstechnik erneuert und optimiert. Dies führte zu einer signifi-

kanten Einsparung an Energie, ohne das hinsichtlich der Sauerstoffversorgung der Anlage Kompromisse eingegangen werden mussten.



Abbildung 1.2 Gebläsestation mit Drehkolbengebläsen und Turboverdichtern (hinten)

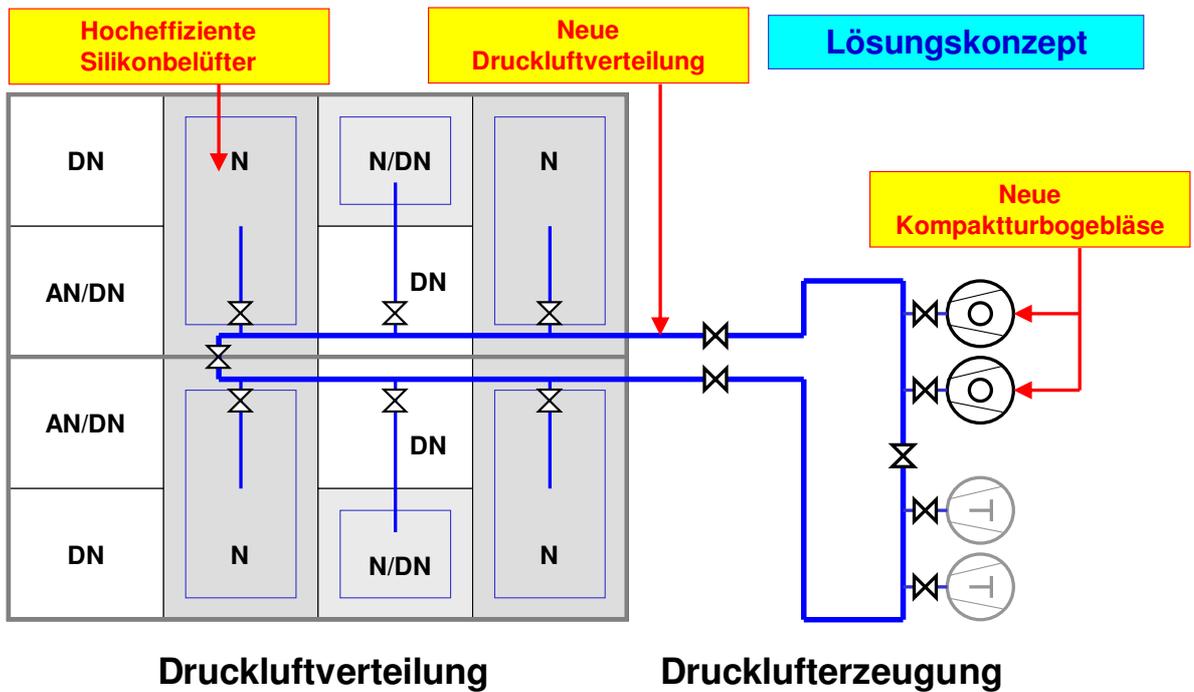


Abbildung 1.3 neues Belüftungskonzept 1

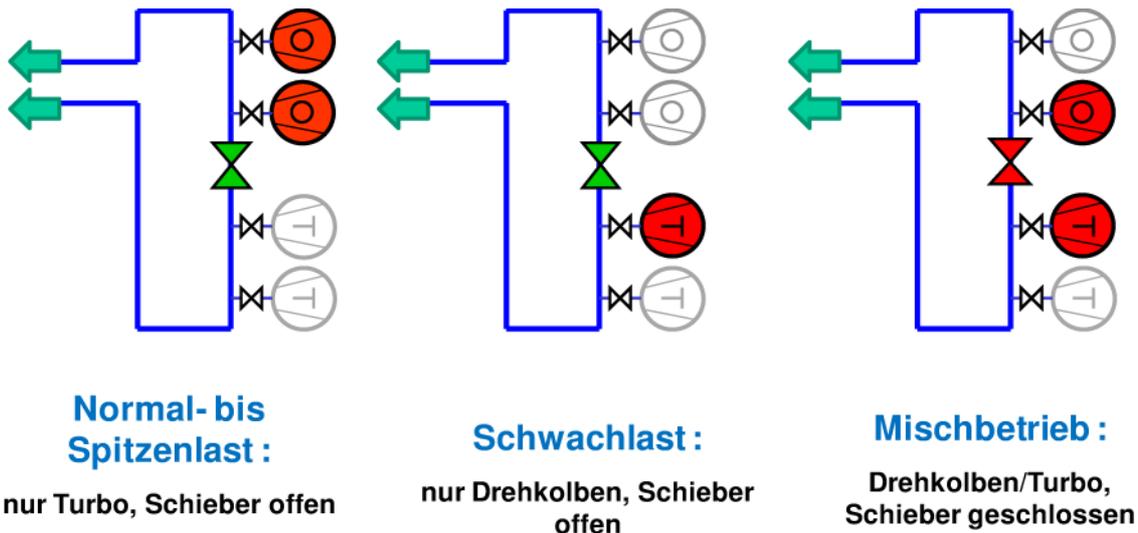


Abbildung 1.4 neues Belüftungskonzept 2

Die Erwartungen an die Optimierung wurden durch die deutliche Verbesserung und Stabilisierung der Ablaufwerte der Kläranlage und einer sichtbaren Verringerung des Energieverbrauchs erfüllt. Die im Wasserrechtbescheid festgelegten Ablaufwerte konnten auf der ZKA Jena in den vergangenen Jahren problemlos eingehalten werden. Die aktuell erklärten Werte zur Abwasserabgabe liegen deshalb deutlich unter den Grenzwerten der wasserrechtlichen Genehmigung und der Mindestanforderungen nach Abwasserverordnung.

Energieverbrauch und Eigenstromerzeugung in einer Rückbetrachtung

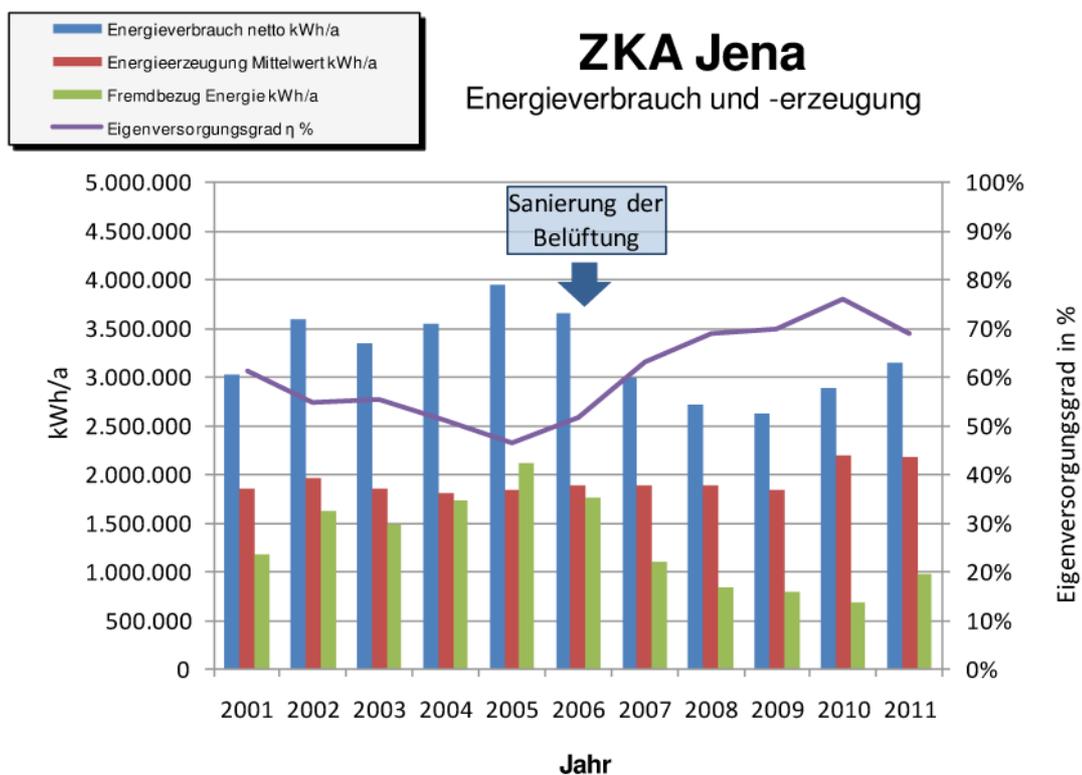


Diagramm 1.1 Energieverbrauch ZKA Jena 2001 - 2011

Der Energieverbrauch konnte in den Jahren von 2005 bis 2007 um rund 1 Mio. kWh/a gesenkt werden, so dass aktuell von maximal 3 Mio. kWh/a auszugehen ist. Dies entspricht einer Senkung von 20 kWh/(E* a) auf rund 17 kWh/(E* a). Der Energieverbrauch wird dabei auf die mittlere CSB-Belastung, also ca. 180.000 $E_{CSB120,m}$, bezogen. Der Anteil der biologischen Stufe inklusive Rückführung, Rezirkulation und Nachklärbecken nimmt dabei rund 60 % des Gesamtenergieverbrauchs ein, maximal jedoch 10 kWh/(E* a). Die Beeinflussung des Energieverbrauchs in Jahren mit erhöhten hydraulischen Zuflüssen (2002 und 2011) ist deutlich zu erkennen. Diese wirken sich vor allem auf Pumpwerke und Schlammbehandlung aus.

Eine weitere Optimierung der Kläranlage, die den Ausgangsstatus charakterisiert, ist durch die technische Veränderung der Klärschlamm entwässerung erfolgt. Die Entwässerung durch Siebbandpressen wurde durch den Austausch einer Siebbandpresse gegen eine leistungsstarke Zentrifuge im Jahr 2009 verändert. Die Dimensionierung der Zentrifuge erfolgte so, dass unter normalen Bedingungen die Entwässerung nur durch die Zentrifuge gefahren wurde.

Diese Meilensteine in der Realisierung einer konsequenten Senkung des Eigenenergieverbrauches forderte eine kritische Bewertung des erreichten Standes der Eigenenergieerzeugung. Im März 2011 fertigte die Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Dr. Steinle eine Betriebsdatenanalyse der Schlamm- und Gasbilanz der Schlammfäulung an, die eine Grundlage zur Untersuchung von Wirkungen von Aufbereitungsverfahren in der Hydrolyse und Steigerungsmöglichkeiten im Abbau von oTR in der Fäulung schaffen sollte.

Hier heißt es: „Die Feststoffbilanz zeigt, dass durch die Fäulung die Gesamt-Feststofffracht des Schlammes um 27 % reduziert wird, der Abbaugrad des oTR liegt bei 38%. Damit ist der schlechte Abbaugrad des oTR nochmals bestätigt. Bei gut funktionierenden Fäulungen können oTR-Abbaugrade von über 40 bis 55 % erreicht werden. Der spezifische Gasanfall, bezogen auf die abgebaute Trockensubstanz, liegt bei 920 l/kg oTR (Soll: 900 – 1.000 l/kg oTR).“

2009 bis 2010		Q	TR	TR	oTR
		m ³ /d	kg/d	kg/m ³	kg/d
Primärschlamm	Mittelwert	80	5433	68	3993
	50%-Wert	80	-	-	-
	95%-Wert	105	-	-	-
	Maximum	164	-	-	-
Überschussschlamm	Mittelwert	635	5590	8,8	3893
	50%-Wert	600	-	-	-
	95%-Wert	948	-	-	-
	Maximum	1502	-	-	-
Überschussschlamm eingedickt (Abscheidegrad 97 %)	Mittelwert	118	5422	45,8	3776
	50%-Wert	117	-	-	-
	95%-Wert	160	-	-	-
	Maximum	175	-	-	-
Schlamm zum FB (=PS+Ü_seingedickt)	Mittelwert	198	10855	55	7769
	50%-Wert	198	-	-	-
	95%-Wert	216	-	-	-
	Maximum	225	-	-	-
Faulschlamm	Mittelwert	198	7698	39	4737
	50%-Wert	198	-	-	-
	95%-Wert	216	-	-	-
	Maximum	225	-	-	-
Schlamm aus Nacheindicker	Mittelwert	191	7099	37	4369
	50%-Wert	214	-	-	-
	95%-Wert	365	-	-	-
	Maximum	552	-	-	-
Schlamm aus Schlammmentwässerung (hier nur Werte aus 2010)	Mittelwert	30	6541	242	4025
	50%-Wert	-	-	-	-
	95%-Wert	-	-	-	-
	Maximum	-	-	-	-

Tabelle 1.1 Schlammengen und Schlammfrachten ZKA Jena vor Optimierung

Die Tabelle macht deutlich, dass das Schlammaufkommen sowohl von der Menge, als auch vom Inhalt (TR, oTR) typischen Werten von Kläranlagen vergleichbarer Größe entspricht.

Gasanfall

Die statistischen Auswertungen des gemessenen Gasanfalles und die Ermittlung des spezifischen Gasanfalls sind in Tabelle 1.2 zusammengefasst. Hier wurden die nicht modifizierten Messwerte zugrunde gelegt, daher differieren die Zahlen leicht zu der Bilanzierung. Neben der „konventionellen“ Methode zur Berechnung des Gasanfalls, die auf der Bilanzierung beruht, wurde die Methode von Kapp (1984) angewendet. Kapp berechnet den Abbaugrad des oTR anhand des Glühverlustes im Schlamm vor und nach der Faulung. Die Formel ist in Tabelle 1.2 angegeben. Beide Berechnungsmethoden liefern Ergebnisse ähnlicher Größenordnung.

2009 bis 2010				Betrieb	Norm
Gasanfall	Mittelwert	m ³ /d	:	2659,7	2422,3
	50%-Wert	m ³ /d	:	2675,4	2436,6
	95%-Wert	m ³ /d	:	3315,1	3019,1
	Maximum	m ³ /d	:	3743,9	3409,7
Spezifischer Gasanfall	Mittelwert	l/kg _{oTRzu}	:	342,4	311,8
		l/kg _{TRab}	:	842,2	767,0
Abbaugrade :		Abbaugrad TR		29,1%	
		Abbaugrad oTR		39,0%	
Abbaugrad nach KAPP		$\eta_{oTR} = 100 / GV_{RS} \cdot (1 - (100 - GV_{RS}) / (100 - GV_{FS}))$			
		Glühverlust Rohschlamm GV _{RS} :		71,6%	
		Glühverlust Faulschlamm GV _{FS} :		61,5%	
		Abbaugrad oTR nach Kapp :		36,4%	

Tabelle 1.2 Auswertung Gasanfall, Abbaugrad Januar 2009 bis Dezember 2010

Der Gesamtabbaugrad an Feststoffen liegt bei 29%, der organische Abbaugrad der Faulung in Jena beträgt lediglich 36 bis 39% und liegt unterhalb der üblichen Abbaugrade von 40 bis 45%, die eine mesophile Faulung von Mischschlamm erzielen kann. Da betriebliche Ursachen mit hoher Wahrscheinlichkeit sicher ausgeschlossen werden können, wurde in Praxisversuchen geprüft, inwieweit die Klärschlamm-Desintegration eine Verbesserung des Abbaugrades und der Gasausbeute ermöglicht.

Die Effekte aus einer Verbesserung des Aufschlussgrades wurden durch einen Praxisversuch von 4 Herstellern von Desintegrationsanlagen auf dem Gelände der ZKA ermittelt. Über eine abgestimmte Versuchseinstellung und eine Auswertungsmatrix wurden die Steigerungspotentiale der Gasproduktion durch Desintegrationsverfahren festgestellt. Sie lagen zwischen 5 % und 7 % Mehrertrag bei geringfügiger Erhöhung der Methankonzentration.

Des Weiteren wurde durch ein namhaftes Analytik-Labor in Jena Gärversuche durchgeführt, die Potentiale aus der Verlängerung der Ausfallzeiten quantifizieren sollten. Es zeigte sich, dass eine Ausfaltung erst nach ca. 35 Tagen erreicht wurde, während die IST-Verweilzeiten im Faulturm, stoffstrombedingt, ca. 20 Tage betragen. Das Potential an Gasmehrertrag durch Verlängerung der Ausfallzeiten erbrachte Steigerungsmöglichkeiten von ca. 10 %.

Alternativ wurden Betrachtungen zur Wirkungsgraderhöhung der eingesetzten BHKW durchgeführt.

Die Erzeugung von Strom und Wärme erfolgte durch 2 BHKW von je 250 kW elektrischer Leistung bei einem Wirkungsgrad von 33 %. Der mögliche Einsatz eines Grundlast-BHKW von 400 kW ließ einen dauerhaften Volllastbetrieb bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 41 % zu.

Daraus entstand die Konstellation zum Einsatz des Grundlast- BHKW, während die darüber hinaus anfallenden Gasmengen mit den vorhandenen 250 kW BHKW's verstromt werden, dabei aber nur ein 250 kW BHKW zusätzlich laufen soll und das andere 250 kW BHKW Redundant sowie für Havarie- bzw. Notfallfälle dienen soll.

Nachdem die Potentiale festgestellt und abgesichert waren, wurden Lösungsansätze ausgearbeitet und festgestellt, dass sich die Möglichkeit ergab, eine vollständige Energieautarkie zu erreichen. Das sollen nachfolgende statistische Werte unterstreichen.

Langzeitentwicklung und Niveau des Energieverbrauches der Gesamtanlage und Kennwertvergleich Elektroenergie und CO₂-Emission

Im Rahmen eines Energie- Checks und einer nachfolgenden Analyse durch den spezialisierten Energieberater „BWC Bierhals Wasser Consult“ wurde festgestellt: „Im Zeitraum 2000 bis 2015 bewegte sich der Elektroenergieverbrauch der Anlage auf nachstehendem Niveau. Der Energiebezug konnte signifikant reduziert werden...“.

Übersicht Energieverbrauch Jahr 2000 bis 2015

Jahr	Datenquelle	Energieverbrauch	Energiebezug	CO2-Emission	Kosten
		kWh/a	kWh/a	kg CO ₂ equi/a	€
2000	EVU		3.203.600	2.117.580	205.343,62
2001	EVU		1.764.884	1.166.588	208.822,49
2002	EVU		zzgl. Reinsauerstoff 2.755.318	1.821.265	161.322,43
2003	EVU		2.833.389	1.872.870	191.018,28
2004	EVU		3.407.606	2.252.427	257.380,57
2005	EVU		3.747.501	2.477.098	445.101,68
2006	EVU	3.317.187	1.440.487	952.162	196.439,00
2007	EVU	3.224.051	1.323.958	875.136	174.915,55
2008	EVU	2.865.727	981.470	648.751	138.218,21
2009	EVU	2.696.183	941.921	622.610	171.496,67
2010	EVU	3.045.423	846.871	559.782	110.277,26
2011	EVU	3.069.335	848.452	560.826	126.944,82
2012	EVU	2.899.753	612.504	404.865	107.613,74
2013	EVU	3.005.401	880.052	581.714	158.558,55
2014	EVU	2.781.914	470.221	310.816	89.960,24
2015	EVU	2.906.847	148.417	98.104	30.701,88

Tabelle 1.3 Vergleich Energieverbrauch und Energiebezug, Quelle: JW/ EVU

Energie-Bezug

Die Langzeitentwicklung (Trendanalyse) zeigt nachstehende Grafik

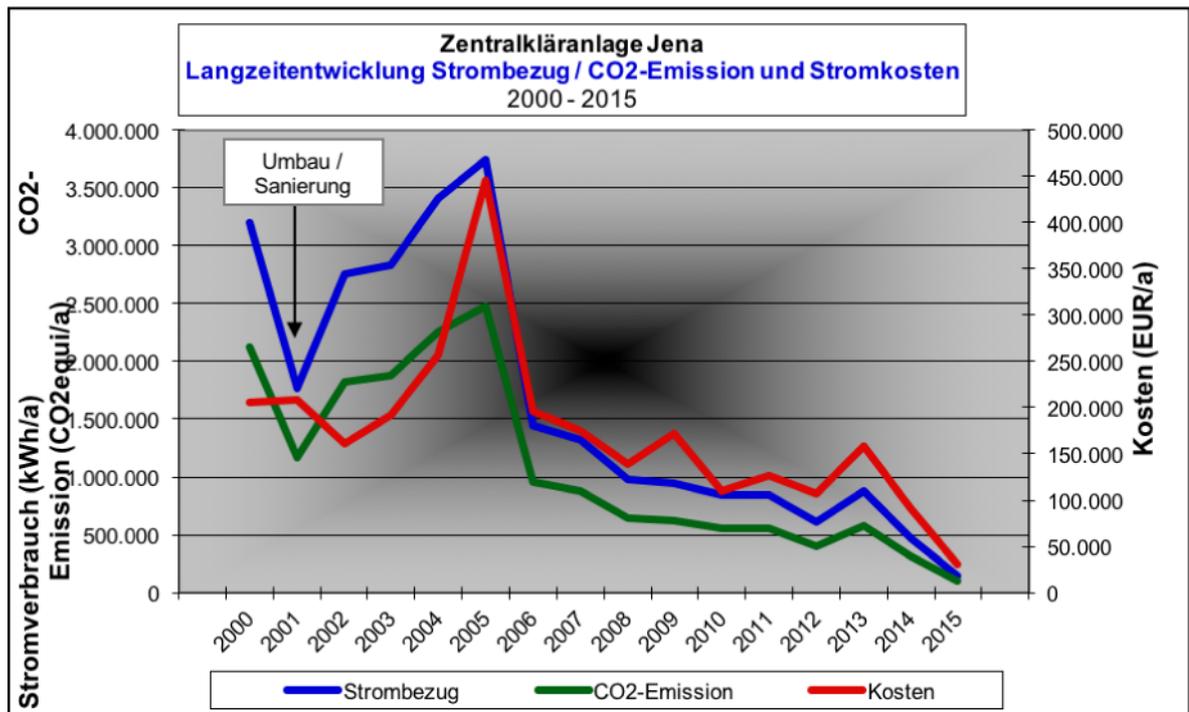


Diagramm 1.2 Entwicklung Energiebezug 2000 bis 2015

Energiebedarf STROM gesamt und CO₂-Emission 2014 (vor Umbau)

- Der spezifische Stromverbrauch der Gesamtanlage betrug im Jahr 2014 18,5 kWh/EW_{BSB}.
- Die Anlage weist damit eine sehr gute Energie-Effizienz auf
- Im Kennziffern-Vergleich positionierte sich die Anlage im optimalen Bereich unterhalb des 10%-Perzentiles der Unterschreitungshäufigkeit nach DWA– A 216

Parameter	ME	Anlagenwert	Vergleichswerte	
			Übliche Werte	Optimum UBA 2007
		2014		Zielwert
Elektroenergie				
<u>Eigenerzeugung</u>	kWh/a	2.311.693		
<u>Bezug</u>	kWh/a	470.221		
Gesamt	kWh/a	2.781.914		
Spezifisch bzgl. CSB (Belastungswert)	kWh/(EW _{CSB} x a)	18,0	32,5 DWA-Median von 138 KA	19,0 Incl. Zuschlag Übertiefe Zulaufkanal
Energie gesamt	kWh/a	2.781.914		

Tabelle 1.4 Vergleichswerte für Energieerzeugung und -bezug 2014 (vor Umbau)

Das veranlasste uns, ein konkretes Projekt zur Erreichung der Energieautarkie vorzubereiten und uns damit im Rahmen des BMUB Umweltinnovationsprogramms zu bewerben.

2. Vorhabenumsetzung

2.1. Ziel des Vorhabens

Das Ziel des Vorhabens bestand in dem Erreichen der Energieautarkie. Damit sollte aus dem eigenen Schlammaufkommen ohne Einsatz von Kofermenten eine Gesamtmenge an Elektroenergie erzeugt werden, die dem Eigenverbrauch der gesamten Kläranlage an Elektroenergie entspricht.

Für den Vorher - Nachher – Vergleich werden die jeweiligen Daten aus dem Jahr 2014 den Daten des Messprogramms gegenübergestellt. Zum 31.12.2014 wurden die Investitionen abgeschlossen, das Grundlast - BHKW ging jedoch erst 2015 ans Netz. Die Daten aus 2014 wurden im Rahmen eines Energie Checks des BWC Bierhals ermittelt, ebenso die Daten aus dem Messprogramm quasi als jeweils externe Betrachtung.

Die ZKA Jena - 2014 auf einen Blick

ENERGIE	2014	KLIMA
2.781.914	Stromverbrauch	
davon 470.221	Strombezug	310,81
kWh/a		t CO ₂ equi/a

Anmerkung: Gesamt-Stromverbrauch - Strombezug = Eigenproduktion

Die technische Lösung ist wie folgt zu beschreiben:

- Errichtung eines dritten Faulbehälters zur Erweiterung der Faulraumkapazität und zur Verbesserung des Ausfaulgrades durch längere Verweilzeit
- Einsatz eines Grundlast-BHKW
- Erneuerung des Heizschlammumpwerkes
- Erweiterung der Wärmetauscheranlage

2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Faulbehälter

Die Faulbehälteranlage der ZKA Jena besteht aus 3 Behältern, die sowohl parallel als auch hintereinander betrieben werden können. Während die beiden ersten Behälter mit je 2.000 m³ Volumen bereits im Rahmen des Neubaus der ZKA Jena (2001) erstellt wurden, ist der dritte Behälter im Rahmen des Projekts „Energieautarke ZKA Jena“ entstanden. Im Rahmen des Umbaus erfolgte auch eine Anpassung der Wärmeversorgung mittels eines dritten Wärmetauschers, so dass eine gesicherte Erwärmung der Faulbehälter auch im Winter gewährleistet ist.



Abbildung 2.1 neuer Faulbehälter III, dahinter Faulbehälter I + II

Die Durchmischung wird in den ersten beiden Faulbehältern mittels Gaseinpressung gewährleistet, während beim dritten Faulbehälter (neu) ein Rührwerk zum Einsatz kommt.

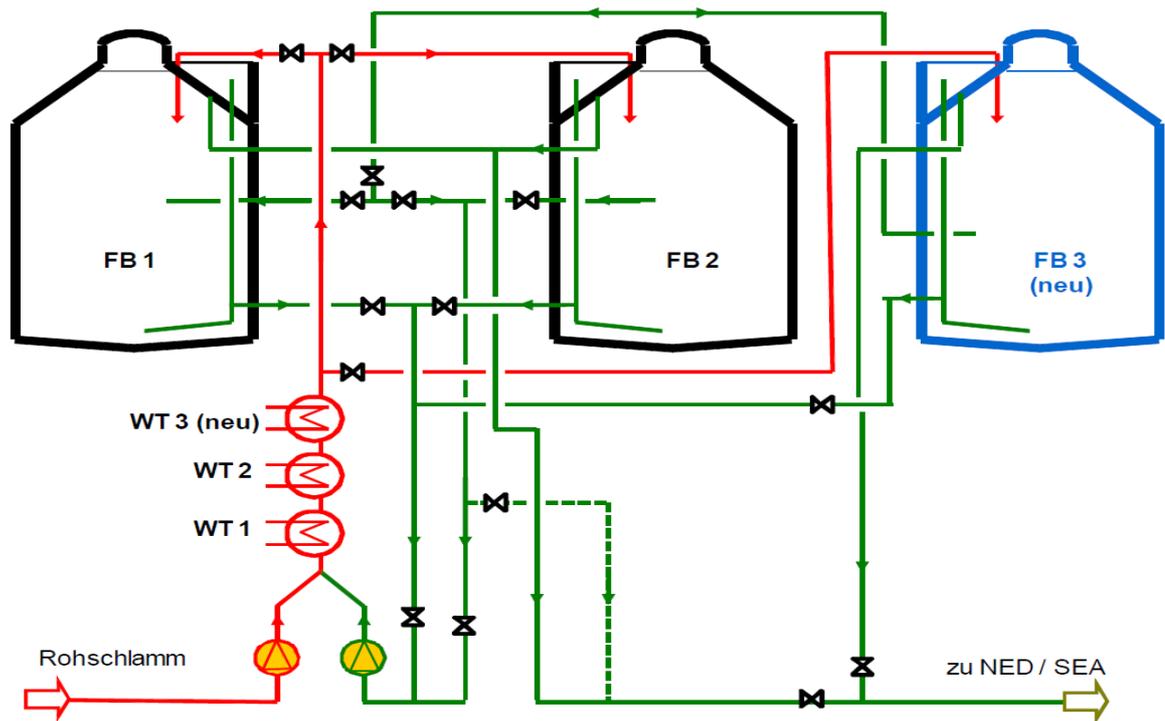


Abbildung 2.2 Konzeption Erweiterung Faulbehälter

Gasbehälter

Der bestehende Gasbehälter ist ein Niederdruckspeicher der Firma Eisenbau Heilbronn mit 1.000 m³ Inhalt. Er ist im Hauptschluss an das Gassystem der ZKA Jena angebunden.

Abbildung 2.3 zeigt den Gasspeicher, Abbildung 2.4 die konzeptionelle Anbindung des Speichers mit den entsprechenden Einrichtungen. Das Speichervolumen ist mit etwa 30 % des täglichen Gasanfalls begrenzt.



Abbildung 2.3 Gasspeicher mit Fackel und Gasvorschacht

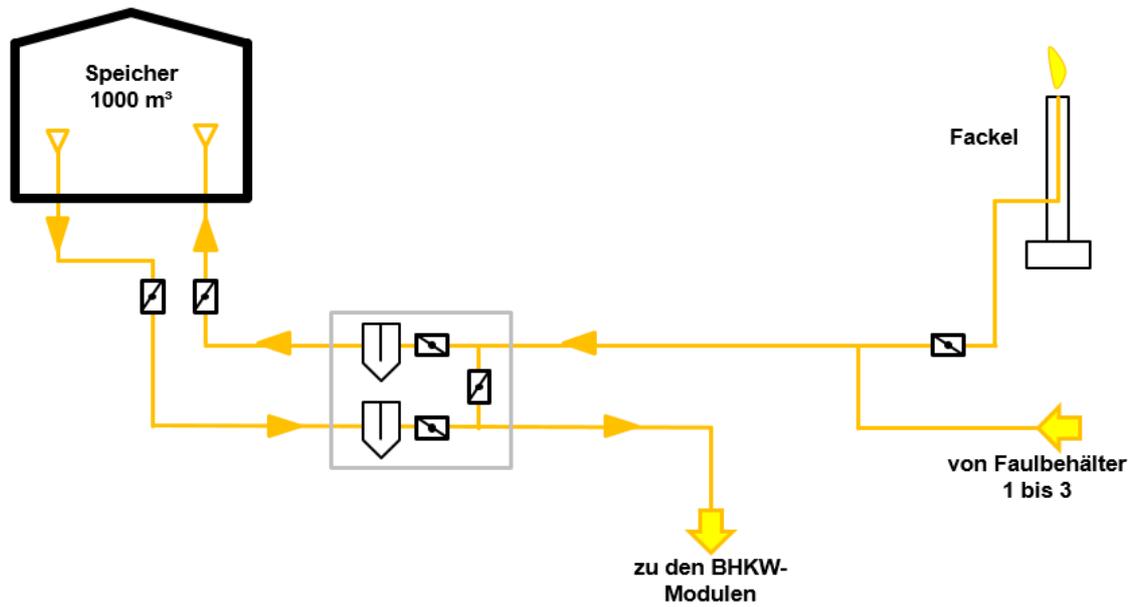


Abbildung 2.4 Konzeption der Gasspeicherung mit Fackel

Blockheizkraftwerke zur Gasverwertung

Das Faulgas wird mittels Blockheizkraftwerk, bestehend aus 3 Gas-Otto-Motoren mit Magergemisch-Turbolader-Technologie, verwertet. Die neueste Maschine (BHKW 3, 400 kW_e) wird als Grundlastmaschine betrieben, eine der beiden kleineren Aggregate (BHKW 1 oder BHKW 2, 250 kW_e) wird bei Zeiten minimalen Gasanfalls und bei Spitzenbedarf genutzt. Die zweite kleine Maschine wird als Stand-by-Aggregat vorgehalten um einen eventuellen Ausfall der Grundlastmaschine abzusichern.

Die neue Maschine (BHKW 3) zeichnet sich dadurch aus, dass ihr elektrischer Wirkungsgrad auch im Teillastbetrieb noch deutlich höher ist als der Wirkungsgrad der anderen beiden Maschinen bei Volllast. Daher wird BHKW 3 auch als Grundlastmaschine betrieben, während die beiden anderen BHKW bei erhöhtem Gasanfall oder als Standby herangezogen werden.



Abbildung 2.5 Grundlast BHKW, 400 KW

Auslegung und Leistungsdaten

Die wesentlichen Kennzahlen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst:

	BHKW 1	BHKW 2	BHKW 3
Maximale Elektrische Leistung kW :	250	250	400
Maximaler Gasverbrauch (60% CH4) m ³ _N /h :	112,6	112,6	166,7
Minimaler Gasverbrauch (60% CH4) m ³ _N /h :	56,3	56,3	62,5

Tabelle 2.1 Kenndaten der vorhandenen BHKW-Anlage

An Hand der Leistungsdaten der BHKW in den Monaten November und Dezember 2015 wurde nachfolgende Auswertung vorgenommen:

BHKW Betrieb :

Mittlere Gaserzeugung	107% :	3.462 m ³ /d	342 kW _{el}	ca. 50%-Wert
Mittlere Stromverbrauch	100% :	7.635 kWh/d =	318 kW	
Mittlere Stromproduktion	99% :	7.583 kWh/d =	316 kW	

			BHKW 1	BHKW 2	BHKW 3	BHKW 1-3	Fackel
Gasverbrauch	Summe	m ³ :	17.253	5.400	170.467	193.839	7.538
	Mittel	m ³ /h :	67,4	68,4	118,3	133,3	120,0
	Anteil	% :	8,6%	2,7%	84,7%	96,3%	3,7%
Betriebsstunden	Summe	Bh :	255,8	78,9	1.441,5	-	62,8
	bez.auf Zeitraum	:	17,5%	5,4%	98,5%	-	3,6%
Stromerzeugung (Anteile errechnet)	Summe	kWh :	38.301	11.987	409.120	459.408	-
	Mittel	kW :	28,1	8,8	300,1	316	-
	Mittel Betrieb	kW :	149,7	151,9	283,8	-	-
	Anteil	% :	8,3%	2,6%	89,1%	100,0%	-
Elektr. Wirkungsgrad		%	37%	37%	40%	39,5%	-

Tabelle 2.2 Ergebnisse der Datenauswertung

Während dieses Zeitraums wurde die Grundlastmaschine (BHKW 3) an 99 % der betrachteten Stunden betrieben, das BHKW 1 an 18 %, das BHKW 2 an 5 % der betrachteten Stunden. 90 % des Stroms wurden mit dem BHKW 3 erzeugt und es wurden unter 4 % des anfallenden Gases abgefackelt. Das Speichervolumen wurde zu 73 % genutzt (Maximalfüllung – Minimalfüllung). Bei geringem Strombedarf der Kläranlage reichte das Speichervolumen des Gasspeichers nicht aus, so dass die Fackel genutzt werden musste. Während dieser zwei Monate entsprach die Gaserzeugung in etwa dem Faulgas, das zur Stromerzeugung (Abdeckung des mittleren Strombedarfs der ZKA) erforderlich wird.

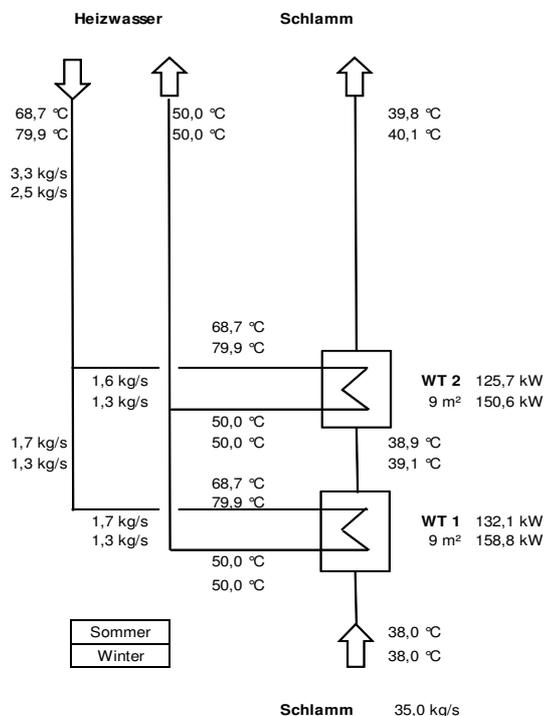
Faulbehälter Nachberechnung :			2 FB	3 FB
Gewählte Faulzeit Auslegung	$t_{FB,Dimens.}$	d	19,3	29,0
Faulzeit im Mittel (Bilanz)	$t_{FB,Mittel}$	d	23,2	34,8
Raumbelastung Auslegung	$B_{oTR,Dim}$	kg/(m ³ ·d)	2,10	1,40
Raumbelastung im Mittel (Bilanz)	$B_{oTR,M}$	kg/(m ³ ·d)	1,75	1,16
Faulbehältervolumen gewählt	V_{FB}	m ³	4000	6000

Abbaugrad und Gasanfall im Mittel :			2 FB	3 FB
Org.Abbaugrad Primärschlamm	$\eta_{oTS,PS}$	%	50%	55%
Org.Abbaugrad ÜS-Schlamm	$\eta_{oTS,ÜS}$	%	25%	30%
Gesamtabbaugrad oTS (Mittel)	$\eta_{oTS,ges}$	%	38%	43%
Gesamtabbaugrad TS (Mittel)	$\eta_{TS,ges}$	%	27%	30%
Mittlerer Gasanfall	g_{oTSab}	l _N /kg _{abgeb.}	890	900
	g_{oTSzu}	l _N /kg _{zu}	339	388
Gasanfall	G _d	m ³ _N /d	2845	3254
Methangehalt des Gases	a_{CH_4}	Vol-%	55%	60%
Heizwert des Gases	$H_{U,Gas}$	kWh/m ³	5,50	6,00
Primärenergie aus Gas	E_o	kWh/d	15648	19526
		kW	652	814

Tabelle 2.3 Berechnung Faulbehälter

Auslegung der Wärmeversorgung

2 Wärmetauscher :



3 Wärmetauscher :

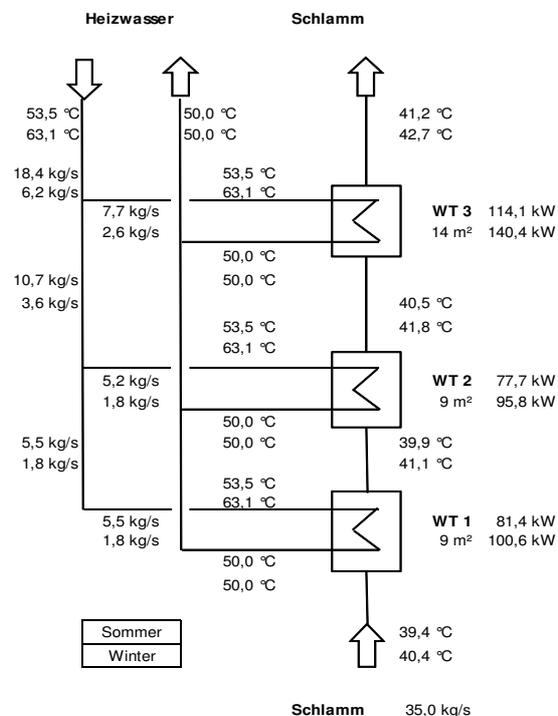


Abbildung 2.6 Auslegung Wärmeversorgung

2.3. Umsetzung des Vorhabens

Bauablauf:

Vorplanung (27.09.2011- 21.03.2012)

- Durchführung von Versuchsreihen zur Bestätigung von Annahmen
- Wirtschaftlichkeitsberechnungen nach LAWA
- Festlegung des technischen Gesamtkonzeptes zum Bau eines 3. Faulbehälters
- Beauftragung Baugrundgutachten

Entwurfsplanung (22.03.12 – 10.07.2012)

- Bauantrag (Voranfrage) → Bauantrag → Genehmigungsverfahren
- Abschluss der Vorplanung zur Verfahrenstechnik
- Abschluss EMSR-Planung

Ausführungsplanung (11.07.2012 – 30.10.2012)

- Erarbeitung der Ausschreibungsunterlagen
- Erstellung der Leistungsverzeichnisse
- Beginn des Ausschreibungsverfahrens
- Prüfung und Wertung der Angebote bis 15.01.2013

Erteilung der Baugenehmigung zum 24.10.2012

- Vergabebeschluss durch Verbandsausschuss 25.02.2013
- Baubeginn 22.03.2013

Los 1 (Bauarbeiten) Fa. Krause & Co. GmbH

Los 2 (Maschinentchnik) Hydrobau Riesa GmbH

Los 3 (EMSR-Technik) HBS Elektrobau GmbH

Einsatz einer Bauoberleitung Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Dr. Steinle

Realisierung – Inbetriebnahme

- Fertigstellung Los 1 - 30.11.2013
- Inbetriebnahme Los 2+3 – 25.11.2013
- Fertigstellung Los 2+3 – 13.12.2013
- Abnahmen bis 20.12.2013

Planung/Einbindung des Grundlast BHKW (01.4.2014 - 31.12.2014)

Firma Baumgart

Firma Alltec

- Abschluss der Investition durch Probelauf und Abnahme 31.12.2014

Planung und Ausschreibung des Messprogramms (02.02.15 – 30.04.2015)

Durchführung des Messprogramms (01.06.2015 bis 31.05.2016)

Abschluss der Ergebnisbewertung zum 30.06.2016

2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Zur Umsetzung des Investitionsvorhabens mussten 2 Genehmigungen und Prüfungen zur Umweltverträglichkeit sowie ein Baugrundgutachten eingeholt werden:

- Umweltverträglichkeitsprüfung
- Baugrundgutachten – Grundlage für die Statik
- Genehmigung nach der Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV)
- Baugenehmigung

2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Während der Durchführung der Investition und des Messprogramms wurden alle betrieblichen Messdaten, die sich aus dem Betrieb der Kläranlage ergeben, erhoben und dokumentiert.

Da die Erfolgskontrolle vorrangig durch das Messprogramm des Umweltbundesamtes realisiert wurde, stellen die betrieblichen Messdaten nur ergänzende Informationen dar.

2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms

Ziel			
Erstellung einer schlüssigen CSB- und Energiebilanz nach Umsetzung der Maßnahme und Überwachung des Wärmeeintrags in die Faulung			
Proben und Messstelle	Kürzel	Probenahmeart	Häufigkeit
Primärschlamm aus VKB	PS	Qualifizierte Stichproben	tägliche Probenahme
Überschussschlamm vor Eindickung	ÜSVE	Qualifizierte Stichproben	bereits in Standard-Eigenüberwachung erfasst/ täglich
Überschussschlamm nach Eindickung	ÜSNE	Qualifizierte Stichproben	tägliche Probenahme
Faulschlamm nach FB 1 und 2	FS12	Qualifizierte Stichproben	tägliche Probenahme, später evtl. wöchentlich
Faulschlamm nach FB 3	FS3	Qualifizierte Stichproben	tägliche Probenahme, später evtl. wöchentlich
Faulgas nach FB 1 und 2	G12	Qualifizierte Stichproben	Wöchentlich
Faulgas FB 3	G3	Qualifizierte Stichproben	Wöchentlich
Trübwasser aus Nacheindicker	TWNE	Qualifizierte Stichproben	nur, wenn aus Nacheindicker Trübwasser anfällt
Zentrat Zentrifuge	Z	Qualifizierte Stichproben	Wöchentlich
Entwässerter Schlamm	SE	Qualifizierte Stichproben	Wöchentlich
Volumenströme und Temperaturen	Q / T	Qualifizierte Stichproben	tägliche Werte protokollieren
Untersuchungsparameter Schlamm	Probenaufbereitung	Bemerkungen	
TR	nicht notwendig		
oTR o. GV	nicht notwendig		
CSB	homogenisiert	bei RS sehr gut homogenisieren, kein zu kleines Probevolumen	
CSB	filtriert	aus Filtrat der Probe	
TKN	homogenisiert	bei RS sehr gut homogenisieren, kein zu kleines Probevolumen	
TKN	filtriert	aus Filtrat der Probe	
NH4-N	nicht notwendig		
Abf. Stoffe	nicht notwendig		
organ. Säuren als HAC	nicht notwendig		
organ. Säuren Fraktionen	nicht notwendig	Essig-, Ameisen-, Propion-, Butter- und Valeriansäuren über GC	
Untersuchungsparameter Klärgas			
CH4	nicht notwendig		
CO2	nicht notwendig		
H2S	nicht notwendig		
N2	nicht notwendig		
Siloxane	nicht notwendig		

Tabelle 2.4 Proben- Messstellen und Häufigkeit

Matrix		PS	ÜS							
Messparameter und Messstellen und Einheit		VKB	BB	FS FB 1&2	FS FB 3	G FB 1&2	G FB 3	TW NE	Z	SE
Volumenstrom	m ³ /d	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Volumenstrom Gas	m ³ _N /d									
Temperatur	°C	x	x	x	x					
TR	g/l	x	x	x	x					x
oTR bzw. GV	%	x	x	x	x					x
CSB homogenisiert	g/l	x	x	x	x			x	x	
CSB filtriert	mg/l	x	x	x	x			x	x	
TKN homogenisiert	mg/l	x	x	x	x			x	x	
TKN filtriert	mg/l	x	x	x	x			x	x	
NH ₄ -N	mg/l			x	x			x	x	
Abf. Stoffe	mg/l							x	x	
organ. Säuren als HAc	mg/l	x	x	x	x					
organ. Säuren Fraktionen	mg/l	x	x	x	x					
Schwermetalle AbfKlärV	mg/kg _{TS}									x
CH ₄ Faulgas	Vol.-%					x	x			
CO ₂ Faulgas	Vol.-%					x	x			
H ₂ S Faulgas	Vol.-%					x	x			
N ₂ Faulgas	Vol.-%					x	x			
Siloxane Faulgas	Vol.-%					x	x			

Tabelle 2.5 Matrix - Messparameter, Entnahmestelle

Das Messprogramm wurde in der geplanten Form ohne Einschränkungen umgesetzt. Die Messdaten wurden monatlich ausgewertet und in einem Messprotokoll fortgeschrieben. Sie fanden Eingang in den fachlichen Abschlussbericht zum Messprogramm, der durch die Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Dr. Steinle erarbeitet wurde.

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung

Das Vorhaben „Energieautarke Kläranlage Jena“ wurde erfolgreich umgesetzt. Terminlich ergab sich eine Verlängerung, die durch das Hochwasser im Mai und Juni 2013 während der Bauphase des dritten Faulbehälters verursacht wurde.



Abbildung 3.1 Hochwassersituation während der Bauphase

Weitere Terminverzögerungen ergaben sich aus den Auflagen für die Durchführung einer neuen Genehmigung nach BimSchG, sowie aus dem erforderlichen Ausschreibungsfristen für die Beauftragung des Messprogramms. Bei der technischen Umsetzung der geplanten Aufgabenstellungen ergaben sich inhaltlich keine Veränderungen.

3.2. Stoff- und Energiebilanz

Betriebs- und Messergebnisse

Hydraulische Belastung

Die statistische Verteilung der mittleren Tageszuflüsse im Zeitraum vom 01.01.2014 bis zum 31.05.2016 zeigt Diagramm 3.1 sowohl für alle Werte als auch für die Trockenwettertage. Die geringe Streubreite der Trockenwettertage mit einem mittleren Zufluss von ca. 17.000 m³/d (700 m³/h) weist auf einen geringen Fremdwasserzufluss hin. Bezogen auf die Frachtbelastung sind die Zuflüsse sehr gering (mittlere CSB-Konzentration ca. 1.100 mg/l).

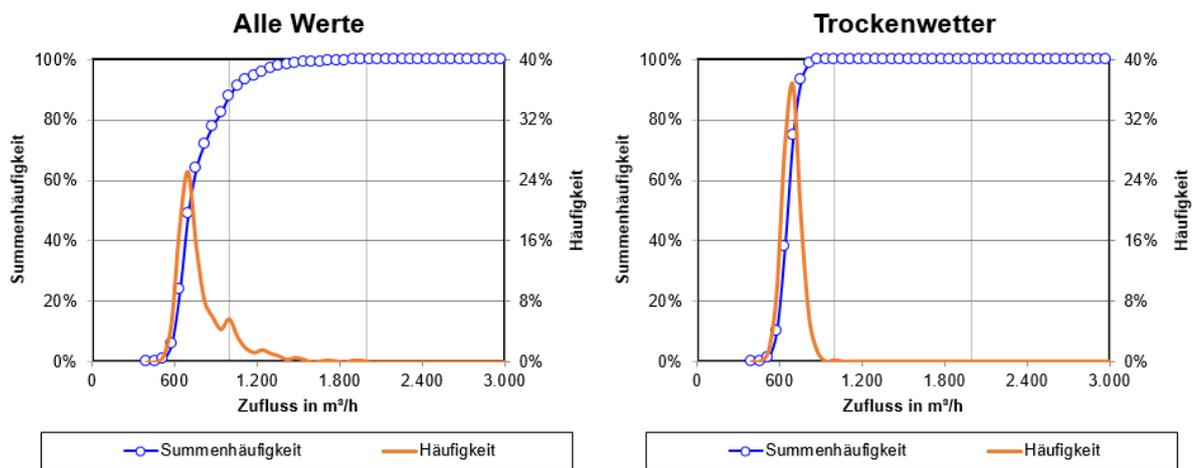


Diagramm 3.1 Statistische Auswertung der hydraulischen Belastung (Tagesmittel)

Frachtbelastung

Die Frachtbelastung CSB und Stickstoff für den Zeitraum 01.01.2014 bis 31.05.2016 zeigen Tabelle 3.1. und Tabelle 3.2 bezogen auf das 85 %-Perzentil ergeben sich für die ZKA Jena mit $120 \text{ g}_{\text{CSB}}/(\text{E} \cdot \text{d})$ eine Einwohnerwertezahl von 190.000 E; bezogen auf den Medianwert ergeben sich bei gleicher spezifischer Fracht ca. 156.000 E.

Das Verhältnis Stickstofffracht zu CSB-Fracht berechnet sich im Mittel zu $0,073 \text{ kg}_N/\text{kg}_{\text{CSB}}$. Dieses Verhältnis ist deutlich niedriger als der übliche Wert für kommunales Abwasser (ATV-DVWK A198) von $0,092 \text{ kg}_N/\text{kg}_{\text{CSB}}$.

Damit sind günstige Verhältnisse für einen niedrigen spezifischen Energiebedarf für die Belüftung (CSB-Abbau und Nitrifikation) gegeben.

Aufgrund der günstigen Randbedingungen bezüglich des N/CSB-Verhältnisses lassen sich auch hohe Stickstoffeliminationsraten erzielen (über 90 %) und der CSB-Abbau liegt bei über 97 %.

	CSB					
	Zulauf	Zulauf BioP	Zulauf VKB	Ablauf VKB	Zul. Bio	Ablauf NKB
	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d
Anzahl	876	873	873	871	870	875
Mittelwert	19.143	3.293	15.856	6.525	9.829	524
Percentil 50%	18.638	3.164	15.369	6.296	9.600	499
Percentil 85%	22.789	4.242	19.144	7.869	11.407	639

Tabelle 3.1 Frachtbelastung CSB

	TN					
	Zulauf	Zulauf BioP	Zulauf VKB	Ablauf VKB	Zul. Bio	Ablauf NKB
	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d
Anzahl	875	872	872	873	873	874
Mittelwert	1.391	240	1.151	847	1.086	114
Percentil 50%	1.384	233	1.141	840	1.078	105
Percentil 85%	1.658	311	1.372	1.037	1.295	152

Tabelle 3.2 Frachtbelastung Stickstoff

Verfahrenstechnische Kennwerte und Abbauleistung Faulbehälter

Schlammmenge und Faulzeit

Durch die Erweiterung des Faulraumvolumens auf insgesamt 6.000 m³ hat sich die Faulzeit deutlich verlängert. Die den Faulbehältern zugeführte Schlammmenge beträgt im Mittel 175 m³/d bestehend aus maschinell eingedicktem Überschussschlamm und Primärschlamm aus dem Vorklärbecken.

Die eingedickte Überschussschlammmenge ($Q_{\text{ÜS, eingedickt}}$) kann zum einen aus der Bilanz aus Faulraumbeschickung ($Q_{\text{zu, FB}}$, gemessen) und Primärschlammmenge (Q_{PS} , gemessen) berechnet werden:

$$Q_{\text{ÜS, eingedickt}} = Q_{\text{zu, FB}} - Q_{\text{PS}}$$

Alternativ kann die eingedickte Überschussschlammmenge ($Q_{\text{ÜS, eingedickt}}^*$) auch über den Volumenstrom des Überschussschlammes aus der Nachklärung ($Q_{\text{ÜS, NKB}}$, gemessen), dessen Trockensubstanzgehalt ($TS_{\text{ÜS, NKB}}$ gemessen vom Betrieb sowie dem gemessenen Trockensubstanzgehalt im eingedickten Schlamm nach der maschinellen Eindickung ($TS_{\text{ÜS, MÜSE}}$, gemessen im Rahmen des Messprogrammes)) berechnet werden:

$$Q_{\text{ÜS, eingedickt}}^* = (Q_{\text{ÜS, NKB}} \cdot TS_{\text{ÜS, NKB}}) / TS_{\text{ÜS, MÜSE}}$$

Der aus diesem Ansatz ermittelbare Volumenstrom zur Faulung errechnet sich dann zu:

$$Q_{\text{zu, FB}}^* = Q_{\text{PS}} + Q_{\text{ÜS, eingedickt}}^*$$

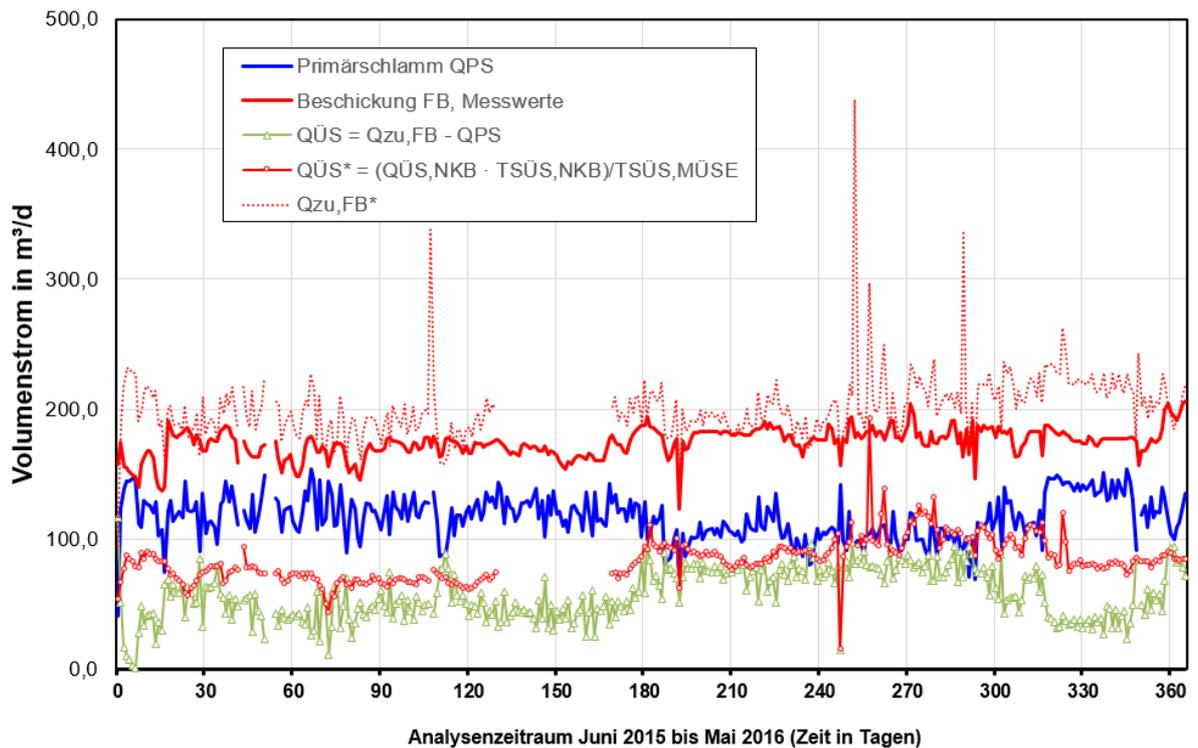


Diagramm 3.2 Volumenströme Schlamm Juni 2015 bis Mai 2016

Es zeigen sich zeitweise deutliche Unterschiede zwischen den auf unterschiedlichen Wegen ermittelten Volumenströmen. Eine Auswertung im Hinblick auf eine Bilanzierung auf Grundlage der einzelnen Tagesfrachten ist unter diesen Umständen nicht möglich. Die Bilanzierung erfolgt damit auf Grundlage von Mittelwerten aus dem Messprogramm und den Betriebsmessungen. Es werden folgende Volumenströme zugrunde gelegt:

Mittlerer Primärschlammfall:	114 m ³ /d
Mittlerer Überschussschlammfall aus NKB:	ca. 440 m ³ /d
Mittlerer Überschussschlammfall aus MÜSE:	70 m ³ /d
Schlammzufuhr zum Faulbehälter:	184 m ³ /d

Ausgehend von den Durchflussmessungen zur Faulraumbeschickung sind die Faulzeiten (gleitende 14d-Mittelwerte) über den Messprogramm-Zeitraum statistisch ausgewertet worden.

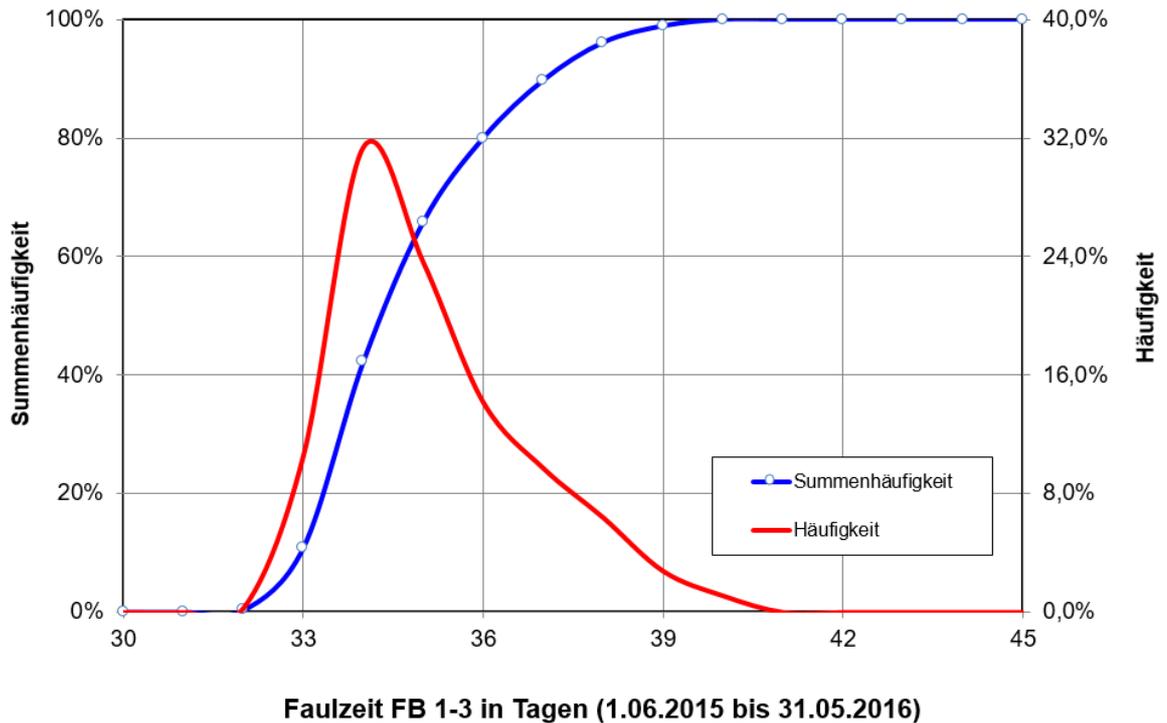


Diagramm 3.3 Häufigkeitsverteilung der Faulzeit (gleitende 14 d-Mittelwerte)

Die Auswertung wurde auf Grundlage der gleitenden 14d-Mittelwerte der Faulzeiten während der Zeit des Messprogramms (01.06.2015 bis 31.05.2016) erstellt. Die mittlere Faulzeit lag in diesem Zeitraum bei 36 Tagen, am häufigsten liegen Werte zwischen 34 und 35 Tagen. Diese Faulzeiten liegen über den Werten, die für die Schlammfäulung üblicherweise empfohlen werden (20 bis 25 Tage).

Faulraumtemperatur

Während des Messprogramms wurden die beiden Faulbehälter 1 und 2 in der Regel mit einer Temperatur bis zu 42 °C gefahren. Den Verlauf der Faulbehältertemperaturen von Januar 2014 bis Mai 2016 zeigt Diagramm 3.4. Nach der Umrüstung der Faulbehälteranlage und dem Einsatz eines weiteren Wärmetauschers konnte bis auf wenige Ausnahmen im Winter 2015/2016 Temperaturen über 40 °C gefahren werden. Weniger als 37 °C Faulraumtemperatur wurde nicht gemessen.

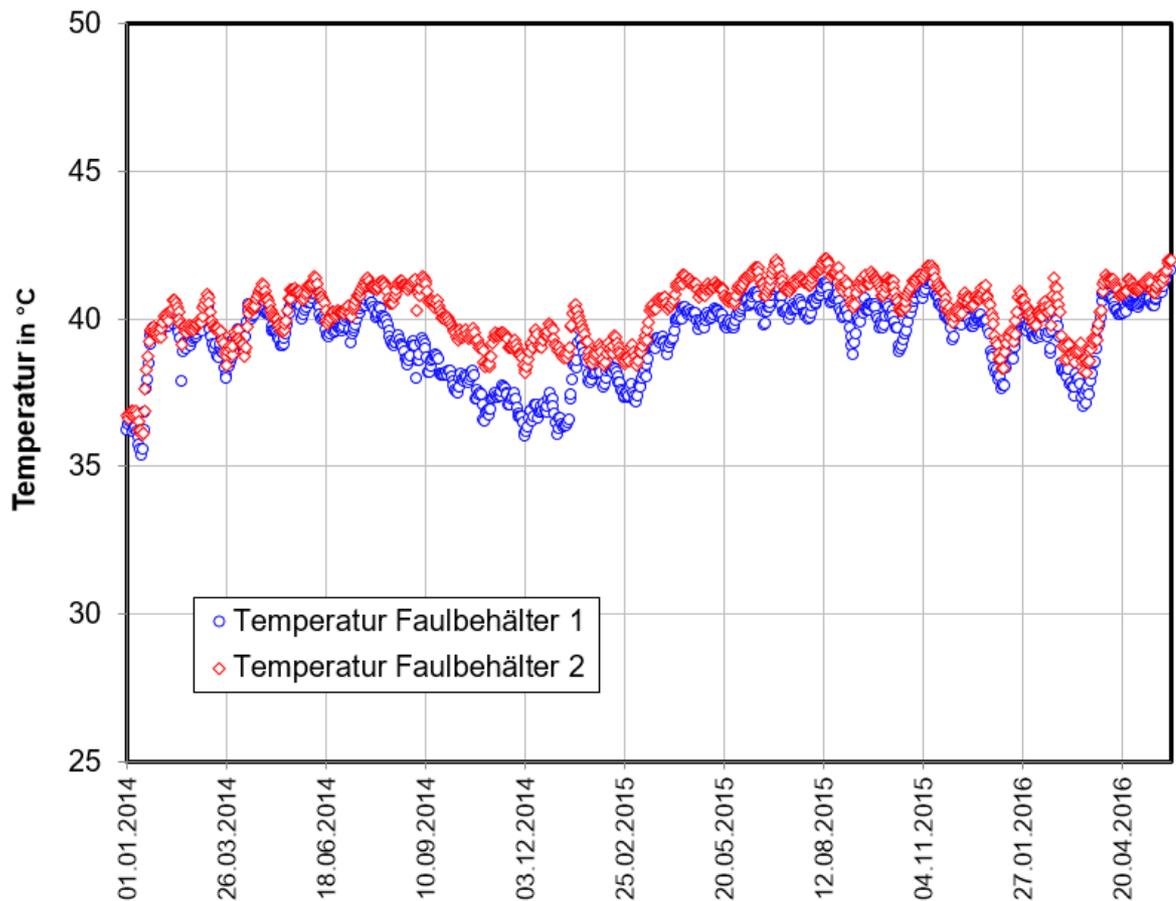


Diagramm 3.4 Verlauf der Faulbehältertemperaturen (Januar 2014 bis Mai 2016)

3.3. Gasanfall

Durch die Erweiterung der Schlammfäulung und die verlängerten Faulzeiten konnte eine signifikante Steigerung des Gasanfalls erzielt werden, wie aus Tabelle zu entnehmen ist. Sowohl der Gesamtanfall als auch der spezifische Gasanfall hat deutlich zugenommen. Die Tabelle vergleicht folgende Zeiträume:

- Datenauswertung 2007 – 2011: vor Inbetriebnahme Faulbehälter 3
- Datenauswertung 2012: unmittelbar vor Bau Faulbehälter 3
- Datenauswertung 2014: unmittelbar nach Bau Faulbehälter 3
- Datenauswertung 2015 – 2016: nach Bau Faulbehälter 3, Messprogramm

Auffallend ist, dass der Gasanfall nach Inbetriebnahme des dritten Behälters nicht nur als Absolut-Wert gegenüber den Werten vor 2014 signifikant gestiegen ist, sondern auch der spezifische Wert bezogen auf die Zulaufmengen der ZKA. Mit der erweiterten Schlammfäulung können ca. 30% des der ZKA zufließenden CSB als Methan gewonnen werden. Vor der Erweiterung lag der Wert bei lediglich 23 bis 25%. Der im Rahmen der Planung erwartete Mehrgasertrag von ca. 10% wurde somit leicht übertroffen.

		Auswertung 2007- 2011	Auswertung 2012	Auswertung 2014**	Auswertung 2015- 2016	Δ in %	
		vor 3. Faulbehälter	vor 3. Faulbehälter	nach Inbe- triebnahme 3. Faulbehälter	nach Inbe- triebnahme 3. Faulbehälter	Vergleich 2007- 2011	Vergleich 2012
Mittlerer Gasanfall	m³/d	2.720	2.730	3.280	3.300	82,9	82,7
CSB- Rohzulauf (Mittelwert)	kg/d	20.500	19.200	18.900	18.600	-8	-3
Einwohnerwerte (DWA-A 126)	E	170.833	160.000	157.500	155.000	-8	-3
Gasanfall je Ein- wohner (120 g CSB/E)	l/E*d	15,9	17,1	20,8	21,3	31	25
Gas/ CSB Roh	m³/kg	0,133	0,142	0,174	0,177	31	25
CSB Gas / CSB Roh*	kg/kg	0,227	0,244	0,298	0,304	31	25
*) Anfang 2014 noch Einfahrphase des 3. Faulbehälters							
**) geschätzt mit CH ₄ - Gehalt 60 % und 2,86 kg CSB/ m³ CH ₄							

Tabelle 3.3 Vergleich Gasanfall 2007-2011 und 2012 zu 2015-2016

Diagramm 3.5 auf Seite 36 zeigt den Gasanfall auf der ZKA Jena, beginnend vom 01.01.2014 bis einschließlich 31.05.2016. Auffallend ist der saisonale Verlauf; in den Wintermonaten liegt der Gasanfall höher als in den Sommermonaten.

Die saisonale Schwankungsbreite liegt bei etwa 800 – 1.000 m³/d (siehe Sinusfunktion im Diagramm). Zum einen ist wegen der Ferienzeit (Universität, Schulen) auch die Kläranlagenbelastung im Sommer etwas geringer, zum anderen findet eine weitergehende Vorversäuerung und Abbau des Abwassers während der Sommermonate statt.

Je nach Art des Betriebs produziert der dritte Faulbehälter einen höheren Anteil am Gasanfall (Parallelschaltung) oder einen geringeren (nachgeschalteter Betrieb). Im nachgeschalteten Betrieb entstehen etwa 10 % bis 12 % des gesamten Gasanfalls im dritten Behälter, im Parallelbetrieb ergaben sich 30 bis 40 %.

Der Parallelbetrieb hat sich in den Zeiten bewährt, in denen der anfallende Schlamm eine höhere Fracht an zur Methanisierung verfügbaren CSB aufweist (Winterzeit, generell höherer Gasanfall). Die Parallelschaltung erfolgte auch aus betrieblichen Gründen, da in der Winterzeit eher mit Schäumen zu rechnen ist und eine gleichmäßige Verteilung des Schlammes auf die drei Behälter (Parallelbetrieb) zu einer pro Behälter geringeren, weniger intensiven Gasentwicklung und Schaumbildung führt.

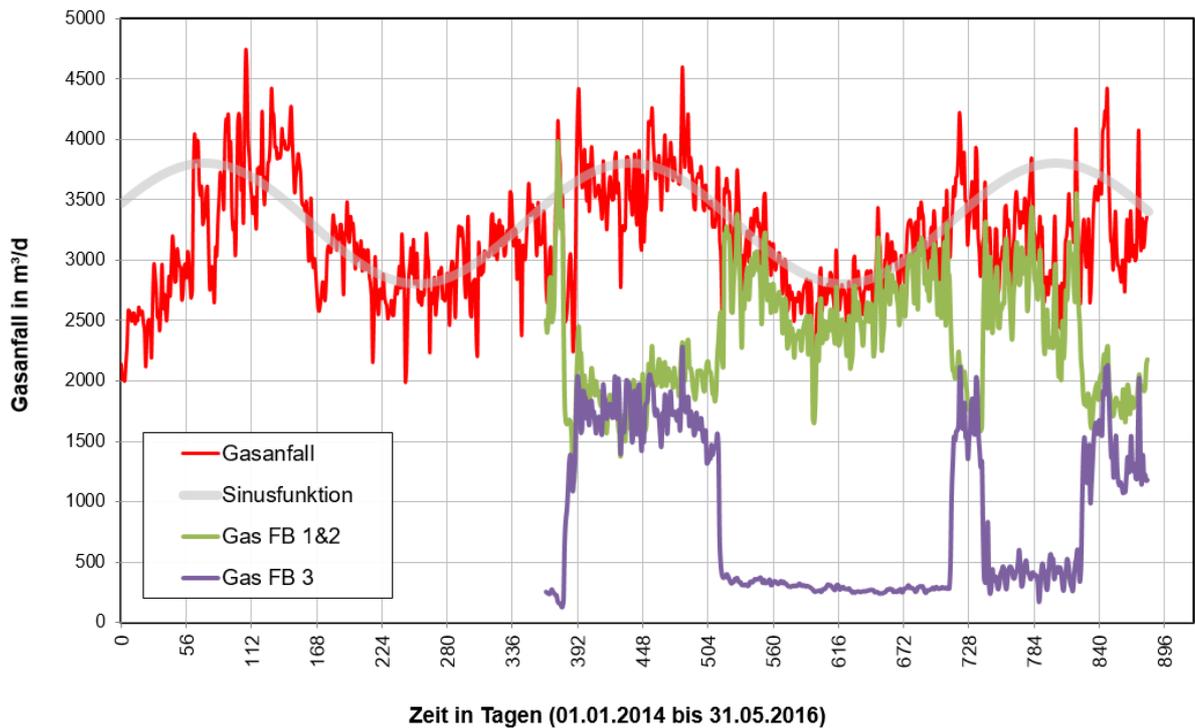


Diagramm 3.5 Gasanfall der Faulbehälter ZKA Jena 2014 bis 2016

Nachfolgend zeigen die Diagramme 3.6 und 3.7 die statistische Verteilung des Gasanfalls für die Daten:

- alle Werte
- Werte während des Betriebs FB als Nachfaulstufe

Aus den Grafiken ist erkennbar, dass bei zweistufigem Betrieb tendenziell ein geringerer Gesamtgasanfall vorlag als bei Parallelbetrieb der 3 Behälter. Die Werte bei nachgeschaltetem Faulbehälter weisen auch eine geringere Streubreite aus.

Es kann vermutet werden, dass dieser Unterschied der Gasentwicklung an der saisonal variierenden Schlammqualität (mit unterschiedlichem Gaspotenzial) liegt, die den Parallelbetrieb vorteilhaft erscheinen ließ.

Die zusätzliche Gasentwicklung im nachgeschalteten Betrieb um ca. 10-12 % entspricht den allgemeinen Erfahrungen mit nachgeschalteten Faulbehältern und damit auch den Erwartungen bei der Planung des dritten Faulbehälters und der Erweiterung der BHKW-Anlage.

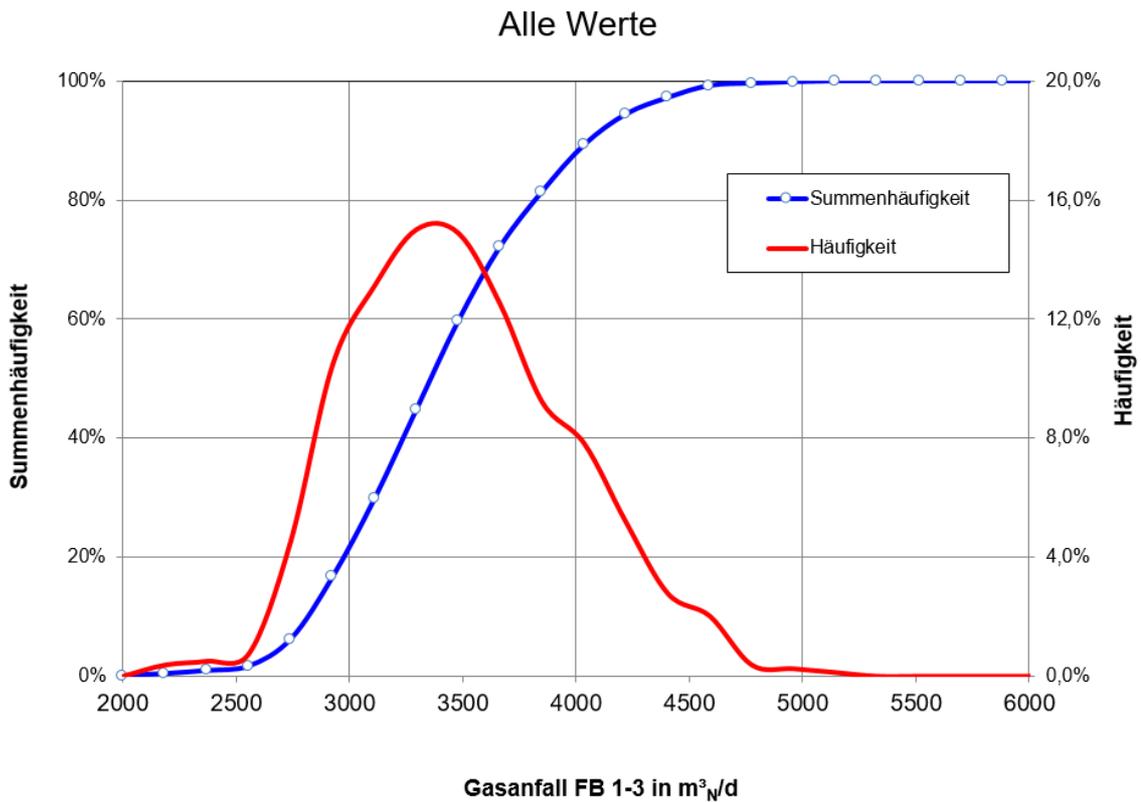


Diagramm 3.6 Statistische Auswertung Gasanfall - alle Werte vom 01.04.2015 bis 31.05.2016

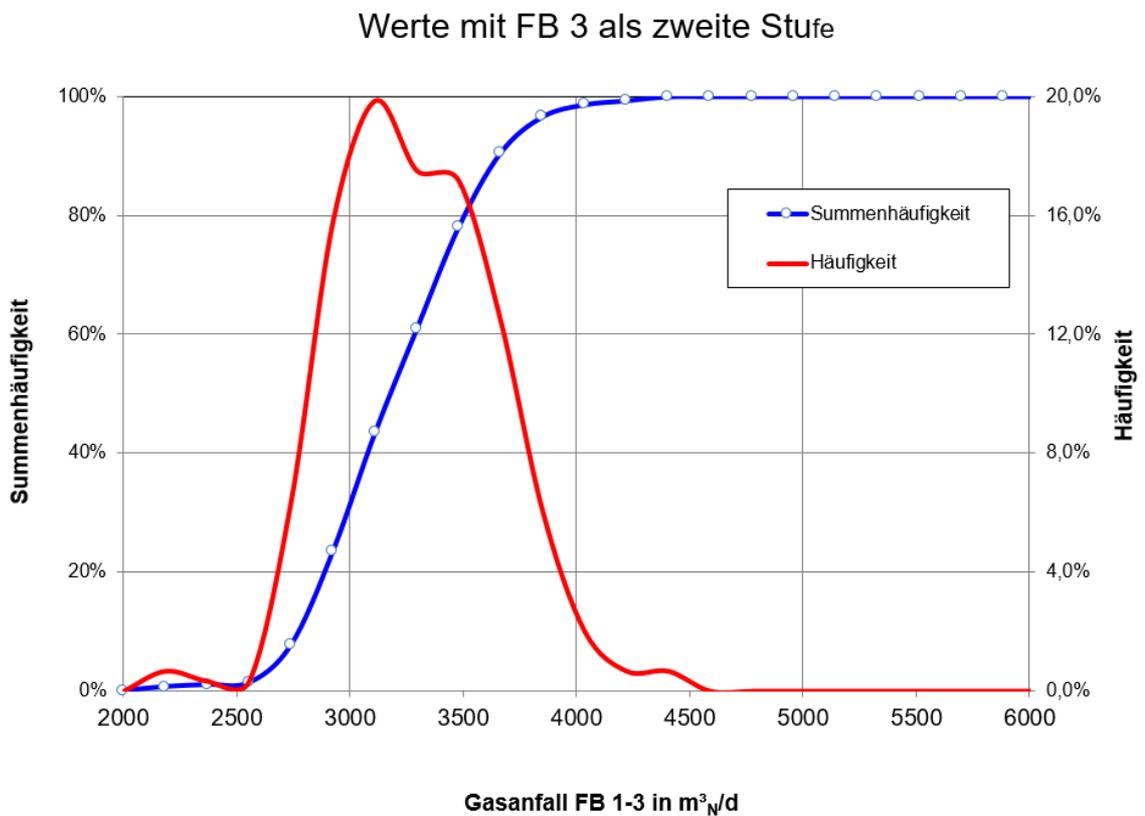


Diagramm 3.7 Statistische Auswertung Gasanfalls 01.04.2014 bis 31.05.2016

Organischer Abbaugrad und CSB

Abbaugrade

Die Mittelwerte der Messergebnisse zu TR, Glühverlust und CSB der verschiedenen Schlämme sind in Tabelle 3.4 zusammengestellt. Die Messwerte zeigen ein etwas unübliches Verhältnis CSB/oTR der untersuchten Schlämme im Bereich von 1,3 bis 1,4. Übliche Werte liegen bei 1,5 bis 1,6. Unter Berücksichtigung der Volumenstromanteile Primär- und eingedickter Überschussschlamm lässt sich der Glühverlust des Rohschlammes abschätzen. Mit dem Glühverlustwert des Faulschlammes lässt sich nach KAPP (1984) unter der Annahme, dass in der Faulung kein Trübwasser abgezogen wird, der organische Abbaugrad η_{oTR} wie folgt über den Glühverlust des Rohschlammes (GV_{RS}) und den des Faulschlammes (GV_{FS}) ermitteln:

$$\eta_{oTR} = GV_{RS}/100 \cdot (1 - (100 - GV_{RS}) / (100 - GV_{FS}))$$

Der so ermittelte Abbaugrad ist sowohl für alle Werte als auch für die Zeit mit nachgeschaltetem Faulbehälter 3 in Tabelle 3.4 eingetragen. Es kann gemäß dieser Auswertung in beiden Fällen von einem Abbaugrad von 50 % der organischen Trockensubstanz ausgegangen werden.

Alle Werte				363 Tage		Primär-schlamm	ÜS-Schlamm	Roh-schlamm	Faulschlamm 1+2	Faulschlamm 3
Ansatz Volumenstrom			m³/d :	114	70	184	137	156		
Trockenrückstand	TR	Mittel	kg/m³ :	57,7	60,2	58,6	32,3	30,3		
Glühverlust	GV	Mittel	:	77%	71%	75%	59%	59%		
Org. Trockenrückstand	oTR	Mittel	kg/m³ :	44,2	42,9	43,7	19,1	18,0		
Chem. O2-Bedarf	CSB	Mittel	kg/m³ :	60,6	54,8	58,4	24,9	22,9		
Verhältnis CSB/oTR		Mittel	:	1,37	1,28	1,33	1,30	1,28		
Organischer Abbaugrad nach KAPP (über GV)				$\eta_{oTR} = GV_{RS}/100 \cdot (1 - (100 - GV_{RS}) / (100 - GV_{FS})) =$					50,4%	
Betrieb FB 3 nachgeschaltet				281 Tage		Primär-schlamm	ÜS-Schlamm	Roh-schlamm	Faulschlamm 1+2	Faulschlamm 3
Ansatz Volumenstrom			m³/d :	114	70	184	184	184		
Trockenrückstand	TR	Mittel	kg/m³ :	59,4	60,4	59,7	32,9	30,5		
Glühverlust	GV	Mittel	:	76%	71%	74%	59%	59%		
Org. Trockenrückstand	oTR	Mittel	kg/m³ :	45,0	42,8	44,2	19,4	18,0		
Chem. O2-Bedarf	CSB	Mittel	kg/m³ :	59,9	56,8	58,7	24,3	22,4		
Verhältnis CSB/oTR		Mittel	:	1,33	1,33	1,33	1,25	1,25		
Organischer Abbaugrad nach KAPP (über GV)				$\eta_{oTR} = GV_{RS}/100 \cdot (1 - (100 - GV_{RS}) / (100 - GV_{FS})) =$					49,6%	

Tabelle 3.4 Ergebnisse des Messprogrammes TR, oTR, CSB (Mittelwerte Juni 2015 bis Mai 2016)

Die Bilanzierung der oTR-Frachten im Zulauf und Ablauf der Faulbehälter ergeben dagegen Abbaugrade von etwa 58 bis 59%.

Unter Ansatz eines mittleren Gasanfalls von 3.300 m³/d errechnet sich pro kg oTR zugeführt eine spezifische Gasproduktion von 410 l/kg_{oTR}. Setzt man den Abbaugrad nach KAPP (1984) von 50 % an, ergibt sich eine spezifische Gasproduktion bezogen auf die abgebaute oTR von 820 l/kg_{oTR,ab}. Dieser Wert kann als plausibel betrachtet werden. Dagegen ist der aus der Bilanzierung der oTR-Frachten ermittelbare Wert von lediglich 706 l/kg_{oTR,ab} als nicht plausibel zu bezeichnen. Es ist auf Grund der unsicheren Ermittlung der Volumenströme und der schwierigen Probenahme beim Schlamm davon auszugehen, dass die Berechnung des Abbaugrades über die Stoffbilanz ungenauer ist als die Ermittlung des Abbaugrades nach KAPP über die Glühverlustwerte.

CSB-Bilanzierung

Für anaerobe Abbauprozesse besteht bei Vernachlässigung von H₂S im Faulgas ein direkter Zusammenhang zwischen dem CSB-Abbau und der produzierten Methanmenge und damit direkt mit dem Heizwert des produzierten Gases (STEINLE, 1987). Aus der CSB-Bilanz des Anaerob-Reaktors bzw. Faulbehälters lässt sich ableiten, dass die abgebaute CSB-Fracht der CSB-Fracht im Faulgas entspricht. Ausgehend davon, dass das Faulgas neben geringen Anteilen von H₂S und anderen Spurengasen nahezu ausschließlich aus CO₂ und CH₄ besteht und CO₂ keinen chemischen Sauerstoffbedarf verursachen kann, lässt sich der CSB des Faulgases aus dem Sauerstoffbedarf zur Oxidation von Methan herleiten. Dieser ergibt sich zu 64 g_{O₂} pro Mol Methan. Mit einem Molvolumen von 22,4 l_N/Mol errechnet sich eine spezifische Methanproduktion von 0,35 l_N/g CSB abgebaut.

Dieser Wert dient als Plausibilitätskontrolle zur Prüfung der Gasmenge im Zusammenhang mit der CSB-Frachtbilanz.

Für die Messperiode lässt sich folgende CSB-Bilanz aufstellen:

Zulauf Faulbehälter (FB)	CSB Fracht	10.739 Kg/d
Ablauf FB	CSB Fracht	4.402 kg/d
Abbau	CSB Fracht	6.337 kg/d
Methananfall	berechnet	2.218 m ³ _N /d
Methankonzentration	Eigenmessung Ø	60 %
Faulgasanfall	Theoretisch über CSB	3.696,3 m ³ _N /d
Faulgasanfall	Betriebsdaten umgerechnet	3.175,7 m ³ _N /d
Faulgasanfall	Theoretisch: Betriebsdaten	86 %

Tabelle 3.5 CSB Bilanz

Die gemessenen Gasanfall- Werte lassen sich damit zu 86 % über die abgeschätzte CSB-Bilanz erklären. Bereits ein durchaus realistischer Messfehler von etwa 5 % bei der Frachtbestimmung kann wiederum die errechnete Differenz verursachen. Somit kann gefolgert werden, dass in Anbetracht der Bestimmungsgenauigkeit der Frachten die gemessenen Gasmengen plausibel sind und der erhöhte Gasanfall damit bestätigt werden kann.

Auf Grundlage der Messwerte aus dem Messprogramm und der verfügbaren Betriebsdaten konnte eine einfache CSB-Bilanz der ZKA Jena aufgestellt werden, die in Tabelle 3.5 auf S. 39 dargestellt ist. Es wurden dabei auch die Rückbelastungen aus Schlammwässerung (SEA) und Überschussschlamm-Eindickung (MÜSE) ansatzweise berücksichtigt.

Der CSB des Kläranlagen- Zulaufs wird zum Einen über den Schlamm aus dem System entnommen (Vorklämung und biologischer Schlamm) und dann der anaeroben Vergärung zugeführt, zum Andern durch den Einsatz von Belüftungsenergie in der Belebung oxidiert (nicht im Teilstrom-BioP-Becken). Die restliche CSB-Fracht gelangt im Wesentlichen als inerte gelöster CSB in den Ablauf der Zentralkläranlage.

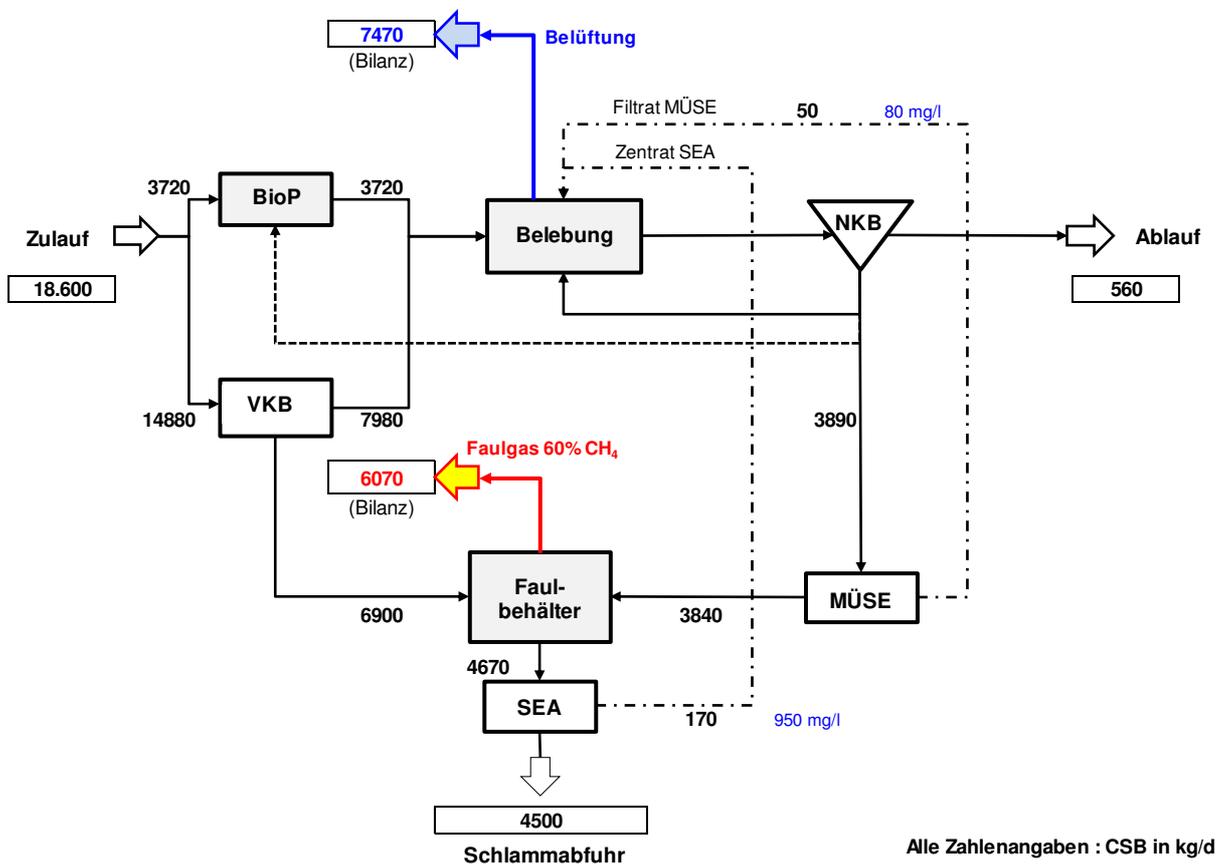


Abbildung 3.2 CSB Bilanz ZKA Jena anhand der Messwerte

Die Bilanz zeigt, dass in etwa:

- 40 % der CSB-Fracht über den Sauerstoffeintrag verringert wird
- 30 % der CSB-Fracht in Faulgas umgesetzt wird
- 25 % der CSB-Fracht mit dem Schlamm abgefahren wird und
- ca. 5 % der CSB-Fracht im Ablauf der Kläranlage verbleibt.

Es ist festzustellen, dass sich der Anteil des in Gas umgesetzten CSB nach der Errichtung des Faulbehälters 3 maßgeblich gesteigert hat.

Eine Optimierung der Energiebilanz der Anlage wäre theoretisch möglich, in dem man durch Belastungserhöhung der Biologie (Absenkung TS-Gehalt) die spezifische Überschussschlamm-Produktion erhöht, damit den zu oxidierenden Teil der CSB-Fracht reduziert und der Faulung noch etwas mehr CSB zuführt. Bei entsprechenden Maßnahmen ist aber darauf zu achten, dass die Prozessstabilität der biologischen Abwasserbehandlung nicht gefährdet wird.

Stabilisierungsgrad und organische Säuren

Im Rahmen des Messprogramms wurde ein besonderer Wert auf die Erfassung der organischen Säuren und ihrer Fraktionen gelegt, um den Stabilisierungsgrad der Schlammfäulung unter diesem Aspekt zu bewerten und Veränderungen bei den Werten durch den Betrieb des Faulbehälters 3 im Zwei-Stufen-Betrieb zu erfassen.

Neben den Abläufen aus den Faulbehältern 1 und 2 sowie 3 wurden auch der Primär- und Überschussschlamm auf den Gehalt an Säuren untersucht.

Diagramm 3.8 zeigt den Verlauf der Messwerte für die Summe der organischen Säuren (als Essigsäureäquivalent) sowohl für den Primärschlamm und Überschussschlamm als auch für die Faulschlämme.

Im Primärschlamm wurden Säuregehalte von 1.000 bis 4.000 mg/l gemessen, wobei diese Werte stark variieren. Erwartungsgemäß sind die Säuregehalte des Überschussschlammes deutlich niedriger, da eine Versäuerung des Belebtschlammes auf dem Wege zur maschinellen Eindickung nahezu ausgeschlossen ist.

Die Summe der organischen Säuren (als HAc-Äquivalent) bei den Faulbehältern kann als verhältnismäßig niedrig bezeichnet werden. Sie liegen sowohl für die Behälter 1 und 2 als auch für den Behälter 3 in der Regel unter 150 mg/l und im Mittel bei unter 100 mg/l, was für ein gutes Stabilisierungsergebnis spricht (vergleiche DICHTL, 1984).

Der statistische Vergleich der Summe der organischen Säuren während des nachgeschalteten Betriebs des Faulbehälters 3 zeigt folgendes Ergebnis:

	Mittelwert	50 %-Wert (Median)
Faulbehälter 1 und 2	94	79
Faulbehälter 3	99	70

Tabelle 3.6 Vergleich der FOS-Gehalte (als Essigsäureäquivalent)

Der Säuregehalt im Faulbehälter 3 zeigt kaum eine Abnahme gegenüber den beiden vorgeschalteten Reaktoren. Dennoch wird noch eine signifikante Gasmenge erzeugt. Es ist möglich, dass im Faulbehälter 3 noch organische Säuren erzeugt werden und diese dann in Methan und CO₂ umgesetzt werden.

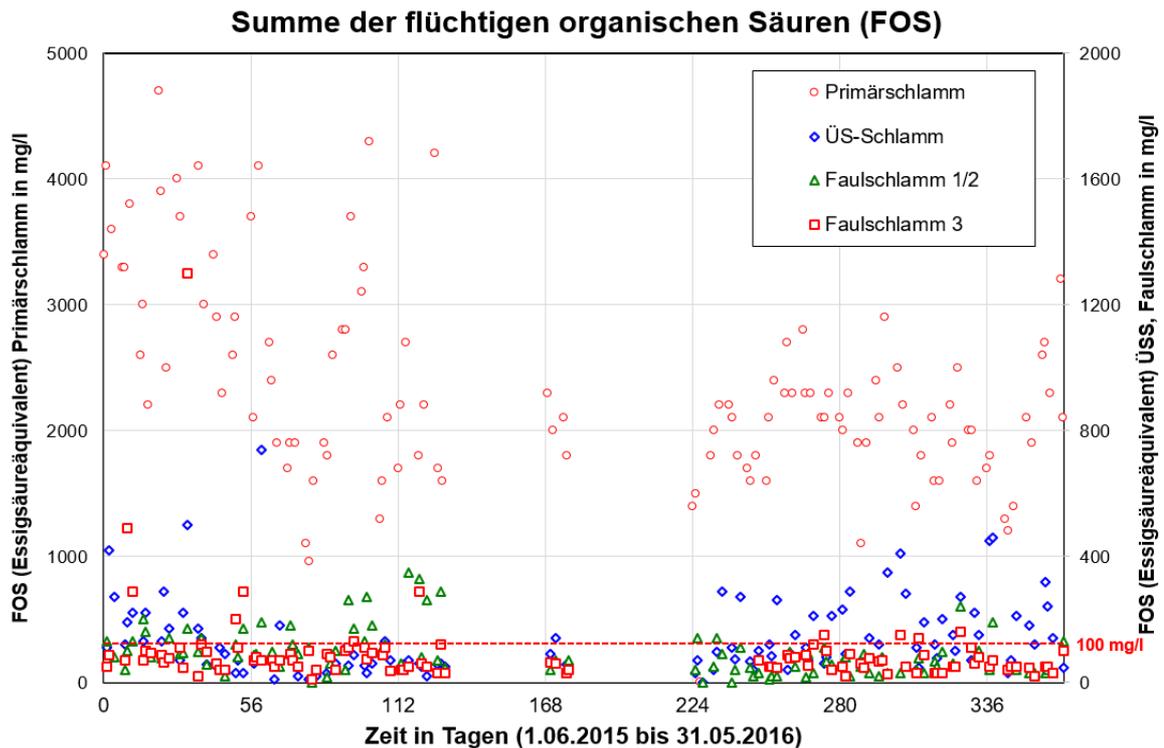


Diagramm 3.8 Verlauf der Summe organische Säuren (Essigsäureäquivalent) in den verschiedenen Schlämmen

Höhere organische Säuren als Essigsäure wurden in den Faulbehältern nicht nachgewiesen (alle Werte weitestgehend unter der Nachweisgrenze von 50 mg/l), lediglich im Primärschlamm waren nennenswerte Konzentrationen von Propionsäure zu verzeichnen.

Entwässerungsgrad Zentrifuge

Im Rahmen der Untersuchung erfolgte auch ein Vergleich der erzielten Entwässerungsgrade bei der Faulschlammzentrifuge vor und nach Inbetriebnahme des Faulbehälters 3.

Folgende Zeiträume wurden verglichen:

- Januar bis Dezember 2012 (vor Inbetriebnahme Faulbehälter 3, 2012)
- Juni 2015 bis Mai 2016 (nach Inbetriebnahme Faulbehälter 3, 2015/2016)

Ausgehend von den Mittelwerten der beiden Vergleichszeiträume (Tabelle 3.7 – Seite 41) kann festgestellt werden, dass der Entwässerungsgrad nach Inbetriebnahme des Faulbehälters 3 gestiegen ist. Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen der beiden Vergleichszeiträume (Diagramm 3.9 – Seite 43), so ist allerdings festzustellen, dass es im Jahr 2012 Zeiten gab, bei denen ähnlich gute Entwässerungsgrade erzielt wurden wie im Zeitraum nach Inbetriebnahme des dritten Faulbehälters.

TR in entwässertem Schlamm		2015/2016	2012
Anzahl	Werte :	247	199
Minimalwert	TR in % :	22,0	21,0
Maximalwert	TR in % :	32,0	26,0
Mittelwert	TR in % :	25,2	23,2
Percentil	15% TR in % :	24,0	22,0
Percentil	50% TR in % :	25,0	23,0
Percentil	85% TR in % :	26,0	25,0

Tabelle 3.7 Vergleich der Entwässerungsgrade Zentrifuge

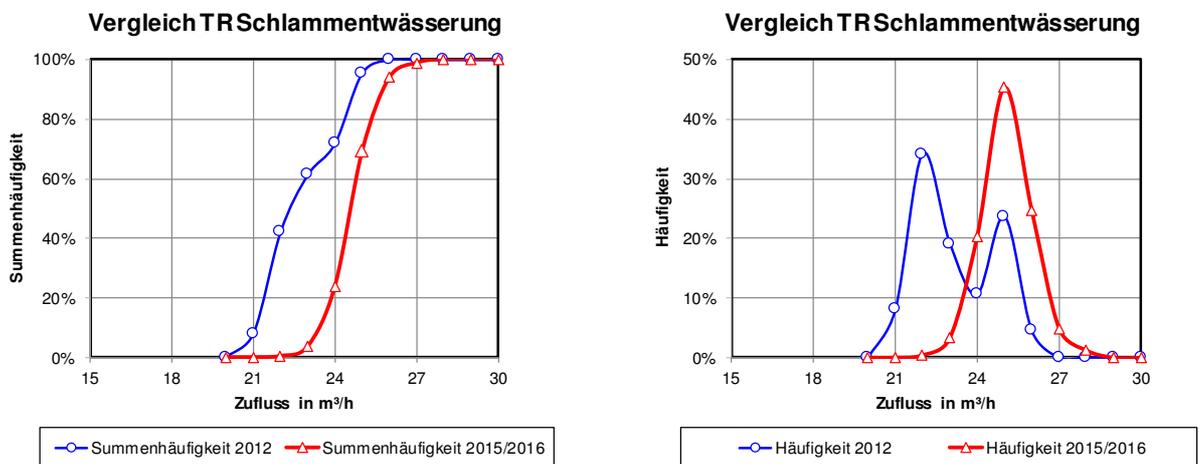


Diagramm 3.9 Vergleich Häufigkeitsverteilungen Entwässerungsgrad Zentrifuge

Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass nach Inbetriebnahme des dritten Faulbehälters sich etwas höhere Entwässerungsgrade eingestellt haben und das Entwässerungsergebnis stabiler ist als im Jahr 2012.

Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Steigerung des Gasanfalls

Es konnte nachgewiesen werden, dass durch den Bau des dritten Faulbehälters sowohl absolut eine Steigerung der Gasproduktion um über etwa 15 % gegenüber dem Zeitraum vor dem Betrieb des dritten Behälters erfolgt. Die bezogen auf die CSB-Zulaufkraft berechnete spezifische Gaserzeugung stieg um über 20 % (siehe Tabelle auf Seite 35). Die mit dem Projekt „3. Faulbehälter“ kalkulierte Steigerung der Gasproduktion wurde nach diesen Messungen leicht übertroffen.

Abbaugrad der Schlammfäulung

Auf Grundlage der Bilanzierung der TR und oTR-Frachten und der Berücksichtigung der gemessenen Glühverlustwerte konnte ein Abbau der organischen Trockensubstanz in der Schlammfäulung von ca. 50 – 55 % nachgewiesen werden; diese Zahl entspricht einem üblichen bis leicht erhöhten organischen Abbau bei konventionellen Schlammfäulanlagen.

Die in Jena gemessenen Verhältnisse CSB/oTR im Roh- und Faulschlamm von 1,3 liegen niedriger als die üblichen Erfahrungswerte von 1,5 bis 1,6 kg_{CSB}/kg_{oTR}. In wie weit dies eine spezielle Eigenschaft des Klärschlammes aus Jena darstellt, kann nicht abschließend beurteilt werden.

Dennoch konnte eine weitgehend schlüssige CSB-Bilanz zur -Abwasser- und Schlammbehandlung aufgestellt werden (Tabelle 3.5 – Seite 37), die einen Überblick über die Umsetzung des im Zulauf der Kläranlage anfallenden CSB in Schlamm, Belüftung und Faulgas geben kann.

Stabilisierung

Mittels der Bilanz der organischen Trockensubstanz und des daraus abzuleitenden Abbaugrades in der Fäulung war schon zu erkennen, dass das Stabilisierungsergebnis der Fäulung den Erwartungen bei der vorliegenden langen Verweilzeit sowie der hohen Faulraumtemperatur entspricht.

Die niedrigen Gehalte an organischen Säuren im Ablauf der Faulbehälter und das Fehlen aller höherer organischen Säuren (Propionsäure etc.) im Faulschlamm bestätigen das Ergebnis, dass der Faulschlamm als voll stabilisiert bezeichnet werden kann.

Schlamm entwässerung

Ein Vergleich der Entwässerungsgrade der Faulschlammzentrifuge vor und nach der Inbetriebnahme des dritten Faulbehälters lässt vermuten, dass durch den dritten Behälter tendenziell bessere Entwässerungsergebnisse erzielt werden. Ob dies alleine auf den dritten Faulbehälter zurückzuführen ist, kann anhand der verfügbaren Daten allerdings nicht eindeutig geklärt werden.

Stromverbrauch, Eigenenergieerzeugung, Grad der Eigenversorgung

Diagramm 3.10 zeigt den Stromverbrauch, die in den BHKW erzeugte elektrische Energie und den Grad der Eigenversorgung der ZKA als Jahresmittelwerte.

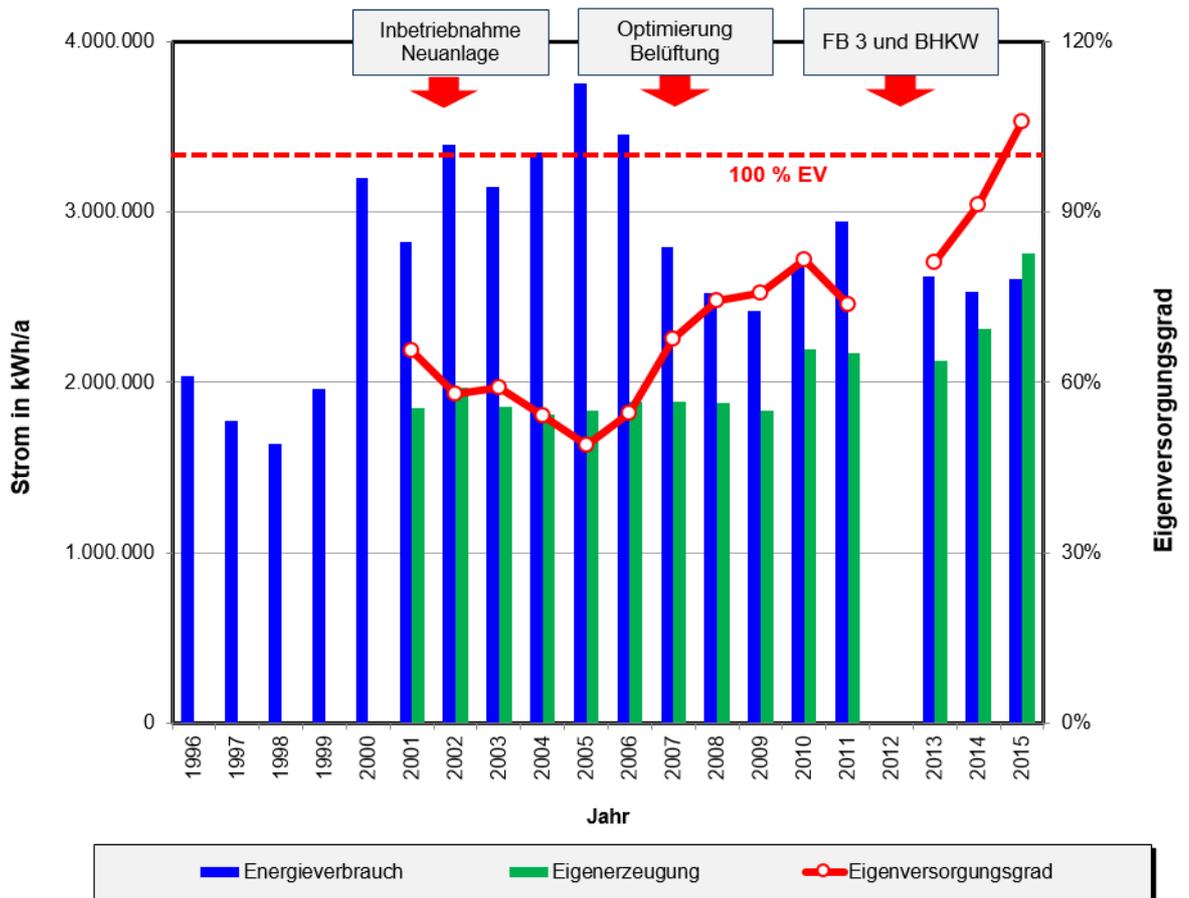


Diagramm 3.10 Energieverbrauch, Eigenenerzeugung u. Eigenversorgungsgrad ZKA 1996 bis 2015

Im Rahmen des Messprogrammes wurden der Energieverbrauch nach Verbrauchsgruppen und die Eigenversorgung im Einzelnen festgestellt. In der Energieanalyse wurde bestätigt, dass die Eigenenergieerzeugung im Untersuchungszeitraum dauerhaft größer war als der Verbrauch an Elektroenergie durch die Kläranlage. Da eine „Mitversorgung“ externer Verbraucher außerhalb der Kläranlage besteht, wurden diese Verbräuche aus der statistischen Erfassung der Eigenversorgung herausgerechnet. Zu beachten ist, dass in der Energieanalyse ein Kalenderjahr als Betrachtungszeitraum gewählt wurde, während das Messprogramm einen abweichenden Zeitraum vom 01.06.2015 bis 31.5.2016 betrachtet.

ZKA Jena		STROM-Verbrauch und Energieeffizienz der Verbrauchsgruppen					Gegenüberstellung			
								2014 / 2015		
								vor / nach Umbau		
Funktionseinheit / Anlagengruppe (Hauptanlagen)	Energyverbrauch absolut	Energyverbrauch absolut	Energyverbrauch spez.	Energyverbrauch spez.	Verhältnis Stromverbrauch spez.	Mehr-/Minder-Energieverbrauch absolut	Bemerkung	Vergleichswerte θ_{spez}		Bewertung
	kWh/a	kWh/a	kWh/EW x a	kWh/EW x a	%	kWh/a		Optimal-Bereich Zielwerte	Optimalwerte und -bereich	
	2014 vor Umbau	2015 nach Umbau	2014 vor Umbau	2015 nach Umbau	2015/2014 nach- / vorher	2015 nach Umbau		UBA KSTK	DWA	
Belastungswert (EW)										
Mechanik	154.700	149.500								
Biologie	79.206	76.544								
Schlammweg	154.700	149.500								
Jahresabwassermenge (m³/a)	6.675.215	6.816.193								
Belebung Belüftung	1.196.564	1.248.953	15,1	16,3	108	95.831	Erhöhung	10		Optimierungschance
Schlammwässerung / Zentrifuge	231.531	196.365	1,5	1,3	88	-28.336	Reduzierung	1,0	0,7 - 1,0	nahe Optimal-Niveau
Schlammstabilisierung / Faulung	91.706	100.769	0,59	0,67	114	-868	neutral	1,5 ... 2,0		Optimal-Niveau
Beschickung FB	10.342	10.466	0,07	0,07	105	488				
Umwälzung FB	18.904		0,12							incl. 7,5 Mon. Umwälzen FB 3
Umwälzung FB	1.462	28.237	0,01	0,19	1.999	27.757	Erhöhung			in 2014 mit Neu-Aggregaten
Beheizen FB	62.459		0,40							2014 fiktiv mit Alt-Aggregaten
Beheizen FB	93.338	62.066	0,60	0,42	69	-29.113	Reduzierung			
Voreindickung (maschinell)	56.459	47.278	0,4	0,3	87	-7.537	Reduzierung	0,4...0,5		Optimal-Niveau
Schlamm-Austrag	28.648	27.986	0,2	0,2	101	311				keine Kennziffern
Gasreinigung / -verdichtung	140	20.580	0,0	0,1		21.156	Erhöhung			Probetrieb / keine Kennziffern
ÜSS-Pumpwerk	10.332	9.554	0,1	0,1	96	-446				keine Kennziffern
Primärschlamm-Pumpwerk	5.482	5.856	0,04	0,04	111	578				keine Kennziffern
Nacheindickung statisch	4.686	4.985	0,03	0,03	110	472			0,03 - 0,17	Optimal-Niveau
Summe Schlammweg						-14.668	Reduzierung			
Gesamtanlage ohne Heizung + WW	2.781.914	2.906.847	18,0	19,4	108			19,0*		Optimal-Niveau
Gesamtanlage	2.781.914	2.906.847	18,0	19,4	108			---		* Zuschlag 1,0 für Zulauf-PW

Übersicht: Gegenüberstellung der Jahre 2014 (vor Maßnahme) und 2015 (nach Maßnahme) für die Verteilung des Energieverbrauches nach Verbrauchsgruppen und Energetische Bewertung des Istzustandes – Schwachstellenanalyse
Legende: UIP-projektrelevante Anlagen
 REIHENFOLGE der Verbrauchsgruppen nach energetischer Relevanz
 GRÜN-Schrift IMPULS-Programm Hessen, B. Haberkorn

Tabelle 3.8 Stromverbrauch und Energieeffizienz von Verbrauchsgruppen (vor und nach der Investition)

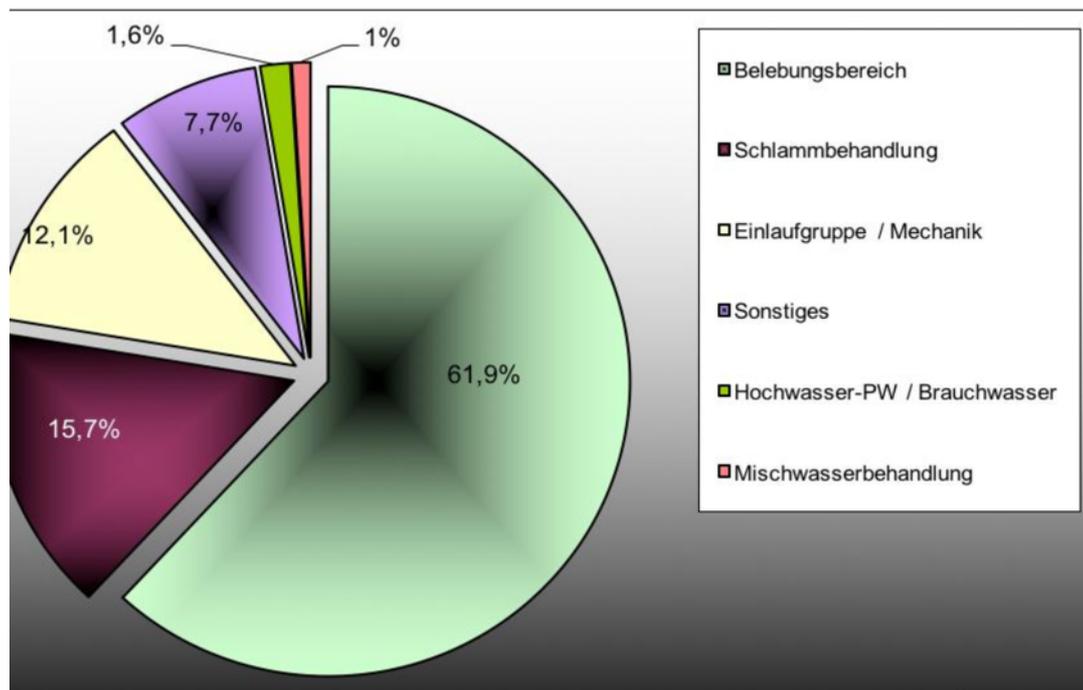


Diagramm 3.11 Prozentuale Verteilung der Energiebedarfsmengen nach Klärwerkseinheiten

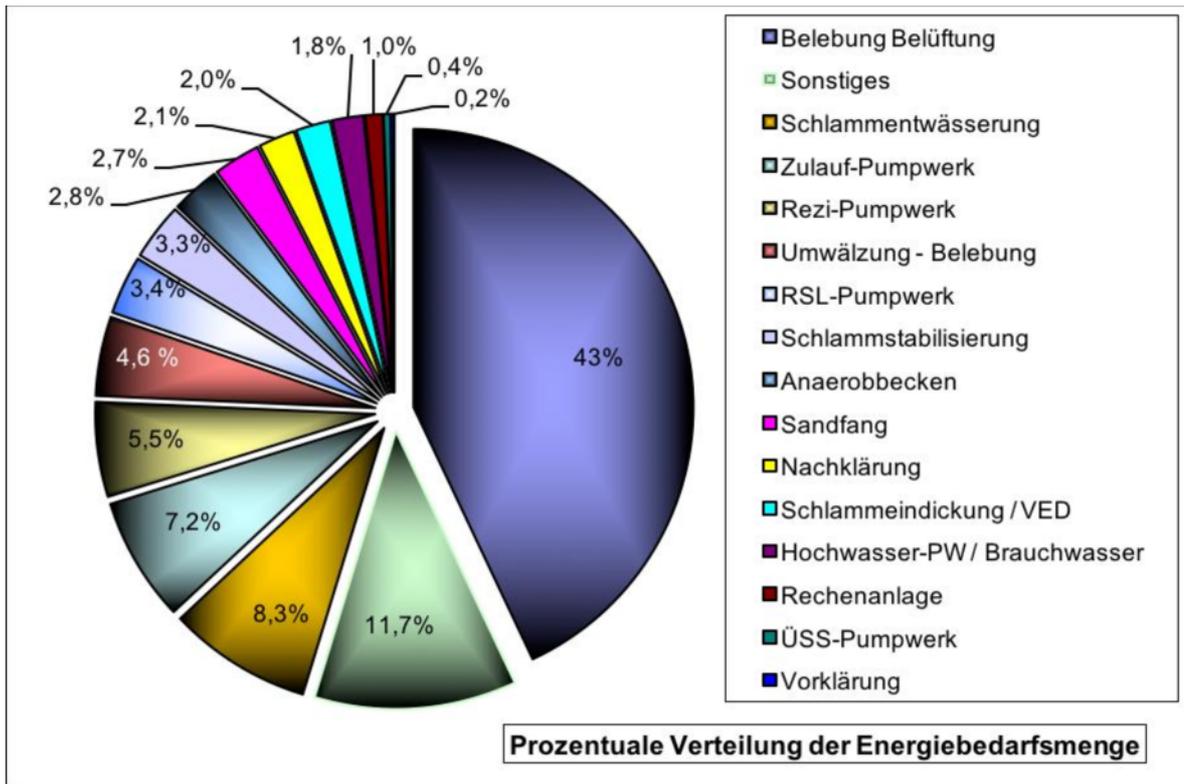


Diagramm 3.12 Verteilung der Energiebedarfsmengen auf Verbrauchsgruppen

Die Analyse einzelner Verbrauchsgruppen weist noch auf Reserven und Optimierungspotentiale hin. Insgesamt ist erkennbar, dass sich durch die Investitionen Synergieeffekte beim spezifischen Energieverbrauch in allen Verbrauchsgruppen zeigen.

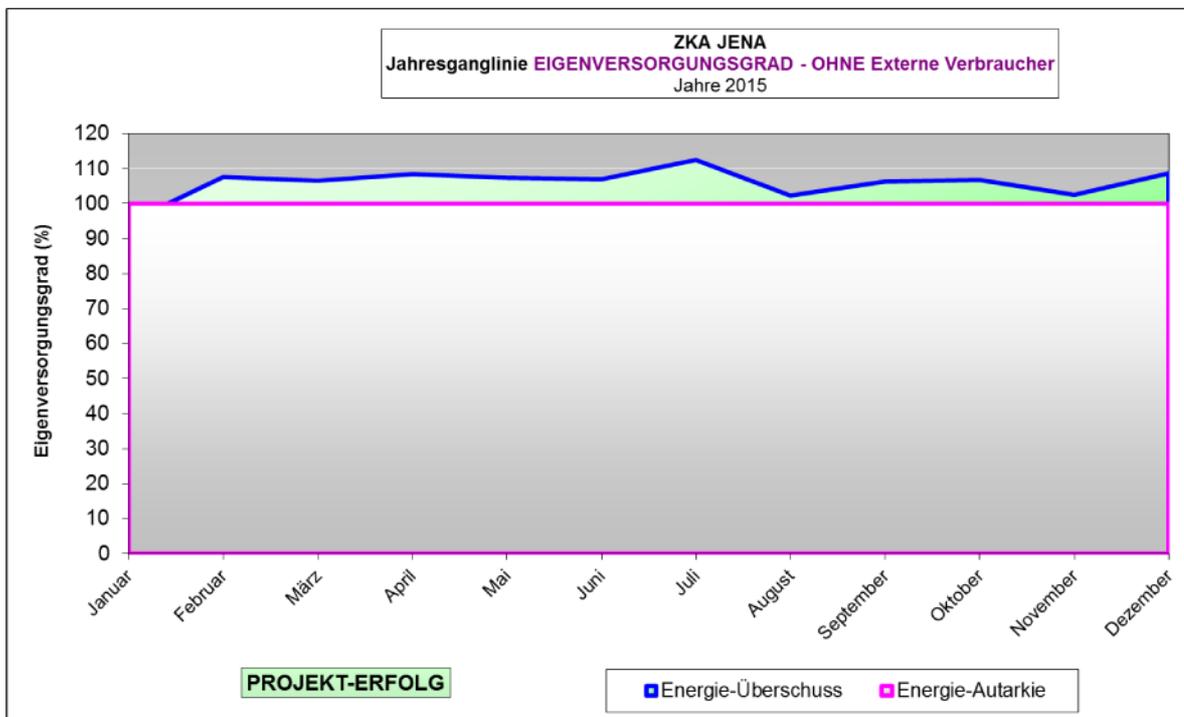


Diagramm 3.13 Jahresganglinie Eigenversorgungsgrad (Energieanalyse)

3.4. Umweltbilanz

Bei der Umweltbilanz werden aus den nach 3.2. dargestellten Stoffströmen und Energiebilanzen insbesondere betrachtet:

- die gesteigerte Menge an Eigenstromerzeugung
- die reduzierte Menge von Energiebezug aus dem Netz des EVU
- die Verringerung der Schlammengen durch biologischen Abbau zu Gas
- die Verringerung der Schlammengen durch Verbesserung der Entwässerungseigenschaften

Für die ZKA Jena bedeutet das für Jahr 2015

	2014	2015
Stromverbrauch	2.781.914 KWh	2.906.847 KWh
Stromerzeugung	2.311.693 KWh	2.758.430 KWh
Stromeinkauf *	470.221 KWh	0
CO ₂ - Äquivalent	310,81 t/a	616,5 t/a

* Bereinigt durch Abzug Verbrauch externer Unternehmen auf dem Gelände, die nicht der ZKA zuzurechnen sind

Tabelle 3.9 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse 2015

Das CO₂-Äquivalent errechnet sich aus 932.725 kW/h entstanden aus erhöhter Eigenproduktion und vermiedenem Energiebezug.

(2014 = 2.311.693 Eigenerzeugung bei 470.221 Strombezug → 310,81 t CO₂ äqui/a)

Der Abbaugrad der oTR im Rahmen der Faulung wurde durch Messungen der Zu- und Abauffrachten der Faultürme auf 58 – 59 % und durch Messungen über den Glühverlust auf ca. 50% ermittelt. Bisher wurden in der Faulung Abbaugrade von 38 % erreicht, die zu einer Minderung der Feststofffracht des Schlammes um insgesamt 27 % führten.

Wird eine lineare Übertragbarkeit dieser Verhältnisse angesetzt, ist bei einem Abbaugrad von 50 % eine Minderung der Feststofffracht um 35% zu erwarten, was eine Reduzierung gegenüber der bisherigen Schlammfracht um 8% bedeutet. Rechnet man mit 58 – 59% Abbaugrad, ergeben sich Minderungen der Feststofffracht um 41 % bzw. 42 %, einer Steigerung der Reduzierung um 14 – 15 %. Hochgerechnet auf ca. 11.000 t Klärschlamm im Jahr bei einer TS von 27%, ergibt sich eine **Minderung der Klärschlammengen um ca. 1.100 t p.a.**

Da die Verbesserung des Entwässerungsgrades zwar tendenziell besteht, aber noch keine belastbaren Werte dafür vorliegen, soll nur auf einen imaginären Wert hingewiesen werden, denn die Erhöhung des Entwässerungsgrades um 1 % bedeutet eine Reduzierung des Klärschlammgewichtes (Entsorgungskosten) um ca. 100 t.

Bei einer zukünftig angestrebten Verbrennung von Klärschlamm, sind diese Ergebnisse in unmittelbare Beziehung zu setzen zu Verbrennungskapazitäten und Emissionen.

3.5. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Wirtschaftlichkeit der Faulung

Untersuchte Alternativen der Kostenvergleichsrechnung

In der Kostenvergleichsrechnung gemäß der LAWA-Leitlinien (LAWA 2005) wurden folgende Alternativen betrachtet:

Alternative 1: Weiterbetrieb von 2 Faulbehältern mit bisherigem Gasertrag und unverändertem Abbaugrad der organischen Trockensubstanz

Alternative 2: Neubau eines dritten Faulbehälters mit höherem Gasertrag und besserem Abbaugrad der organischen Trockensubstanz

Alternative 1 verursacht keine weiteren Investitionen und entsprechende Abschreibungen, wogegen Alternative 2 zusätzliche Kapitalkosten verursacht und dafür einen Betriebskostenvorteil erzeugt.

Berücksichtigung der Maßnahmenförderung durch die KfW

Die Maßnahme wird im Rahmen der Förderung zur Energieeffizienz „Energieautarke Kläranlage Jena“ von der KfW mit bis zu 30 % der Investitionskosten gefördert, maximal jedoch mit einem Betrag von bis zu 595.476 € gemäß Förderbescheid vom 27.09.2011.

Der sich ergebende Betrag wird *einmalig bei der Erstinvestition* von Maschinen, Bau- und elektrotechnischen Anlagen von den berechneten Kosten abgezogen. Die Re-Investitionen nach Ablauf der gemäß LAWA angesetzten Nutzungsdauern werden ungekürzt berücksichtigt.

Finanzmathematische Ansätze (nach LAWA)

Untersuchungszeitraum

Entsprechend den Empfehlungen der LAWA wird ein Untersuchungszeitraum von 30 Jahren gewählt, welcher der angesetzten Nutzungsdauer der Bautechnik entspricht.

Zinssatz

Gemäß KVR-Leitlinien der LAWA wird ein langfristiger Zinssatz von real 3 % als Standardwert zu Grunde gelegt.

Umrechnung in Kostenbarwerte

Als Vergleichskriterium werden die Kostenbarwerte der beiden Alternativen vereinfacht mit Beginn der Investition als Bezugszeitpunkt ($n=0$) herangezogen. Auf eine detailliertere Betrachtung mit Berücksichtigung des Erstinvestitionszeitraums (Bauzeit) wird verzichtet, da dieser Zeitraum gering ist gegenüber dem angesetzten Untersuchungszeitraum.

Die anfallenden Einzelkosten (Erstinvestition und Re-Investitionen) werden in Abhängigkeit der zeitlichen Distanz zum Bezugszeitpunkt (n) und dem Zinssatz i in der Kostenreihe umgerechnet mit dem Diskontierungsfaktor:

$$DFAKE(i,n) = 1/(1+i)^n$$

Aus der Summe dieser umgerechneten Einzelkosten über den Untersuchungszeitraum ergibt sich der Kostenbarwert für die Investitionen und Re-Investitionen.

Die progressiv steigenden Kostenreihen (Strom, Entsorgung) werden in Kostenbarwerte umgerechnet, indem die jährlichen Kosten zum zeitlichen Nullpunkt mit dem Diskontierungsfaktor für Reihenprogression:

$$DFAKRP(r; i; n) = (1+r) * \left[\frac{(1+i)^n - (1+r)^n}{(1+i)^n * (i-r)} \right]$$

multipliziert werden. Für den Untersuchungszeitraum von 30 Jahren (n=30), dem Zinssatz von 3 % und einer jährlichen Steigerungsrate von 2,5 % ergibt sich der Faktor DFAKRP (r; i; n) zu 27,8451.

In der vorliegenden Kostenvergleichsrechnung wird der kostenbewertete Nutzen der Faulung (Einsparung an Stromverbrauch durch gestiegene Eigenstromerzeugung, Reduzierung der Entsorgungskosten durch zusätzlichen Abbau organischer Trockensubstanz) abzüglich der Wartungs- und Instandhaltungskosten für die Neuinvestitionen als progressiv steigende Kostenreihe in der Alternative 1 ohne Faulung berücksichtigt.

Ergebnis

Das Ergebnis der Kostenvergleichsrechnung ist in Tabelle 3.10 dargestellt.

Ergebnis der Kostenvergleichsrechnung			
	Alternative 1	Alternative 2	Differenz
Erstinvestition - Zuwendung KfW:	- €	1.598.170 €	-1.598.170 €
Re-Investition nach 15 Jahren:	- €	939.290 €	-939.290 €
Mehrkosten Betrieb p.a.	101.004 €	- €	101.004 €
Barwert Einzelkosten:	- €	2.201.065 €	-2.201.065 €
Barwert Kostenreihe:	2.812.463 €	- €	2.812.463 €
Projektkostenbarwert PKBW:	2.812.463 €	2.201.065 €	611.399 €
Jahreskosten p.a.	143.490 €	112.297 €	31.193 €

Tabelle 3.10 Kostenvergleichsrechnung

Es zeigt sich ein Kostenvorteil für die Alternative 2 mit einem um rd. 611.000 € geringeren Projektkostenbarwert (PKBW, Summe Barwert der Einzelkosten und der gleichförmigen

Kostenreihen). Die Erweiterung der Faulung lässt sich somit auch aus wirtschaftlichen Gründen rechtfertigen jedoch nur unter Einbeziehung der beschiedenen Fördermittel.

3.6. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Bei dem durchgeführten Investitionsvorhaben handelt es sich um Maßnahmen nach dem Stand der Technik. Die bisherigen Anstrengungen richteten sich auf eine Verringerung des Eigenverbrauches an Energie. Es wurde bereits vor dem Investitionsvorhaben ein Eigenversorgungsgrad von ca. 73 % erreicht. Dem gegenüber konnten in der Faulgasproduktion die Durchschnittswerte anderer Kläranlagen nicht erreicht werden. Die untersuchten Möglichkeiten zur Steigerung der Eigenenergieerzeugung ließen Potentiale erkennen, die eine komplette Eigenversorgung ermöglichten. Das Investitionsvorhaben dient somit dem Nachweis der Eigenversorgung und soll als Demonstrationsprojekt Möglichkeiten zur Übertragbarkeit erschließen.

4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Das gesamte Investitionsvorhaben zeigte, dass die Realisierungszeiten durch Genehmigungsverfahren und Ausschreibungsfristen eine deutliche Verlängerung erfuhren. Die reinen Bauzeiten und die Inbetriebnahme verliefen planmäßig und hielten die kalkulierten Termine und Kosten ein.

4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)

Das Vorhaben hat durchaus Modellcharakter. Es zeigte sich, dass zunächst die technischen Potentiale zur Senkung des Eigenenergieverbrauches und zur Stabilisierung der energieintensiven Prozesse auszuschöpfen sind, um Energieautarkie zu erreichen. Auf dieser Grundlage können die Maßnahmen zur Erhöhung der Eigenenergieerzeugung beurteilt werden. Aus dem Portfolio lassen sich dann die Hauptrichtungen der Veränderung bestimmen und durch Vorversuche weitgehend absichern.

Nach einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lässt sich dann die Entscheidung treffen.

5. Zusammenfassung/ Summary

JenaWasser ist ein Zweckverband im Sinne des Thüringer Gesetzes über die kommunale Gemeinschaftsarbeit (ThürKGG). Er ist ein Zusammenschluss mehrerer Städte und Gemeinden zur gemeinsamen Erfüllung der kommunalen Aufgaben der Wasserversorgung sowie Abwasserableitung und -behandlung in und um Jena. Der Zweckverband ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts. Der Zweckverband betreibt eine Zentrale Kläranlage in Jena-Zwätzen und mehrere weitere Kläranlagen. Das Leitungsnetz Abwasser im Verbandsgebiet erstreckt sich über ca. 856 km.

Jährlich werden rund 5,5 Mio. m³ Trinkwasser verkauft und rund 6,4 Mio. m³ Schmutzwasser behandelt. Der Jahresumsatz des Verbandes beträgt für die Wasserver- und Abwasserentsorgung rund 39,6 Mio. €, wovon 16,0 Mio. € auf die Wasserversorgung und 23,6 Mio. € auf die Abwasserentsorgung entfallen.

In der Zentralen Kläranlage in Jena-Zwätzen wurden in der Vergangenheit vielfältige technische Maßnahmen zur Senkung des Eigenenergieverbrauches durchgeführt.

Die Langzeitentwicklung (Trendanalyse) für den Energiebezug zeigt nachstehende Grafik.

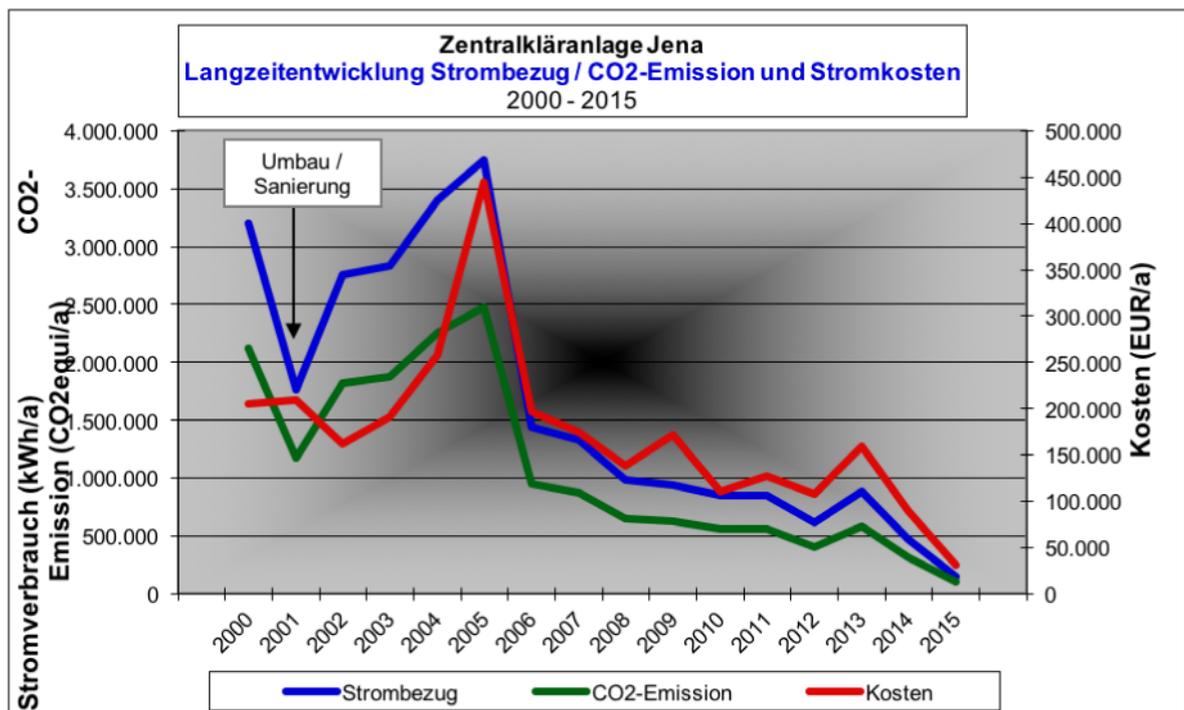


Diagramm 5.1 Energiebedarf STROM gesamt und CO₂-Emission 2014 (vor Umbau)

- Der spezifische Stromverbrauch der Gesamtanlage betrug im Jahr 2014 18,5 kWh/EWBSB.
- Die Anlage weist damit eine sehr gute Energie-Effizienz auf.
- Im Kennziffern-Vergleich positionierte sich die Anlage im optimalen Bereich unterhalb des 10^o-Perzentiles der Unterschreitungshäufigkeit nach DWA-A 216.

Das wurde insgesamt möglich durch eine Erneuerung und Sanierung der Belüftungsleistungen (Drehkolbengebläse und Turboverdichter) und eine Verbesserung der Klärschlammmentwässerung durch den Einsatz einer leistungsstarken Zentrifuge. Sowohl in der Belebungsstufe als auch in der Entwässerung wurden energiesparende Einsatzvarianten nach Belastungssituationen konfiguriert und gesteuert eingesetzt.

Im Vergleich mit anderen Kläranlagen gleicher Größe und Bauart blieb das Klärgasaufkommen deutlich hinter dem Durchschnitt zurück. In einer Betriebsdatenanalyse der Schlamm- und Gasbilanz aus dem Jahre 2011 wurde festgestellt, dass „...die Feststoffbilanz zeigt, dass durch die Faulung die Gesamt-Feststofffracht des Schlammes um 27 % reduziert wird, der Abbaugrad des oTR liegt bei 38 %. Damit ist der schlechte Abbaugrad des oTR nochmals bestätigt. Bei gut funktionierenden Faulungen können oTR-Abbaugrade über 40 bis 55 % erreicht werden. Der spezifische Gasanfall, bezogen auf die abgebaute Trockensubstanz, liegt bei 920 l/kg oTR (Soll: 900 – 1.000 l/kg oTR).“

Da die einzelnen Verfahrensstufen und die technische Ausstattung als Ursachen für diese „Negativbilanz“ ausgeschlossen werden konnten, war eine Konzentration auf die Analyse der Faulung zwingend.

Durch Vorversuche und Laboranalytik wurde der Faulprozess auf Steigerungspotentiale untersucht.

Biologische Verbesserungen im Aufschlussprozess der Faulung zeigten Steigerungspotentiale von 5 - 7 %, eine Verlängerung der Ausfallzeit konnte ein Restgaspotential von ca. 10 % erschließen, eine Wirkungsgraderhöhung bei den einzusetzenden BHKW wies ebenfalls deutliches Potential auf.

Eine Nutzung des Potentials der Eigenstromerzeugung ließ eine Möglichkeit erkennen, die unmittelbare Eigenstromversorgung zu erreichen und energieautark zu werden.

Mit dem Demonstrationsprojekt „Energieautarke Kläranlage“ sollte der Nachweis erbracht werden, dass es möglich ist, die Eigenversorgung mit Strom und Wärme zu erreichen.

Die Investitionen konzentrierten sich auf die Erweiterung der Faulraumkapazität um weitere 2.000 m³. Zu den vorhandenen 2 Faultürmen von je 2.000 m³ kam ein weiterer Faulturm hinzu.

Der Faulturm wurde so eingebunden, dass er sowohl parallel als auch in Reihe gefahren werden kann. Gegenüber den vorhandenen Faultürmen wurde er statt mit einer Gaseinpressung mit einem Rührwerk ausgestattet und über einen zusätzlichen Wärmetauscher ausreichend beheizt.

Zu den bisher eingesetzten 2 BHKW von je 250 kW mit einem Wirkungsgrad von ca. 33 % wurden um ein Grundlast-BHKW von 400 kW mit einem Wirkungsgrad von 41 % erweitert. Die zusätzlichen Gaserträge welche in den Grundlast BHKW nicht verstromt werden können, werden durch ein 250 kW- BHKW verstromt, wobei das zweite 250 kW- BHKW in Reserve gehalten wird.

In einem einjährigen Messprogramm, das durch das UBA vorgegeben wurde, war der Nachweis zu erbringen, in wie weit das Ziel der Investition erreicht werden konnte.

Es ist festzustellen, dass der Eigenversorgungsgrad über 100 % beträgt und im gesamten Verlauf des Messprogramms diese Überversorgung bestand.

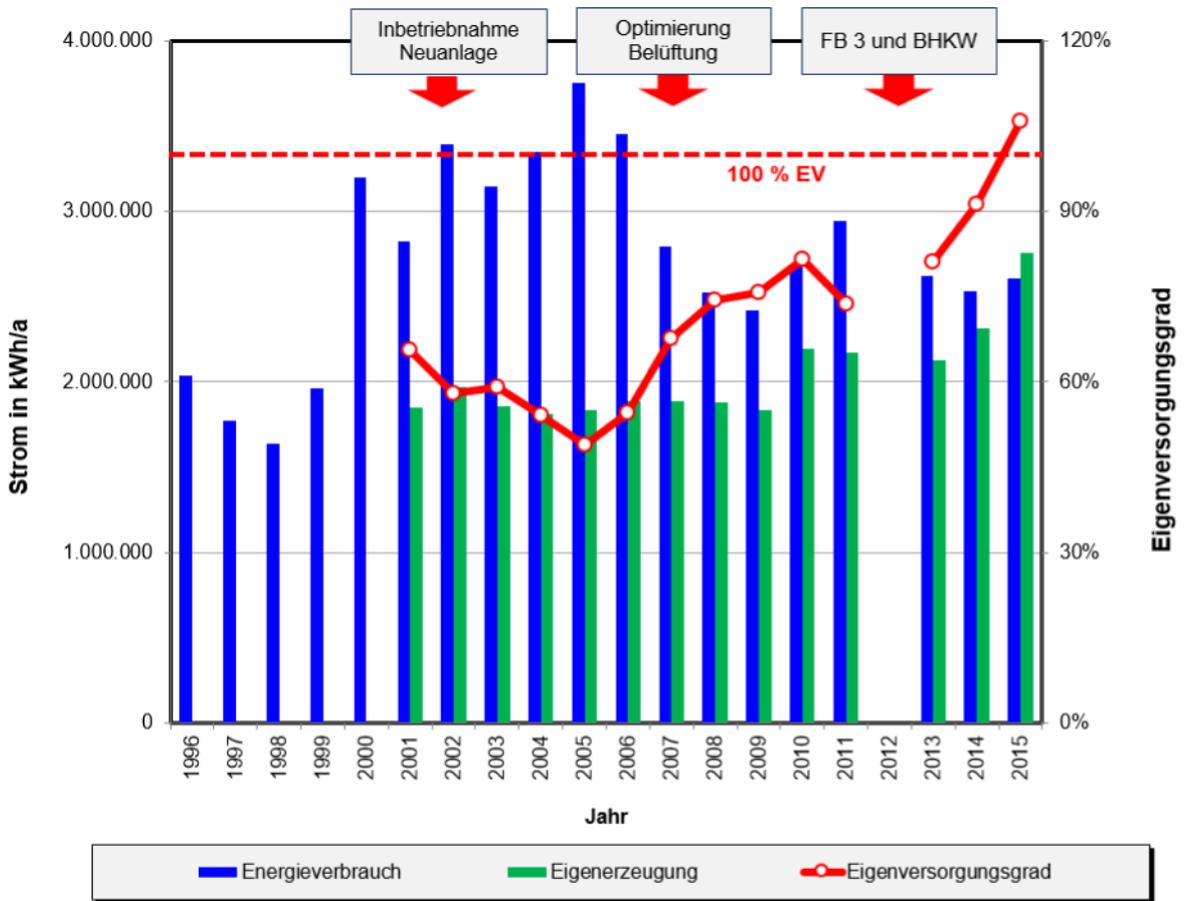


Diagramm 5.2 Energieverbrauch, Eigenerzeugung u. Eigenversorgungsgrad ZKA 1996 bis 2015

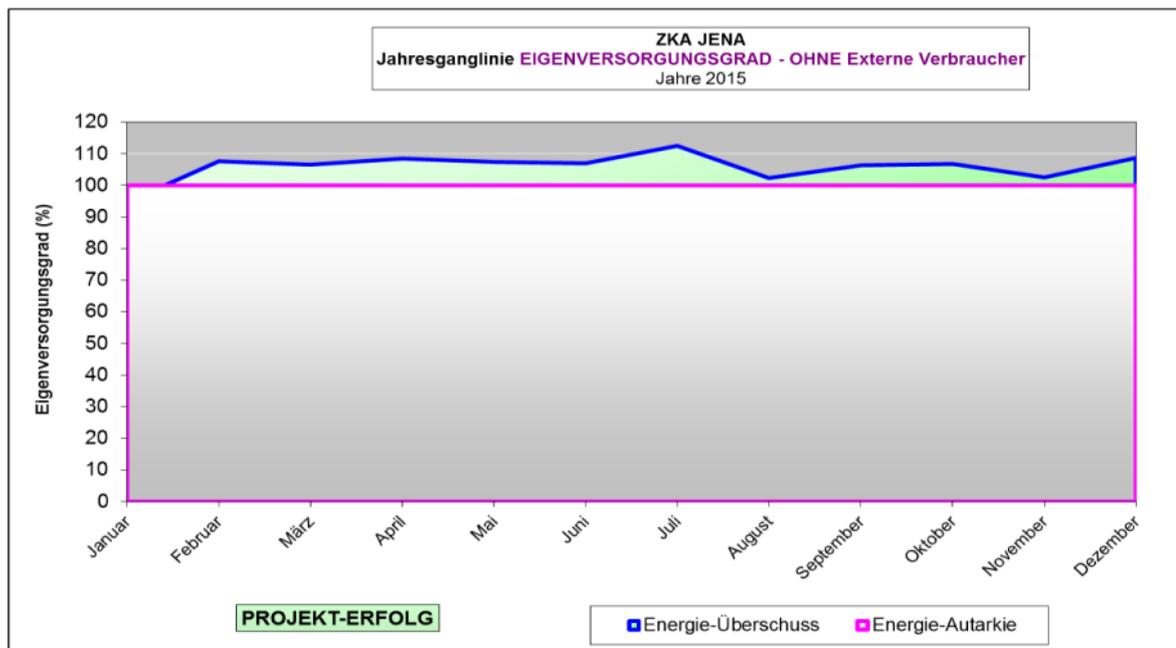


Diagramm 5.3 Jahresganglinie Eigenversorgungsgrad (Energieanalyse)

Damit wurde das Ziel der Investition erreicht. Betriebswirtschaftlich bedeutet das eine Amortisationszeit von unter 9 Jahren. Die Analyse einzelner Verbrauchsgruppen weist noch auf Reserven und Optimierungspotentiale hin. Insgesamt ist erkennbar, dass durch die Investitionen Synergieeffekte beim spezifischen Energieverbrauch in allen Verbrauchsgruppen bestehen.

Das Vorhaben hat Modellcharakter, da es sich bei den Investitionen um Lösungen nach dem Stand der Technik handelt und keine speziellen technischen Lösungen entwickelt und eingesetzt wurden.

Summary

JenaWasser is a special purpose association within the meaning of the Thuringian law on local community work (ThürKGG). It is a combination of several municipalities to set common performance of municipal tasks of water supply and waste water disposal and treatment in and around Jena. The Zweckverband is a public corporation. The Zweckverband operates a central wastewater treatment plant in Jena Zwätzen and several other water treatment plants. The sewers in Jena and the districts covers about 856 km.

JenaWasser is selling 5.5 million m³ drinking water and treated approximately 6.4 million cubic meters of waste water annually. The annual turnover of the association is total of approximately € 39.6 million for water supply and sanitation which € 16.0 million attributable to the water supply and € 23.6 million to sanitation.

In the Central WWTP in Jena-Zwätzen various technical measures to reduce the intrinsic energy consumption were conducted in the past.

The long-term evolution (trend analysis) for the supply of energy shows the graph below.

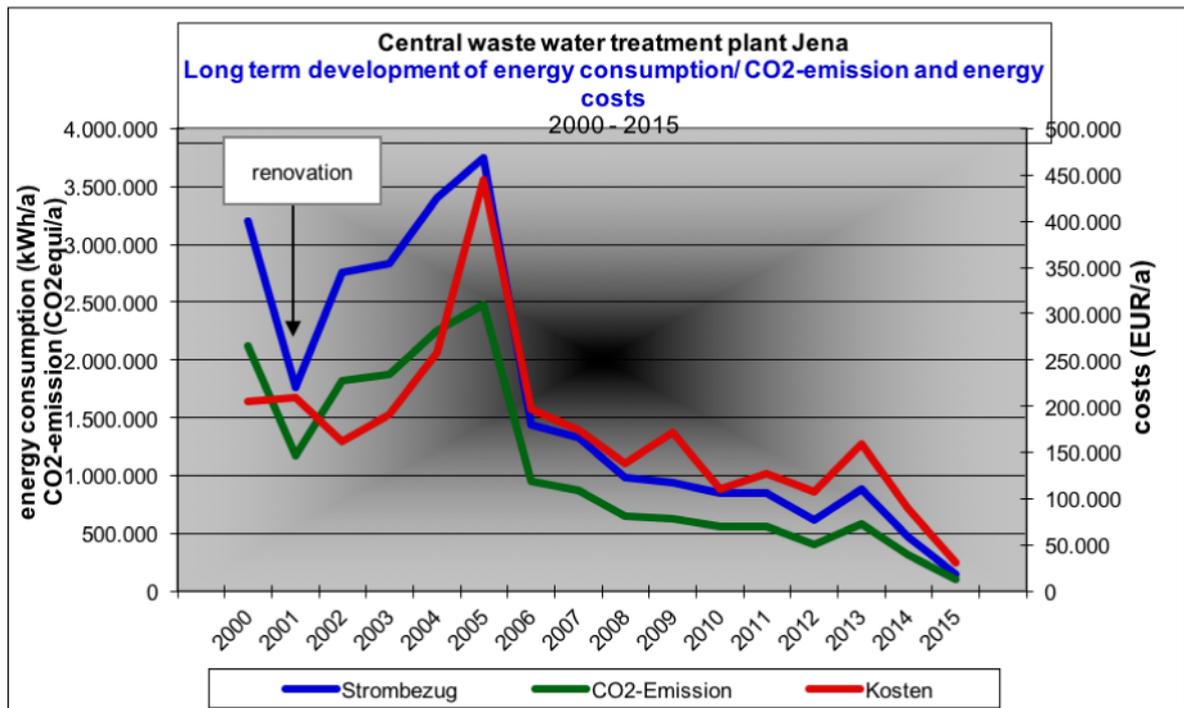


Diagram 5.1 Energy demand and CO2 emissions and costs in 2014 (prior to conversion)

- the specific power consumption of the entire system was 2014 18,5 kWh per capita
18,5 kWh/EW_{BSB}.
- the system thus has a very good energy efficiency.
- in reference-comparison the sewage treatment plant is positioned in the optimum range below the 10%-Percentiles by DWA -A 21.

This was totally made possible by a renewal and restoration of ventilation services (rotary lobe blowers and turbo compressors) and an improvement in the sludge dewatering through the use of a powerful centrifuge. Both in the activation stage and in the dewater-

ing energy saving application variants were used to configure and control the load situations.

Compared with other treatment plants the same size and design, the sewage volume remained well below the average. In an operating data analysis of the sludge and gas balance from the year 2011 has been found that "The solid balance sheet shows that the total solids loading of the sludge is reduced by 27% by the digestion, the degree of degradation of oTR is 38%. Thus, the poor level of degradation of oTR is reconfirmed. With well-functioning digestion destruction degrees of oTR about 40 to 55% can be achieved. The specific gas yield based on the degraded dry matter is 920 l / kg in oTR (reference: 900-1000 l / kg oTR)."

Since the individual process steps and the technical equipment could be excluded as causes of this "negative balance", a focus on the analysis of the digestion was imperative.

The digestion process was examined to increase potentials through preliminary tests and laboratory analysis.

Biological improvements in the digestion process of digestion showed appreciation potential of 5-7%, an extension of the time of digestion could open up a residual gas potential of approximately 10%, an increase in efficiency in the employed CHP also had significant potential.

A use of the potential of own generating revealed a way to achieve the immediate self-powered supply and to be energy self-sufficient.

The demonstration project "Energy self-sufficient sewage treatment plant" the proof should be furnished that it is possible to achieve the self-supply of electricity and heat.

Investments has been focus on expanding the capacity for digestion by another 2,000 m³. To the existing 2 digesters of each 2000 m³ was added an additional digester.

The new digester was so involved that it can be run both in parallel and in series. Compared to the existing digesters he was instead fitted with a gas injection with a stirrer and sufficiently heated by an additional heat exchanger.

The previously used two CHP of 250 KW each with an efficiency of approximately 33% has been replaced by a base load CHP 400 KW with an efficiency of 40%. The additional gas yields more than 400 KW to be converted into electricity through a 250 KW CHP, the second 250 KW cogeneration plant will be kept in reserve.

In a one-year monitoring program that has been predetermined by UBA, the evidence was to provide, to what extent the objective of the investment could be achieved.

It is noted that the self-sufficiency rate is over 100%, and throughout the course of the measurement program consisted this oversupply. The immediate saving effect of electric power is 2015 = 932725 kW / h additional electricity production from organic raw materials that corresponds to a CO₂ equivalent of 616.5t.

Energy consumption, own production and self-sufficiency of the WWTP 1996-2015

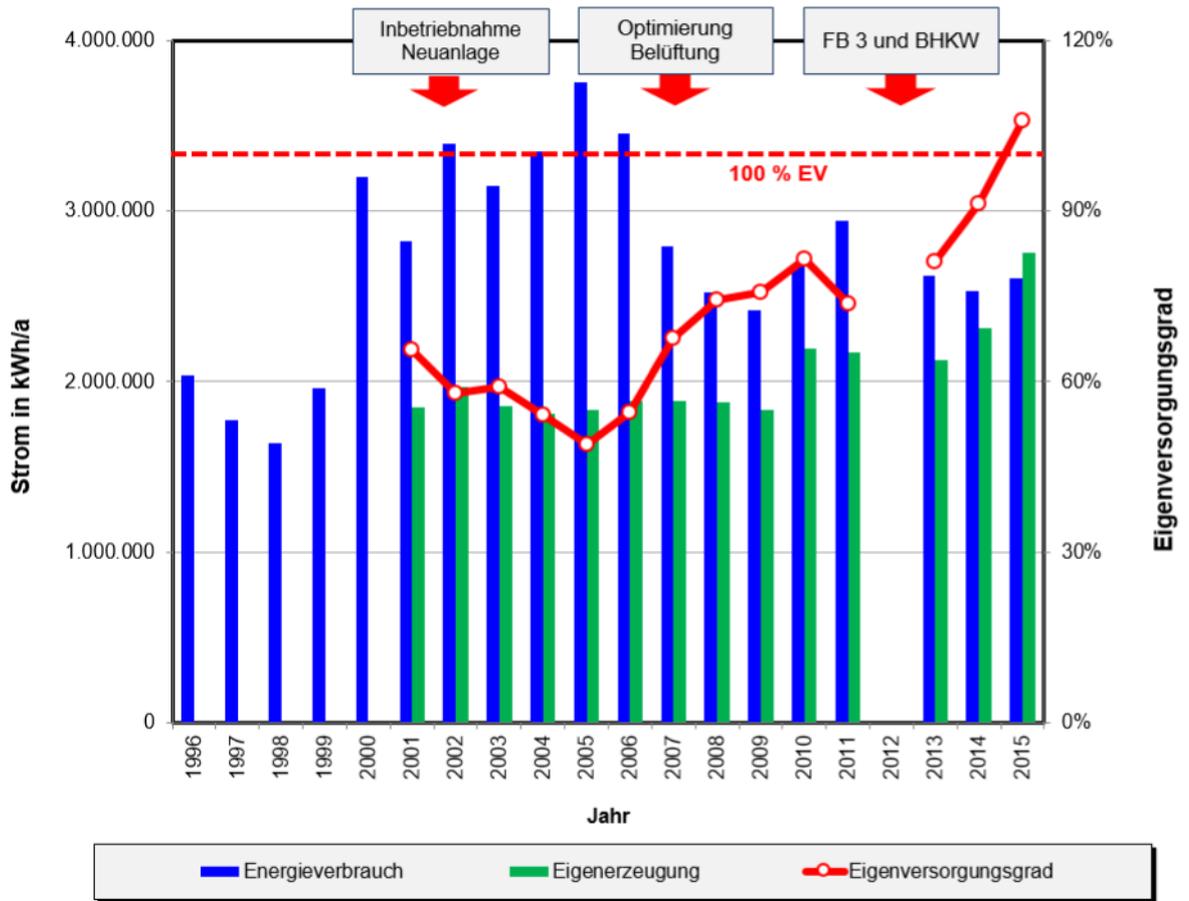


Diagram 5.2 Energy consumption, own production and self-sufficiency of the WWTP 1996-2015

annually characteristic self-sufficiency (energy analysis)

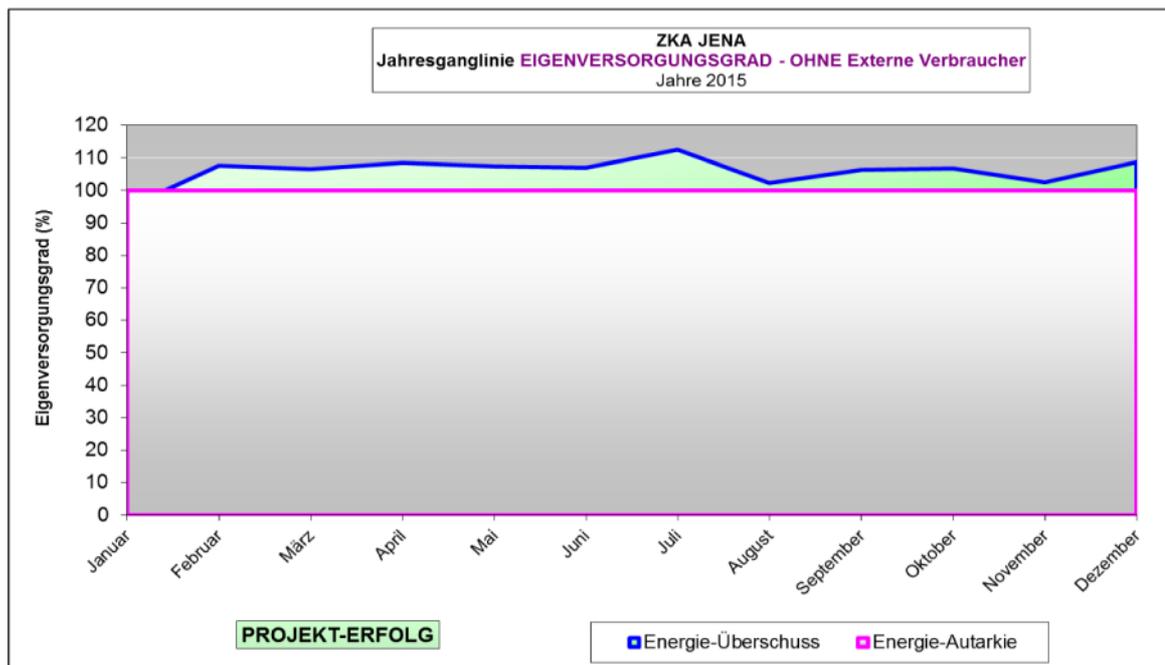


Diagram 5.3 annually characteristic self-sufficiency (energy analysis)

Thus the aim of the investment was achieved. Economically, this means a payback period of less than 9 years. The analysis of individual consumption groups also points to reserves and optimization potential. Overall, it is evident that the investments show synergy in specific energy consumption in all consumer groups.

The project serves as a model because the technical solutions are state of the art and do not require specific developed technical solutions.

6. Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Abf. Stoffe	abfiltrierbare Stoffe
AN	Anaerob
BB	Belebungsbecken
BHKW	Blockheizkraftwerk
BimSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BioP	Biologische- Phosphat- Elimination
BSB/ BSB5	Biologischer Sauerstoffbedarf (innerhalb von 5 Tagen)
CH4	Methan
CO2	Kohlenstoffdioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DN	Denitrifikation
E/ EW	Einwohner
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
EVU	Elektroversorgungsunternehmen
FB	Faulbehälter
FOS	flüchtige organische Säuren
FS	Faulschlamm
G	Klärgas
GV	Glühverlust
H2S	Schwefelwasserstoff
HAc	Essigsäure- Äquivalent
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KVR	Kostenvergleichsrichtlinie
LAWA	Bund/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
ME	Mengeneinheit
MÜSE	Maschinelleüberschussschlammeindickung
N	Nitrifikation
N2	Stickstoff
NE	Nacheindicker
NED	Nacheindicker
NH4-N	Ammonium-Stickstoff
NKB	Nachklärbecken
O2	Sauerstoff

oTR	organischer Trockenrückstand
PS	Primärschlamm
PW	Pumpwerk
Q	Durchfluss/ Volumenstrom
RS	Rohschlamm
SE	Schlammmentwässerung
SEA	Schlammmentwässerungsanlage
ThürKGG	Thüringer Gesetz über die kommunale Gemeinschaftsarbeit
TKN	Total Kjendahl Stickstoff
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
TW	Trübwasser
UBA	Umwelt Bundes Amt
ÜS	Überschussschlamm
VED	Voreindicker
VKB	Vorklärbecken
WT	Wärmetauscher
WW	Warmwasser
Z	Zentrat
ZKA	Zentrale Kläranlage

7. Literatur

Abschlussbericht der Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Dr. Steinle von Juni 2016

Energie Check und Energieanalyse des BWC Bierhals von Juni 2016

Planungsunterlagen der Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Dr. Steinle 2012

Energieautarke Kläranlage Jena, Präsentation von Werner Waschina und René Stubenrauch anlässlich des Statustreffens Umweltinnovationsprogramm, August 2013

Studie zur Klärschlammstrecke der ZKA Jena, Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Dr. Steinle, September 2007

Vergleichende Praxisversuche verschiedener Desintegrationsverfahren zur Ermittlung von Steigerungspotentialen in der Klärgasproduktion durch Aufschlussverbesserung, Bio-Energieverbund Jena, April 2011

KAPP, H. (1984), Schlammfäulung mit hohem Feststoffgehalt. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 86, Kommissionsverlag Oldenbourg München 1984, ISBN 3486262416

STEINLE, E. (1987), Untersuchungen zur Energiebilanz konventioneller beheizter Faulbehälter, Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen Nr.22, UniBw München, Neubiberg 1987

DICHTL, N. (1984), Die Stabilisation von Klärschlämmen unter besonderer Berücksichtigung einer zweistufigen aeroben/anaeroben Prozessführung, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Nr. 5, Ruhr Uni Bochum 1984

ATV-DVWK-A 198, Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen, April 2003, ISBN 3-924063-48-6

DWA-A 216, Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, Dezember 2015, ISBN 978-3-88721-276-6

8. Anhang

- Abschlussbericht der Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Dr. Steinle von August 2016
- Energie Check und Energieanalyse des BWC Bierhals Wasser Consult von Juni 2016



Zentralkläranlage Jena



ENERGIEAUTARKE KLÄRANLAGE JENA

Dokumentation des Betriebs des neuen Faulbehälters 3 mit Auswertung Messprogramm



Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH

Weyarn, 25.08.2016

www.dr-steinle.de

INHALTSVERZEICHNIS :

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	3
1.1	Veranlassung und Ziel	3
1.2	Vorhabensträger	3
2	Beschreibung der Anlagen zur Faulung und Faulgasverwertung	4
2.1.1	Faulbehälter	4
2.1.2	Gasbehälter	5
2.1.3	Blockheizkraftwerke zur Gasverwertung	6
3	Betriebs-und Messergebnisse	8
3.1	Kläranlagenbelastung	8
3.1.1	Hydraulische Belastung	8
3.1.2	Frachtbelastung	8
3.2	Verfahrenstechnische Kennwerte und Abbauleistung Faulbehälter	9
3.2.1	Schlammmenge und Faulzeit	9
3.2.2	Faulraumtemperatur	11
3.3	Gasanfall	12
3.4	Organischer Abbaugrad und CSB	16
3.4.1	Abbaugrade	16
3.4.2	CSB - Bilanzierung	17
3.5	Stabilisierungsgrad und organische Säuren	19
3.6	Entwässerungsgrad Zentrifuge	20
3.7	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	22
3.7.1	Steigerung des Gasanfalls	22
3.7.2	Abbaugrad Schlammfaulung	22
3.7.3	Stabilisierung	22
3.7.4	Schlammmentwässerung	22
4	Energieanalysen	23
5	Zusammenfassung	25
6	Literatur	25

VERZEICHNIS TABELLEN

Tabelle 1:	Kenndaten der vorhandenen BHKW-Anlage	6
Tabelle 2:	Frachtbelastung CSB	9
Tabelle 3:	Frachtbelastung Stickstoff	9
Tabelle 4:	Vergleich Gasanfall 2007-2011, 2012 und 2014-2015	13
Tabelle 5:	Ergebnisse des Messprogrammes TR, oTR, CSB (Mittelwerte Juni 2015 bis Mai 2016)	16
Tabelle 6:	Vergleich der FOS-Gehalte (als Essigsäureäquivalent)	19
Tabelle 7:	Vergleich der Entwässerungsgrade Zentrifuge	21

VERZEICHNIS ABBILDUNGEN

Bild 1:	Faulbehälter ZKA Jena	4
Bild 2:	Konzeption Erweiterung Faulbehälter	5
Bild 3 :	Gasspeicher mit Fackel und Gasvorschacht	5
Bild 4:	Konzeption der Gasspeicherung mit Fackel (Anbindung im Hauptschluss)	6
Bild 5:	Statistische Auswertung der hydraulischen Belastung (Tagesmittel)	8
Bild 6:	Schlammvolumenströme zur Faulung mit Plausibilitätskontrolle	10
Bild 7:	Häufigkeitsverteilung der Faulzeit (gleitende 14d-Mittelwerte)	11
Bild 8:	Verlauf der Faulbehältertemperaturen (Januar 2014 bis Mai 2016)	12
Bild 9 :	Gasanfall der Faulbehälter ZKA Jena 2014 bis 2016	14
Bild 10:	Statistische Auswertung des Gasanfalls 1.04.2014 bis 31.05.2016	15
Bild 11:	CSB Bilanz ZKA Jena anhand der Messwerte	18
Bild 12:	Verlauf der Summe organische Säuren (Essigsäureäquivalent) in den verschiedenen Schlämmen	20
Bild 13:	Vergleich Häufigkeitsverteilungen Entwässerungsgrad Zentrifuge	21
Bild 14:	Energieverbrauch, Eigenerzeugung und Eigenversorgungsgrad ZKA von 1996 bis 2015	23

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

1.1 Veranlassung und Ziel

Die Zentralkläranlage Jena besitzt derzeit zur Stabilisierung der anfallenden Schlämme aus Vorklärung und Belebung drei Faulbehälter mit je 2000 m³ Nutzvolumen. Der dritte Faulbehälter wurde in den Jahren 2012 bis 2013 geplant und im Jahre 2014 fertiggestellt.

Im Rahmen des Projektes Energieautarke Kläranlage Jena wurde der Betrieb der Faulung nach Inbetriebnahme des dritten Behälters mess- und analysetechnisch begleitet und es wurden entsprechende Auswertungen zum Nachweis der Faulgasertragssteigerung und des Stabilisierungsergebnisses durchgeführt.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die wesentlichen Ergebnisse und Bilanzen.

1.2 Vorhabensträger

JenaWasser Zweckverband der Städte Jena,
Camburg und Umlandgemeinden

Rudolstädter Str. 39

07745 Jena

Ansprechpartner: Herr Waschina
Herr Stubenrauch

Telefon: 03641-688-660

2 Beschreibung der Anlagen zur Faulung und Faulgasverwertung

2.1.1 Faulbehälter

Die Faulbehälteranlage der ZKA Jena besteht aus 3 Behältern, die sowohl parallel als auch hintereinander betrieben werden können. Während die beiden ersten Behälter mit je 2000 m³ Volumen bereits im Rahmen des Neubaus der ZKA Jena erstellt worden sind, ist der dritte Behälter im Rahmen des Projekts „Energieautarke ZKA Jena“ erstellt worden. Im Rahmen des Umbaus erfolgte auch eine Anpassung der Wärmeversorgung mittels eines dritten Wärmetauschers, so dass eine gesicherte Erwärmung der Faulbehälter auch im Winter gewährleistet ist.

Bild 1 zeigt die drei Faulbehälter, Bild 2 zeigt vereinfacht die konzeptionelle Einbindung des dritten Behälters mit Schlammpfad und Wärmetauschern.



Bild 1: Faulbehälter ZKA Jena

Während die ersten beiden Faulbehälter mit Gaseinpressung ausgerüstet sind, wurde der dritte Behälter mit einem Rührwerk zur Durchmischung versehen.

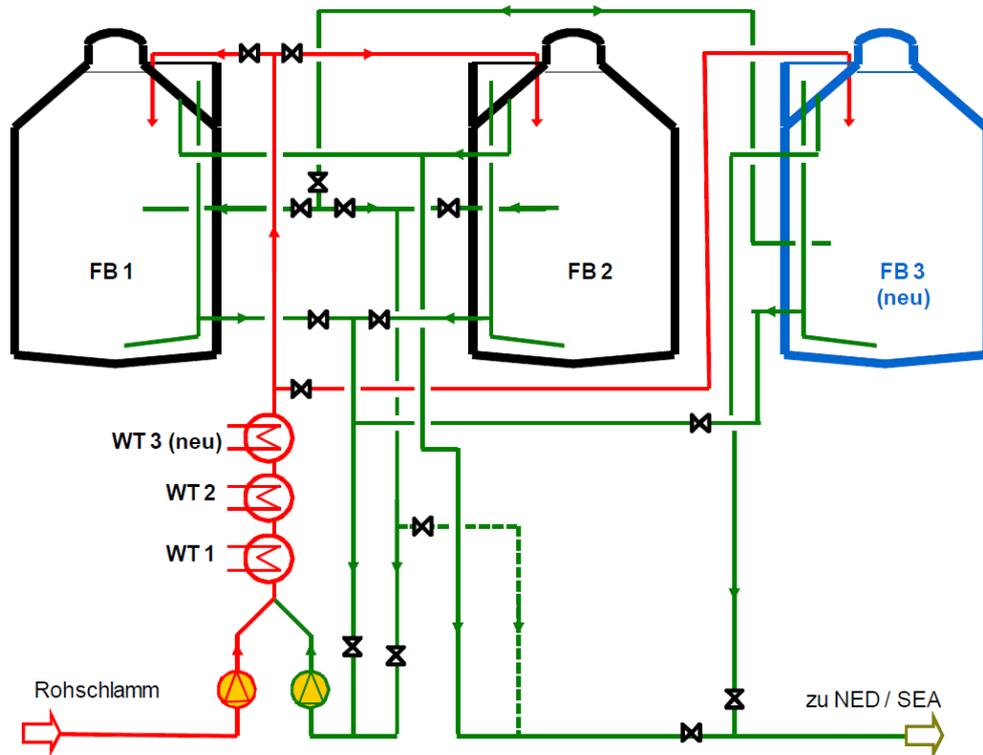


Bild 2: Konzeption Erweiterung Faulbehälter

2.1.2 Gasbehälter

Der bestehende Gasbehälter ist ein Niederdruckspeicher der Firma Eisenbau Heilbronn (1000 m³ Inhalt). Er ist im Hauptschluss an das Gassystem der ZKA Jena angebunden.



Bild 3 : Gasspeicher mit Fackel und Gasvorschacht

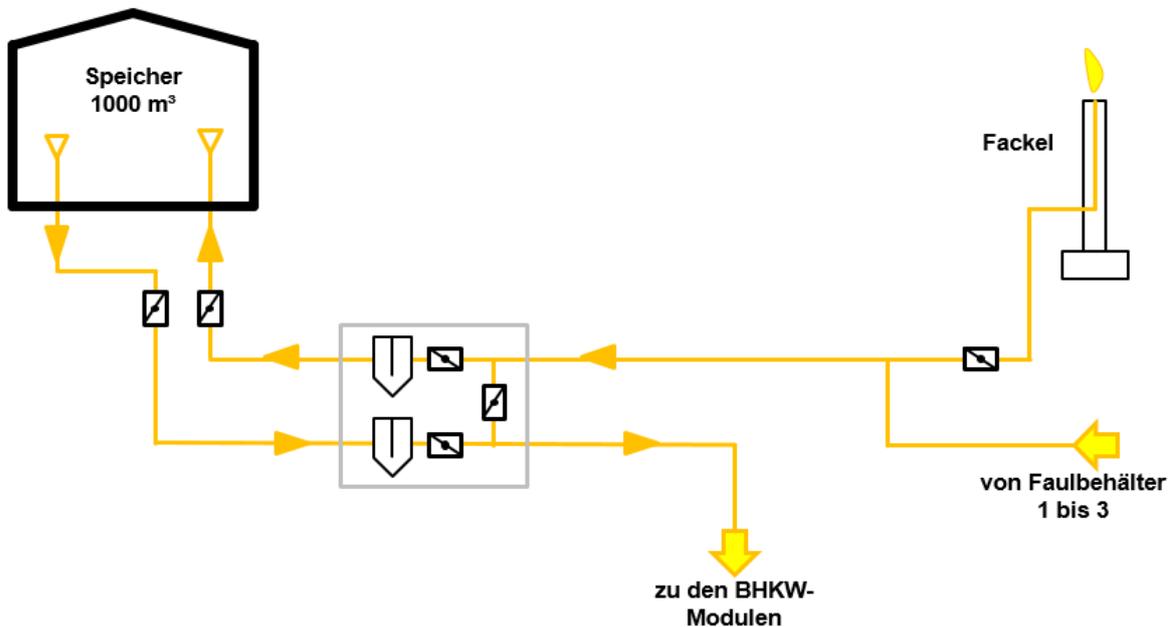


Bild 4: Konzeption der Gasspeicherung mit Fackel (Anbindung im Hauptschluss)

Bild 3 zeigt den Gasspeicher, Bild 4 die konzeptionelle Anbindung des Speichers mit den entsprechenden Einrichtungen. Das Speichervolumen ist mit etwa 30% des täglichen Gasanfalls begrenzt.

2.1.3 Blockheizkraftwerke zur Gasverwertung

Das Faulgas wird mittels Blockheizkraftwerk, bestehend aus 3 Gas-Otto-Motoren mit Magergemisch-Turbolader-Technologie verwertet. Die neueste Maschine (BHKW 3, 400 kW_{el}) wird als Grundlastmaschine betrieben, eine der beiden kleinen Aggregate (BHKW 1 oder BHKW 2, 250 kW_{el}) bei Zeiten minimalen Gasanfalls und bei Spitzenbedarf genutzt. Die zweite kleine Maschine wird als Stand-by-Aggregat vorgehalten um einen eventuellen Ausfall der Grundlastmaschine abzusichern.

Die wesentlichen Kennzahlen sind in Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1: Kenndaten der vorhandenen BHKW-Anlage

	BHKW 1	BHKW 2	BHKW 3
Maximale Elektrische Leistung kW :	250	250	400
Maximaler Gasverbrauch (60% CH ₄) m ³ _N /h :	112,6	112,6	166,7
Minimaler Gasverbrauch (60% CH ₄) m ³ _N /h :	56,3	56,3	62,5

Die neue Maschine (BHKW 3) zeichnet sich dadurch aus, dass ihr elektrischer Wirkungsgrad auch im Teillastbetrieb noch deutlich höher ist als der Wirkungsgrad der anderen bei-

den Maschinen bei Volllastung. Daher wird BHKW 3 auch als Grundlastmaschine betrieben, während die beiden anderen BHKW bei erhöhtem Gasanfall oder als Standby herangezogen werden.

3 Betriebs-und Messergebnisse

3.1 Kläranlagenbelastung

3.1.1 Hydraulische Belastung

Die statistische Verteilung der mittleren Tageszuflüsse im Zeitraum vom 1.01.2014 bis zum 31.05.2016 zeigt Bild 5 sowohl für alle Werte als auch für die Trockenwettertage. Die geringe Streubreite der Trockenwettertage mit einem mittleren Zufluss von ca. 17.000 m³/d (700 m³/h) weist auf einen geringen Fremdwasserzufluss hin. Bezogen auf die Frachtbelastung sind die Zuflüsse sehr gering (mittlere CSB-Konzentration ca. 1100 mg/l).

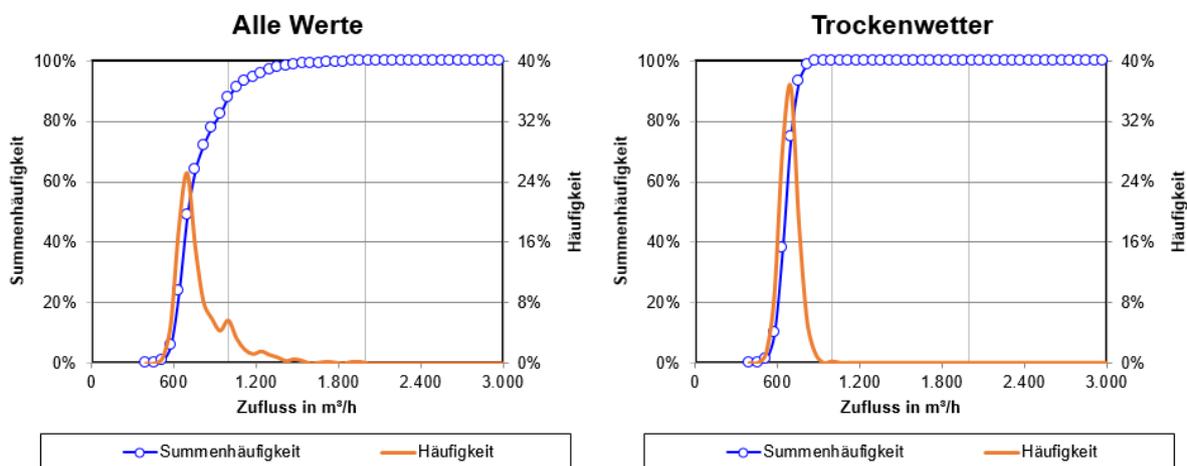


Bild 5: Statistische Auswertung der hydraulischen Belastung (Tagesmittel)

3.1.2 Frachtbelastung

Die Frachtbelastung CSB und Stickstoff für den Zeitraum 1.01.2014 bis 31.05.2016 zeigen Tabelle 2 und Tabelle 3. Bezogen auf das 85%-Perzentil ergeben sich für die ZKA Jena mit 120 g_{CSB}/(E·d) eine Einwohnerwertezahl von 190.000 E; bezogen auf den Medianwert ergeben sich bei gleicher spezifischer Fracht ca. 156.000 E.

Das Verhältnis Stickstofffracht zu CSB-Fracht berechnet sich im Mittel zu 0,073 kg_N/kg_{CSB}. Dieses Verhältnis ist deutlich niedriger als der übliche Wert für kommunales Abwasser (ATV-DVWK A198) von 0,092 kg_N/kg_{CSB}.

Damit sind günstige Verhältnisse für einen niedrigen spezifischen Energiebedarf für die Belüftung (CSB-Abbau und Nitrifikation) gegeben.

Aufgrund der günstigen Randbedingungen bezüglich des N/CSB-Verhältnis lassen sich auch hohe Stickstoffeliminationsraten erzielen (über 90%) und der CSB-Abbau liegt bei über 97%.

Tabelle 2: Frachtbelastung CSB

	CSB					
	Zulauf	Zulauf BioP	Zulauf VKB	Ablauf VKB	Zul. Bio	Ablauf NKB
	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d
Anzahl	876	873	873	871	870	875
Mittelwert	19.143	3.293	15.856	6.525	9.829	524
Percentil 50%	18.638	3.164	15.369	6.296	9.600	499
Percentil 85%	22.789	4.242	19.144	7.869	11.407	639

Tabelle 3: Frachtbelastung Stickstoff

	TN					
	Zulauf	Zulauf BioP	Zulauf VKB	Ablauf VKB	Zul. Bio	Ablauf NKB
	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d
Anzahl	875	872	872	873	873	874
Mittelwert	1.391	240	1.151	847	1.086	114
Percentil 50%	1.384	233	1.141	840	1.078	105
Percentil 85%	1.658	311	1.372	1.037	1.295	152

3.2 Verfahrenstechnische Kennwerte und Abbauleistung Faulbehälter

3.2.1 Schlammmenge und Faulzeit

Durch die Erweiterung des Faulraumvolumens auf insgesamt 6000 m³ hat sich die die Faulzeit deutlich verlängert. Die den Faulbehältern zugeführte Schlammmenge beträgt im Mittel 175 m³/d und besteht aus maschinell eingedicktem Überschussschlamm und Primärschlamm aus dem Vorklärbecken.

Die eingedickte Überschussschlammmenge ($Q_{\text{ÜS,eingedickt}}$) kann zum einen aus der Bilanz aus Faulraumbeschickung ($Q_{\text{zu,FB}}$, gemessen) und Primärschlammmenge (Q_{PS} , gemessen) berechnet werden:

$$Q_{\text{ÜS,eingedickt}} = Q_{\text{zu,FB}} - Q_{\text{PS}}$$

Alternativ kann die eingedickte Überschussschlammmenge ($Q_{\text{ÜS,eingedickt}}^*$) auch über den Volumenstrom des Überschussschlammes aus der Nachklärung ($Q_{\text{ÜS,NKB}}$, gemessen), dessen Trockensubstanzgehalt $TS_{\text{ÜS,NKB}}$ (gemessen vom Betrieb) sowie den gemessenen Trockensubstanzgehalt im eingedickten Schlamm nach der maschinellen Eindickung ($TS_{\text{ÜS,MÜSE}}$, gemessen im Rahmen des Messprogrammes) berechnet werden:

$$Q_{\text{ÜS,eingedickt}}^* = (Q_{\text{ÜS,NKB}} \cdot TS_{\text{ÜS,NKB}}) / TS_{\text{ÜS,MÜSE}}$$

berechnen. Der aus diesem Ansatz ermittelbare Volumenstrom zur Faulung errechnet sich dann zu:

$$Q_{\text{zu,FB}}^* = Q_{\text{PS}} + Q_{\text{ÜS,eingedickt}}^*$$

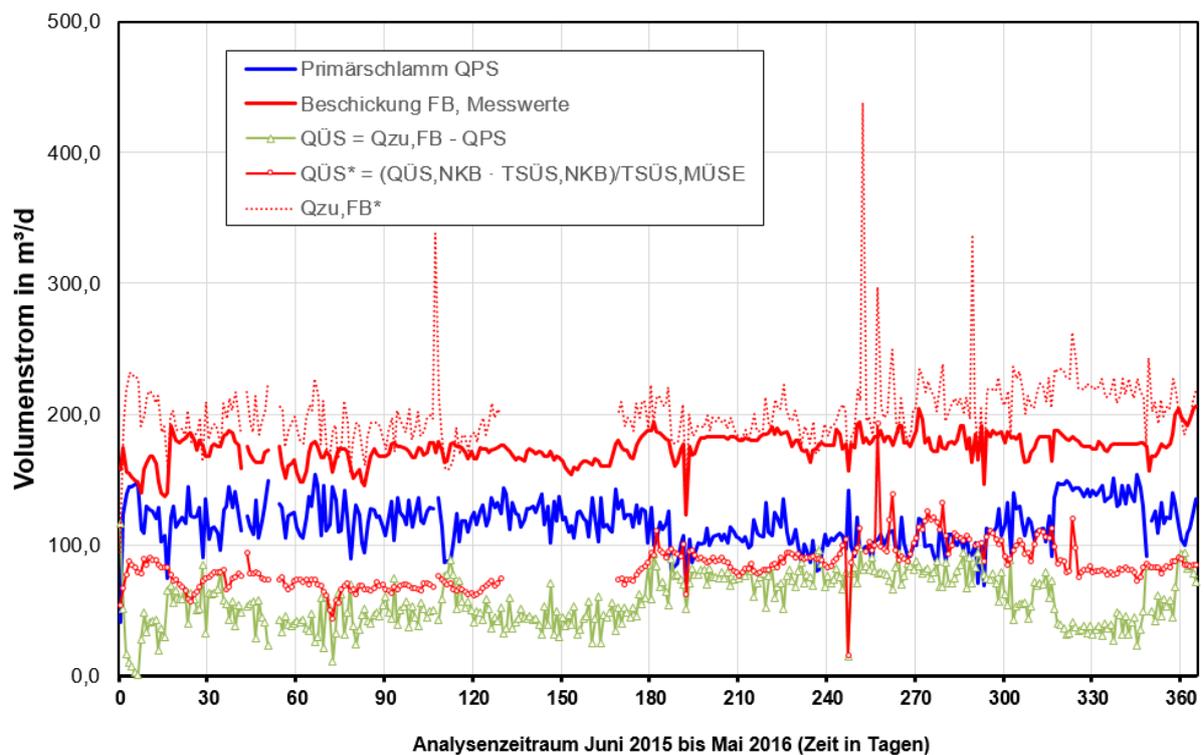


Bild 6: Schlammvolumenströme zur Faulung mit Plausibilitätskontrolle

Bild 6 zeigt im Vergleich die Schlammvolumenströme der Komponenten

- Primärschlamm
- Schlamm zur Faulung gemäß Messung und berechnet
- Überschussschlamm (eingedickt), aus Bilanz bzw. berechnet

Es zeigen sich zeitweise deutliche Unterschiede zwischen den auf unterschiedlichen Wegen ermittelten Volumenströmen. Eine Auswertung im Hinblick auf eine Bilanzierung auf Grundlage der einzelnen Tagesfrachten ist unter diesen Umständen nicht möglich. Die Bi-

lanzierung erfolgt damit auf Grundlage von Mittelwerten aus dem Messprogramm und den Betriebsmessungen. Es werden folgende Volumenströme zugrunde gelegt:

Mittlerer Primärschlammanfall:	114 m ³ /d
Mittlerer Überschussschlammanfall aus NKB:	ca. 440 m ³ /d
Mittlerer Überschussschlammanfall aus MÜSE:	70 m ³ /d
Schlammzufuhr zum Faulbehälter:	184 m ³ /d

Ausgehend von den Durchflussmessungen zur Faulraumbeschickung sind die Faulzeiten (gleitende 14d-Mittelwerte) über den Messprogramm-Zeitraum statistisch ausgewertet worden (siehe Bild 7).

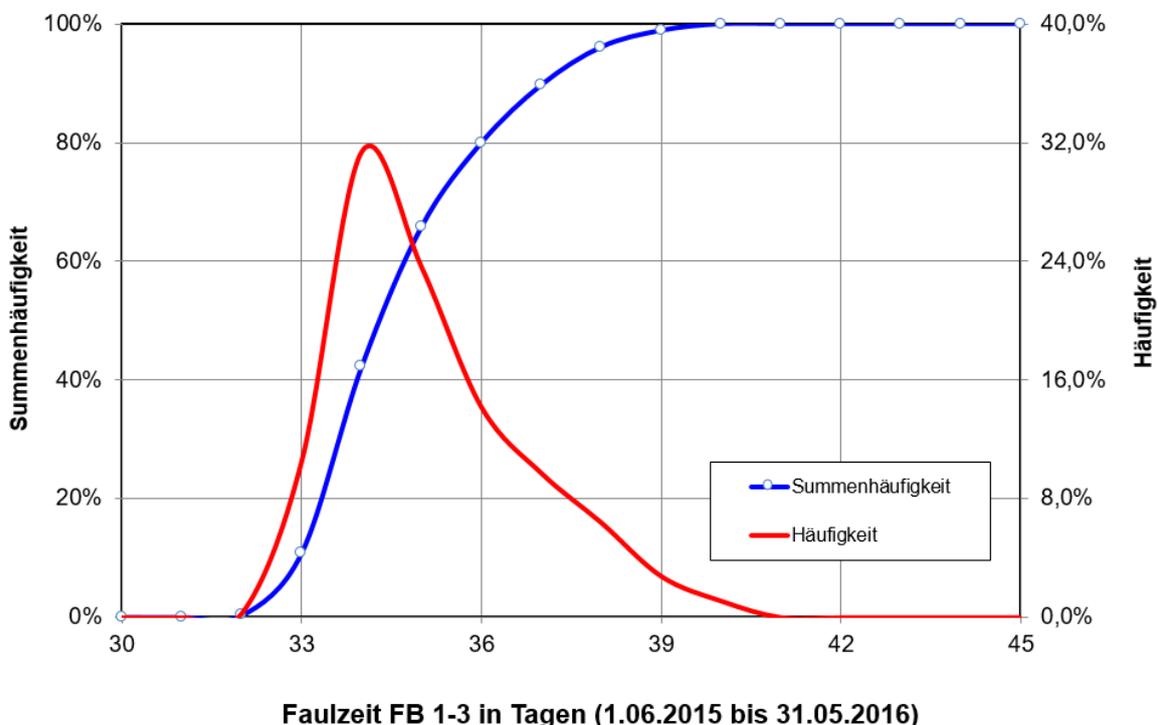


Bild 7: Häufigkeitsverteilung der Faulzeit (gleitende 14d-Mittelwerte)

Die Auswertung wurde auf Grundlage der gleitenden 14d-Mittelwerte der Faulzeiten während der Zeit des Messprogramms (1.06.2015 bis 31.05.2016) erstellt. Die mittlere Faulzeit lag in diesem Zeitraum bei 36 Tagen, am häufigsten liegen Werte zwischen 34 und 35 Tagen. Diese Faulzeiten liegen über den Werten, die für die Schlammfäulung üblicherweise empfohlen werden (20 bis 25 Tage).

3.2.2 Faulraumtemperatur

Während des Messprogramms wurden die beiden Faulbehälter 1 und 2 in der Regel mit einer Temperatur bis zu 42 °C gefahren. Den Verlauf der Faulbehältertemperaturen von Ja-

nuar 2014 bis Mai 2016 zeigt Bild 8. Nach Umrüstung der Faulbehälteranlage und dem Einsatz eines weiteren Wärmetauschers konnte bis auf wenige Ausnahmen im Winter 2015/2016 Temperaturen über 40°C gefahren werden. Weniger als 37°C Faulraumtemperatur wurde nicht gemessen.

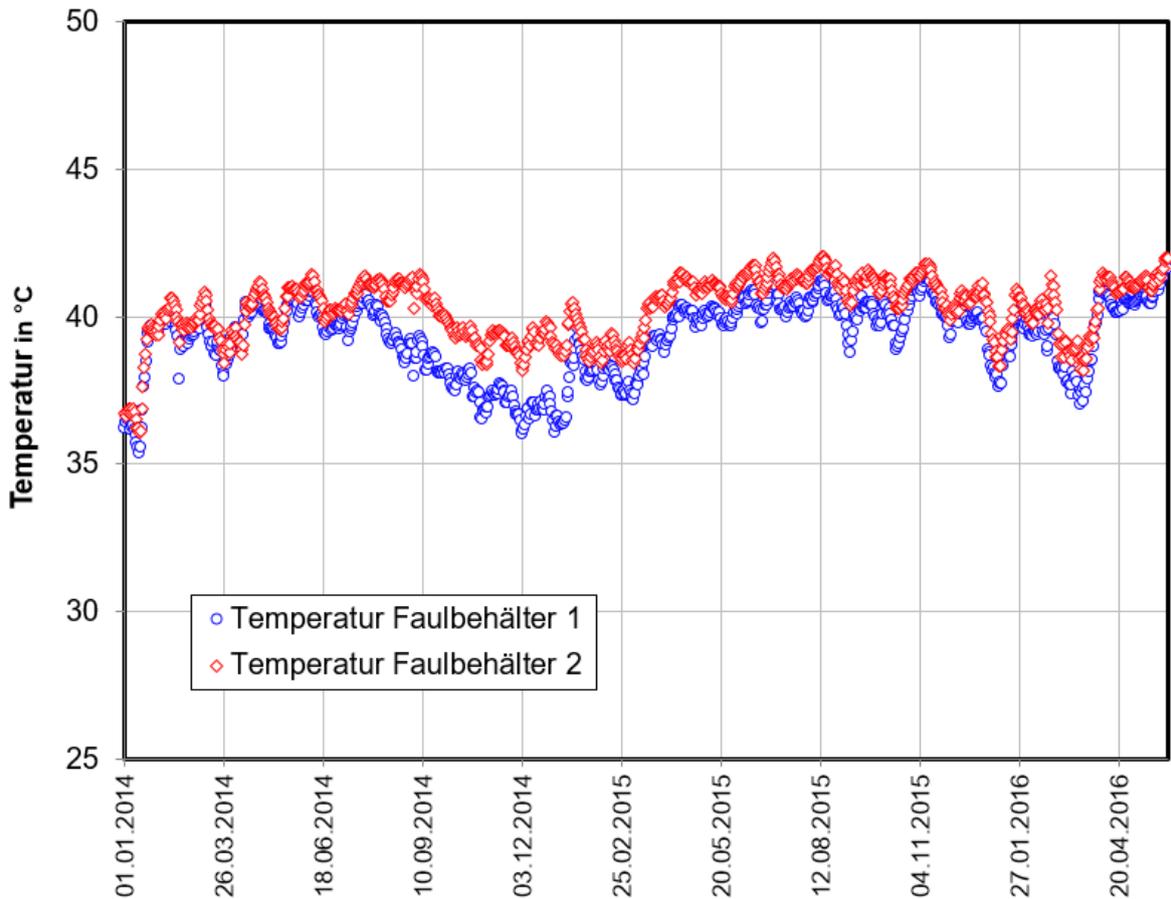


Bild 8: Verlauf der Faulbehältertemperaturen (Januar 2014 bis Mai 2016)

3.3 Gasanfall

Durch die Erweiterung der Schlammfaulung und die verlängerten Faulzeiten konnte eine signifikante Steigerung des Gasanfalls erzielt werden, wie Tabelle 4 zu entnehmen ist. Sowohl der Gesamtanfall als auch der spezifische Gasanfall hat deutlich zugenommen. Die Tabelle vergleicht folgende Zeiträume:

- Datenauswertung 2007 – 2011: vor Inbetriebnahme Faulbehälter 3
- Datenauswertung 2012: unmittelbar vor Bau Faulbehälter 3
- Datenauswertung 2014: unmittelbar nach Bau Faulbehälter 3
- Datenauswertung 2015 – 2016: nach Bau Faulbehälter 3, Messprogramm

Auffallend ist, dass der Gasanfall nach Inbetriebnahme des dritten Behälters nicht nur als Absolut-Wert gegenüber den Werten vor 2014 signifikant gestiegen ist, sondern auch der spezifische Wert bezogen auf die Zulaufmenge der ZKA. Mit der erweiterten Schlammfäulung können ca. 30% des der ZKA zufließenden CSB als Methan gewonnen werden. Vor der Erweiterung lag der Wert bei lediglich 23 bis 25%. Der im Rahmen der Planung erwartete Mehrgasanfall von ca. 10% wurde somit leicht übertroffen.

Tabelle 4: Vergleich Gasanfall 2007-2011, 2012 und 2014-2015

		Auswertung	Auswertung	Auswertung	Auswertung	Δ %	
		2007-2011	2012	2014**	2015-2016	Vergleich zu 2007-2011	Vergleich zu 2012
		vor 3. Faulbehälter	vor 3. Faulbehälter	nach Inbetriebnahme 3. Faulbehälter	nach Inbetriebnahme 3. Faulbehälter		
Mittlerer Gasanfall	m ³ /d :	2720	2730	3280	3300	21%	17%
CSB-Rohzulauf (Mittelwert)	kg/d :	20.500	19.200	18.900	18.600	-9%	-3%
Einwohnerwerte (DWA-A 126)	E :	170.833	160.000	157.500	155.000	-9%	-100%
Gasfall je Einwohner (120 g_{CSB}/E)	l/(E·d) :	15,9	17,1	20,8	21,3	34%	25%
Gas / CSB Roh	m ³ /kg :	0,133	0,142	0,174	0,177	34%	25%
CSB Gas / CSB Roh*	kg/kg :	0,227	0,244	0,298	0,304	34%	25%
*) Anfang 2014 noch Einfahrphase des 3. Faulbehälters							
**) geschätzt mit CH ₄ -Gehalt 60% und 2,86 kg CSB / m ³ CH ₄							

Bild 9 zeigt den Gasanfall auf der ZKA Jena, beginnend vom 01.01.2014 bis einschließlich 31.05.2016. Auffallend ist der saisonale Verlauf; in den Wintermonaten liegt der Gasanfall höher als in den Sommermonaten.

Die saisonale Schwankungsbreite liegt bei etwa 800 - 1000 m³/d (siehe Sinusfunktion im Diagramm). Zum einen ist wegen der Ferienzeit (Universität, Schulen) auch die Kläranlagenbelastung im Sommer etwas geringer, zum anderen findet eine weitergehende Vorversäuerung und Abbau des Abwassers im Kanalnetz während der Sommermonate statt.

Je nach Art des Betriebs produziert der dritte Faulbehälter einen höheren Anteil am Gasanfall (Parallelschaltung) oder einen geringeren (nachgeschalteter Betrieb). Im nachgeschalteten Betrieb entstehen etwa 10% bis 12% des gesamten Gasanfalls im dritten Behälter, im Parallelbetrieb ergaben sich 30 bis 40%.

Der Parallelbetrieb hat sich in den Zeiten bewährt, in denen der anfallende Schlamm eine höhere Fracht an zur Methanisierung verfügbaren CSB aufweist (Winterzeit, generell höherer Gasanfall). Die Parallelschaltung erfolgte auch aus betrieblichen Gründen, da in der Winterzeit eher mit Schäumen zu rechnen ist und eine gleichmäßige Verteilung des

Schlammes auf die drei Behälter (Parallelbetrieb) zu einer pro Behälter geringeren, weniger intensiven Gasentwicklung und Schaumbildung führt.

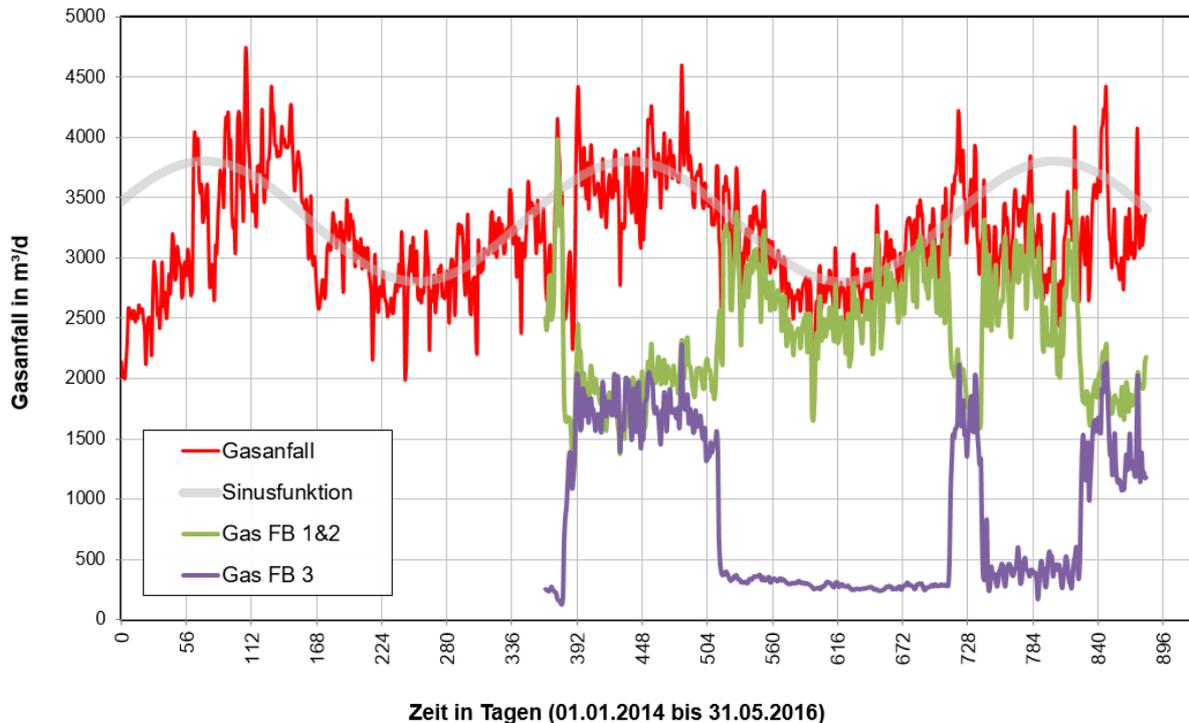


Bild 9 : Gasanfall der Faulbehälter ZKA Jena 2014 bis 2016

Die statistische Verteilung des Gasanfalls zeigt Bild 10 für die Daten:

- Alle Werte
- Werte während des Betriebs FB als Nachfaulstufe

Aus den Grafiken ist erkennbar, dass bei zweistufigem Betrieb tendenziell ein geringerer Gesamtgasanfall vorlag als bei Parallelbetrieb der 3 Behälter. Die Werte bei nachgeschaltetem Faulbehälter weisen auch eine geringere Streubreite aus.

Es kann vermutet werden, dass dieser Unterschied der Gasentwicklung an der saisonal variierenden Schlammqualität (mit unterschiedlichem Gaspotenzial) liegt, die den Parallelbetrieb vorteilhaft erscheinen ließ.

Die zusätzliche Gasentwicklung im nachgeschalteten Betrieb um ca. 10-12% entspricht den allgemeinen Erfahrungen mit nachgeschalteten Faulbehältern und damit auch den Erwartungen bei der Planung des dritten Faulbehälters und der Erweiterung der BHKW-Anlage.

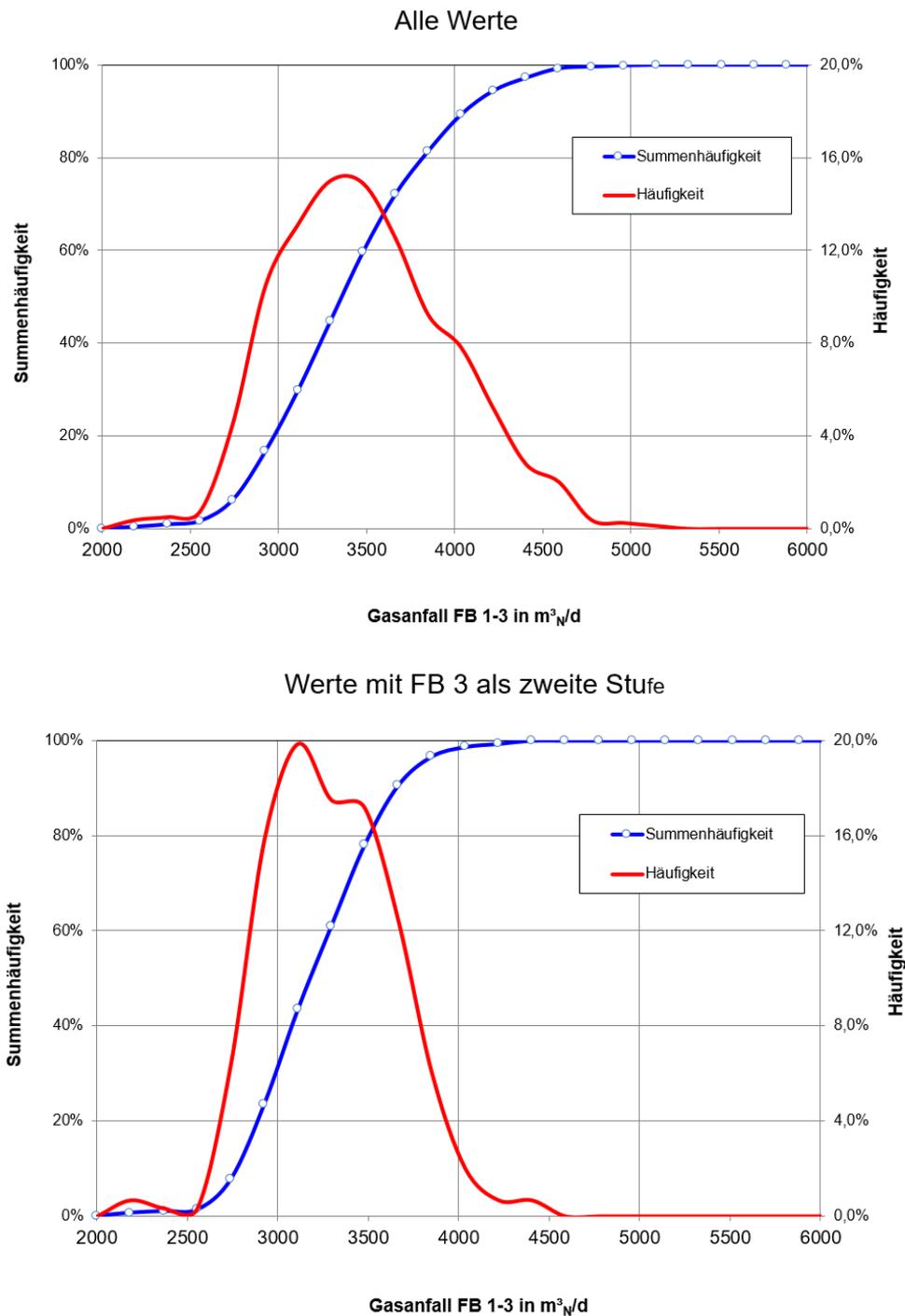


Bild 10: Statistische Auswertung des Gasanfalls 1.04.2014 bis 31.05.2016

3.4 Organischer Abbaugrad und CSB

3.4.1 Abbaugrade

Die Mittelwerte der Messergebnisse zu TR, Glühverlust und CSB der verschiedenen Schlämme sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die Messwerte zeigen ein etwas unübliches Verhältnis CSB/oTR der untersuchten Schlämme im Bereich von 1,3 bis 1,4. Übliche Werte liegen bei 1,5 bis 1,6. Unter Berücksichtigung der Volumenstromanteile Primär- und eingedickter Überschussschlamm lässt sich der Glühverlust des Rohschlammes abschätzen. Mit dem Glühverlustwert des Faulschlammes lässt sich nach KAPP (1984) unter der Annahme, dass in der Faulung kein Trübwasser abgezogen wird, der organische Abbaugrad η_{oTR} wie folgt über den Glühverlust des Rohschlammes (GV_{RS}) und den des Faulschlammes (GV_{FS}) ermitteln:

$$\eta_{oTR} = GV_{RS}/100 \cdot (1 - (100 - GV_{RS}) / (100 - GV_{FS}))$$

Der so ermittelte Abbaugrad ist sowohl für alle Werte als auch für die Zeit mit nachgeschaltetem Faulbehälter 3 in Tabelle 5 eingetragen. Es kann gemäß dieser Auswertung in beiden Fällen von einem Abbaugrad von 50 % der organischen Trockensubstanz ausgegangen werden.

Tabelle 5: Ergebnisse des Messprogrammes TR, oTR, CSB (Mittelwerte Jini 2015 bis Mai 2016)

Alle Werte				363 Tage		Primär-schlamm	ÜS-Schlamm	Roh-schlamm	Faulschlamm 1+2	Faulschlamm 3
Ansatz Volumenstrom				m ³ /d :		114	70	184	137	156
Trockenrückstand	TR	Mittel	kg/m ³ :	57,7	60,2	58,6	32,3	30,3		
Glühverlust	GV	Mittel	:	77%	71%	75%	59%	59%		
Org. Trockenrückstand	oTR	Mittel	kg/m ³ :	44,2	42,9	43,7	19,1	18,0		
Chem. O2-Bedarf	CSB	Mittel	kg/m ³ :	60,6	54,8	58,4	24,9	22,9		
Verhältnis CSB/oTR				Mittel :		1,37	1,28	1,33	1,30	1,28
Organischer Abbaugrad nach KAPP (über GV)				$\eta_{oTR} = GV_{RS}/100 \cdot (1 - (100 - GV_{RS}) / (100 - GV_{FS})) =$		50,4%				
Betrieb FB 3 nachgeschaltet				281 Tage		Primär-schlamm	ÜS-Schlamm	Roh-schlamm	Faulschlamm 1+2	Faulschlamm 3
Ansatz Volumenstrom				m ³ /d :		114	70	184	184	184
Trockenrückstand	TR	Mittel	kg/m ³ :	59,4	60,4	59,7	32,9	30,5		
Glühverlust	GV	Mittel	:	76%	71%	74%	59%	59%		
Org. Trockenrückstand	oTR	Mittel	kg/m ³ :	45,0	42,8	44,2	19,4	18,0		
Chem. O2-Bedarf	CSB	Mittel	kg/m ³ :	59,9	56,8	58,7	24,3	22,4		
Verhältnis CSB/oTR				Mittel :		1,33	1,33	1,33	1,25	1,25
Organischer Abbaugrad nach KAPP (über GV)				$\eta_{oTR} = GV_{RS}/100 \cdot (1 - (100 - GV_{RS}) / (100 - GV_{FS})) =$		49,6%				

Die Bilanzierung der oTR-Frachten im Zulauf und Ablauf der Faulbehälter ergibt dagegen Abbaugrade von etwa 58 bis 59%.

Unter Ansatz eines mittleren Gasanfalls von 3300 m³/d errechnet sich pro kg oTR zugeführt eine spezifische Gasproduktion von 410 l/kg_{oTR}. Setzt man den Abbaugrad nach KAPP (1984) von 50% an, ergibt sich eine spezifische Gasproduktion bezogen auf die abgebaute oTR von 820 l/kg_{oTR,ab}. Dieser Wert kann als plausibel betrachtet werden. Dagegen ist der aus der Bilanzierung der oTR-Frachten ermittelbare Wert von lediglich 706 l/kg_{oTR,ab} als nicht plausibel zu bezeichnen. Es ist auf Grund der unsicheren Ermittlung der Volumenströme und der schwierigen Probenahme beim Schlamm davon auszugehen, dass die Berechnung des Abbaugrades über die Stoffbilanz ungenauer ist als die Ermittlung des Abbaugrades nach KAPP über die Glühverlustwerte.

3.4.2 CSB - Bilanzierung

Für anaerobe Abbauprozesse besteht bei Vernachlässigung von H₂S im Faulgas ein direkter Zusammenhang zwischen dem CSB-Abbau und der produzierten Methanmenge und damit direkt mit dem Heizwert des produzierten Gases (STEINLE, 1987). Aus der CSB-Bilanz des Anaerob-Reaktors bzw. Faulbehälters lässt sich ableiten, dass die abgebaute CSB Fracht der CSB-Fracht im Faulgas entspricht. Ausgehend davon, dass das Faulgas neben geringen Anteilen von H₂S und anderen Spurengasen nahezu ausschließlich aus CO₂ und CH₄ besteht und CO₂ keinen chemischen Sauerstoffbedarf verursachen kann, lässt sich der CSB des Faulgases aus dem Sauerstoffbedarf zur Oxidation von Methan herleiten. Dieser ergibt sich zu 64 g_{O₂} pro Mol Methan. Mit einem Molvolumen von 22,4 l_N/Mol errechnet sich eine spezifische Methanproduktion von 0,35 l_N/g CSB abgebaut.

Dieser Wert dient als Plausibilitätskontrolle zur Prüfung der Gasmenge im Zusammenhang mit der CSB-Frachtbilanz.

Für die Messperiode lässt sich folgende CSB-Bilanz aufstellen (auf Grundlage der Werte in Tabelle 5):

Zulauf FB	CSB-Fracht	10739 kg/d
Abauf Faulbehälter	CSB-Fracht	4402 kg/d
Abbau	CSB-Fracht	6337 kg/d
Methananfall	berechnet	2218 m ³ _N /d
Methangehalt (Durchschnittswert Eigenmessung)		60%
Faulgasanfall theoretisch über CSB-Bilanz		3696,3 m ³ _N /d
Faulgasanfall Betriebsdaten, umgerechnet auf m ³ _N :		3175,7 m ³ _N /d
Betriebsdaten / Theoretischer Wert		86%

Die gemessenen Gasanfall-Werte lassen sich damit zu 86% über die abgeschätzte CSB-Bilanz erklären. Bereits ein durchaus realistischer Messfehler von etwa 5% bei der Frachtbestimmung kann wiederum die errechnete Differenz verursachen. Somit kann gefolgert

werden, dass in Anbetracht der Bestimmungsgenauigkeit der Frachten die gemessenen Gasmengen plausibel sind und der erhöhte Gasanfall damit bestätigt werden kann.

Auf Grundlage der Messwerte aus dem Messprogramm und der verfügbaren Betriebsdaten konnte eine einfache CSB-Bilanz der ZKA Jena aufgestellt werden, die in Bild 11 dargestellt ist. Es wurden dabei auch die Rückbelastungen aus Schlammmentwässerung (SEA) und Überschussschlamm - Eindickung (MÜSE) ansatzweise berücksichtigt.

Der CSB des Kläranlagen-Zulaufs wird zum einen über den Schlamm aus dem System entnommen (Vorklärung und biologischer Schlamm) und dann der anaeroben Vergärung zugeführt, zum andern durch den Einsatz von Belüftungsenergie in der Belebung oxidiert (nicht im Teilstrom-BioP-Becken). Die restliche CSB-Fracht gelangt im Wesentlichen als inerter gelöster CSB den Ablauf der Zentralkläranlage.

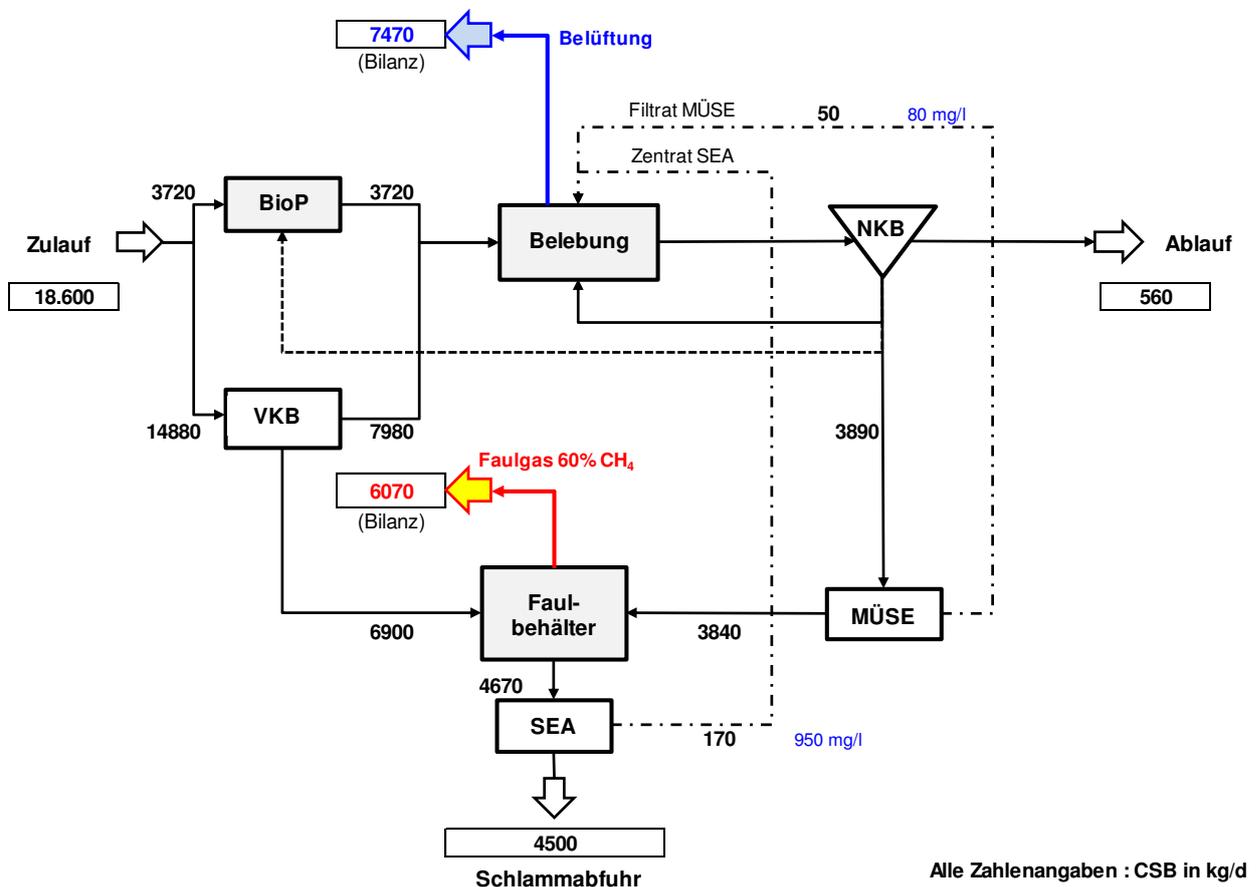


Bild 11: CSB Bilanz ZKA Jena anhand der Messwerte

Die Bilanz zeigt, dass in etwa:

- 40% der CSB-Fracht über den Sauerstoffeintrag verringert wird
- 30% der CSB-Fracht in Faulgas umgesetzt wird
- 25 % der CSB-Fracht mit dem Schlamm abgefahren wird und
- ca. 5% der CSB-Fracht im Ablauf der Kläranlage verbleibt.

Wie in Tabelle 4 dargestellt, hat sich der Anteil des in Gas umgesetzten CSB nach der Er- richtung des Faulbehälters 3 maßgeblich gesteigert.

Eine Optimierung der Energiebilanz der Anlage wäre theoretisch möglich, in dem man durch Belastungserhöhung der Biologie (Absenkung TS-Gehalt) die spezifische Über- schussschlamm - Produktion erhöht, damit den zu oxidierenden Teil der CSB-Fracht redu- ziert und der Faulung noch etwas mehr CSB zuführt. Bei entsprechenden Maßnahmen ist aber darauf zu achten, dass die Prozessstabilität der biologischen Reinigung nicht gefähr- det wird.

3.5 Stabilisierungsgrad und organische Säuren

Im Rahmen des Messprogramms wurde ein besonderer Wert auf die Erfassung der organi- schen Säuren und ihrer Fraktionen gelegt, um den Stabilisierungsgrad der Schlammfäulung unter diesem Aspekt zu bewerten und Veränderungen bei den Werten durch den Betrieb des Faulbehälters 3 im Zwei-Stufen-Betrieb zu erfassen.

Neben den Abläufen aus den Faulbehältern 1 und 2 sowie 3 wurden auch der Primär- und Überschussschlamm auf den Gehalt an Säuren untersucht.

Bild 12 zeigt den Verlauf der Messwerte für die Summe der organischen Säuren (als Essig- säureäquivalent) sowohl für den Primärschlamm und Überschussschlamm als auch für die Faulschlämme.

Im Primärschlamm wurden Säuregehalte von 1000 bis 4000 mg/l gemessen, wobei diese Werte stark variieren. Erwartungsgemäß sind die Säuregehalte des Überschussschlammes deutlich niedriger, da eine Versäuerung des Belebtschlammes auf dem Wege zur Maschinel- len Eindickung nahezu ausgeschlossen ist.

Die Summe der organischen Säuren (als HAC-Äquivalent) bei den Faulbehältern kann als verhältnismäßig niedrig bezeichnet werden, sie liegen sowohl für die Behälter 1 und 2 als auch für den Behälter 3 in der Regel unter 150 mg/l und im Mittel bei unter 100 mg/l, was für ein gutes Stabilisierungsergebnis spricht (vergleiche DICHTL, 1984).

Der statistische Vergleich der Summe der organischen Säuren während des nachgeschal- teten Betriebs des Faulbehälters 3 zeigt folgendes Ergebnis:

Tabelle 6: Vergleich der FOS-Gehalte (als Essigsäureäquivalent)

	Mittelwert	50%-Wert (Median)
Faulbehälter 1 und 2 :	94	79
Faulbehälter 3 :	99	70

Der Säuregehalt im Faulbehälter 3 zeigt kaum eine Abnahme gegenüber den beiden vor- geschalteten Reaktoren. Dennoch wird noch eine signifikante Gasmenge erzeugt. Es ist

möglich, dass im Faulbehälter 3 noch organische Säuren erzeugt werden und diese dann in Methan und CO₂ umgesetzt werden.

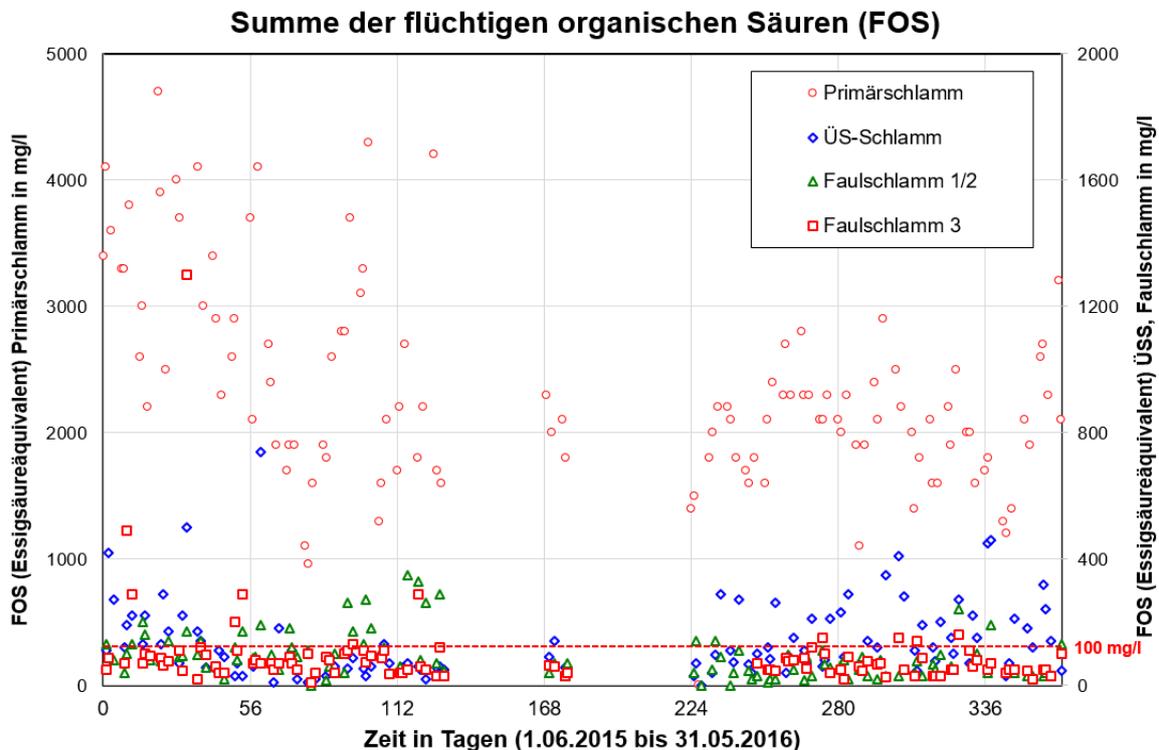


Bild 12: Verlauf der Summe organische Säuren (Essigsäureäquivalent) in den verschiedenen Schlämmen

Höhere organische Säuren als Essigsäure wurden in den Faulbehältern nicht nachgewiesen (alle Werte weitestgehend unter der Nachweisgrenze von 50 mg/l), lediglich im Primärschlamm waren nennenswerte Konzentrationen von Propionsäure zu verzeichnen.

3.6 Entwässerungsgrad Zentrifuge

Im Rahmen der Untersuchung erfolgte auch ein Vergleich der erzielten Entwässerungsgrade bei der Faulschlammzentrifuge vor und nach Inbetriebnahme des Faulbehälters 3. Folgende Zeiträume wurden verglichen:

- Januar bis Dezember 2012 (vor Inbetriebnahme Faulbehälter 3, 2012)
- Juni 2015 bis Mai 2016 (nach Inbetriebnahme Faulbehälter 3, 2015/2016)

Ausgehend von den Mittelwerten der beiden Vergleichszeiträume (Tabelle 7) kann festgestellt werden, dass der Entwässerungsgrad nach Inbetriebnahme des dritten Faulbehälters 3 gestiegen ist. Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen der beiden Vergleichszeiträume (Bild 13), so ist allerdings festzustellen, dass im Jahr 2012 es Zeiten gab, bei denen ähnlich

gute Entwässerungsgrade erzielt wurden wie im Zeitraum nach Inbetriebnahme des dritten Faulbehälters.

Tabelle 7: Vergleich der Entwässerungsgrade Zentrifuge

TR in entwässertem Schlamm		2015/2016	2012
Anzahl	Werte :	247	199
Minimalwert	TR in % :	22,0	21,0
Maximalwert	TR in % :	32,0	26,0
Mittelwert	TR in % :	25,2	23,2
Percentil	15% TR in % :	24,0	22,0
Percentil	50% TR in % :	25,0	23,0
Percentil	85% TR in % :	26,0	25,0

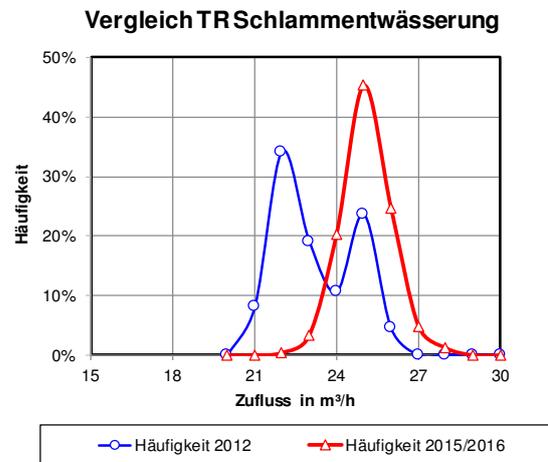
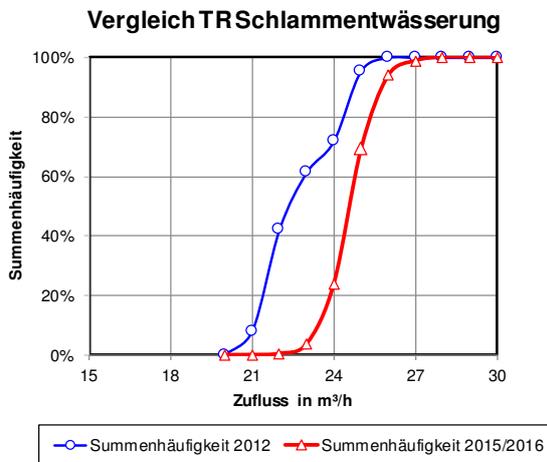


Bild 13: Vergleich Häufigkeitsverteilungen Entwässerungsgrad Zentrifuge

Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass nach Inbetriebnahme des dritten Faulbehälters sich etwas höhere Entwässerungsgrade eingestellt haben und das Entwässerungsergebnis stabiler ist als im Jahr 2012.

3.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

3.7.1 Steigerung des Gasanfalls

Es konnte nachgewiesen werden, dass durch den Bau des dritten Faulbehälters sowohl absolut eine Steigerung der Gasproduktion um über etwa 15% gegenüber dem Zeitraum vor dem Betrieb des dritten Behälters erfolgt. Die bezogen auf die CSB-Zulauf fracht berechnete spezifische Gaserzeugung stieg um über 20% (siehe Tabelle 4). Die mit dem Projekt „3. Faulbehälter“ kalkulierte Steigerung der Gasproduktion wurde nach diesen Messungen leicht übertroffen.

3.7.2 Abbaugrad Schlammfäulung

Auf Grundlage der Bilanzierung der TR und oTR-Frachten und der Berücksichtigung der gemessenen Glühverlustwerte konnte ein Abbau der organischen Trockensubstanz in der Schlammfäulung von ca. 50-55% nachgewiesen werden; diese Zahl entspricht einem üblichen bis leicht erhöhten organischen Abbau bei konventionellen Schlammfäulanlagen.

Die in Jena gemessenen Verhältnisse CSB/oTR im Roh- und Faulschlamm von 1,3 liegen niedriger als die üblichen Erfahrungswerte von 1,5 bis 1,6 kg_{CSB}/kg_{oTR}. In wie weit dies eine spezielle Eigenschaft des Klärschlammes aus Jena darstellt, kann nicht abschließend gesagt werden.

Dennoch konnte eine weitgehend schlüssige CSB-Bilanz zur Abwasserreinigung und Schlammbehandlung aufgestellt werden (Bild 11), die einen Überblick über die Umsetzung des im Zulauf der Kläranlage anfallenden CSB in Schlamm, Belüftung und Faulgas geben kann.

3.7.3 Stabilisierung

Mittels der Bilanz der organischen Trockensubstanz und des daraus abzuleitenden Abbaugrades in der Fäulung war schon zu erkennen, dass das Stabilisierungsergebnis der Fäulung den Erwartungen bei der vorliegenden langen Verweilzeit sowie der hohen Faulraumtemperatur entspricht.

Die niedrigen Gehalte an organischen Säuren im Ablauf der Faulbehälter und das Fehlen aller höherer organischen Säuren (Propionsäure etc.) im Faulschlamm bestätigen das Ergebnis, dass der Faulschlamm als voll stabilisiert bezeichnet werden kann.

3.7.4 Schlamm entwässerung

Ein Vergleich der Entwässerungsgrade der Faulschlammzentrifuge vor- und nach der Inbetriebnahme des dritten Faulbehälters lässt vermuten, dass durch den dritten Behälter tendenziell bessere Entwässerungsergebnisse erzielt werden. Ob dies alleine auf den dritten Faulbehälter zurückzuführen ist, kann anhand der verfügbaren Daten allerdings nicht eindeutig geklärt werden.

4 Energieanalysen

Die Energieanalysen zur ZKA Jena sind Gegenstand getrennter Berichte, die vom Büro Bierhals Wasser Consult Gera erstellt worden sind und als Anlage beigefügt sind. An dieser Stelle wird nochmals auf die Entwicklung der Energiebilanz ZKA Jena eingegangen seit 1996. Folgende maßgebliche Maßnahmen sind hier auf dem Weg bis zur heutigen Anlage zu nennen, die sich auf die Energiebilanz der Anlage ausgewirkt haben.

- 2001: Inbetriebnahme der neuen ZKA mit Nährstoffelimination, mesophiler Faulung und Faulgasverwertung
- 2007: Optimierung und Leistungssteigerung der Belüftungstechnik wegen der erforderlichen Kapazitätssteigerung von 145000 EW auf über 200.000 EW
- 2013/14: Erweiterung des Faulbehältervolumens mittels 3. Faulbehälter, Errichtung eines dritten Grundlast-BHKW mit höherem elektrischen Wirkungsgrad

Bild 14 zeigt den Stromverbrauch und seit Inbetriebnahme der Neuanlage auch die in den BHKW erzeugte elektrische Energie und den Grad der Eigenversorgung der ZKA als Jahresmittelwerte.

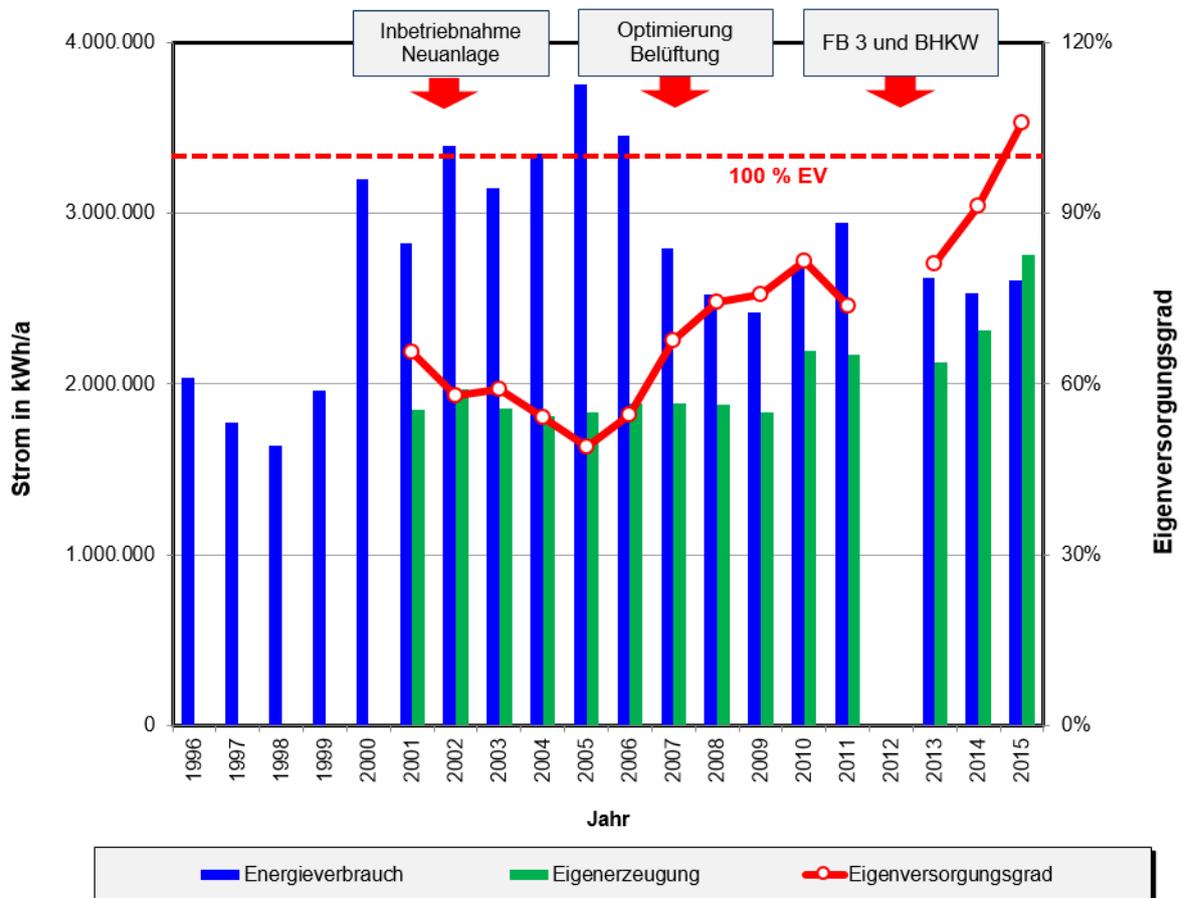


Bild 14: Energieverbrauch, Eigenerzeugung und Eigenversorgungsgrad ZKA von 1996 bis 2015

Die Stromverbrauchszahlen wurden bereinigt durch den Verbrauch der Mischwasserbehandlung (Pumpen beim Regenwasserbehandlung auf der ZKA). Diese Zahlen wurden in den Energieanalysen genauer erfasst und für die Vorjahre pauschal einheitlich angesetzt.

Somit zeigt die Entwicklung in Bild 14 den Verbrauch an elektrischer Energie, der ausschließlich für die weitergehende Abwasserreinigung benötigt wurde.

In den Jahren 1996 – 2000 wurde bedingt durch die geringere Reinigungsleistung der Anlage weniger Strom verbraucht als mit der neuen Anlage, der Mehrverbrauch der neuen Anlage wurde aber durch die Eigenerzeugung mittels Faulgasverwertung wieder weitgehend ausgeglichen.

In den Jahren vor 2006 wurde festgestellt, dass die Anlage bereits ausgelastet war und die Belüftungstechnik angepasst werden musste. Diese Maßnahmen wurden umgehend umgesetzt und durch die optimierte Belüftungstechnik wurde nicht nur der Energieverbrauch der Belüftung signifikant gesenkt, sondern gleichzeitig die Reinigungskapazität der Anlage erhöht. Mit dieser Maßnahme konnte wegen geringeren Energiebedarfs bei gleichzeitig gleichbleibender bis leicht gesteigener Gasproduktion ein Eigenversorgungsgrad von ca. 70% erreicht werden.

Schließlich wurde durch die Maßnahme der Faulraumerweiterung der Gasanfall nochmals signifikant gesteigert (2013). Zusammen mit der Inbetriebnahme des hocheffizienten Grundlast-BHKW (ab 2014) konnte schließlich für das Jahr 2015 die Energie-Autarkie der ZKA nachgewiesen werden.

Diese Betrachtung zeigt, dass das gesteckte Ziel der Energieautarkie aus den folgenden Gründen möglich wurde:

- Energieeffiziente verfahrens- und anlagentechnische Planung als Basis
- Energiesparende Belüftungstechnologie
- Steigerung der Gasausbeute durch Erweiterung der Faulung
- Effiziente Faulgasverwertung im BHKW
- Energiebewusste Betriebsführung durch den Anlagenbetreiber

Diese Maßnahmen führen zusammen mit weiteren günstigen Randbedingungen (bezogen auf die Schmutzfracht geringer Abwasseranfall, günstiges Verhältnis N/CSB) zu dem vorliegenden Ergebnis.

In der getrennten Energieanalyse des Büros BWC Gera werden zusätzlich weitere Empfehlungen zur Einsparung an Strom gegeben, die zu einer Absicherung der Energieautarkie führen können.

5 Schlussfolgerungen

Mithilfe des Messprogramm und weiterer umfangreicher Betriebsdatenanalysen konnte dargestellt werden, dass das Ziel der Steigerung des Gasertrags in der Faulung durch die Errichtung eines dritten Faulbehälters auf der ZKA Jena erreicht bzw. leicht übertroffen worden ist. Neben der positiven Auswirkung auf die Energiebilanz ist auch tendenziell eine Verbesserung der Entwässerungseigenschaften des Schlammes zu verzeichnen.

Mittels der Energieanalysen konnte weiterhin gezeigt werden, dass über das Jahr 2015 die Energieautarkie der Abwasserreinigung in Jena erreicht werden konnte. Die wesentlichen Komponenten, die zu diesem Ergebnis führten, sind zum einen günstige Randbedingungen (Abwasserzusammensetzung, Hydraulik) und eine moderne Abwasserreinigungstechnologie, eine weitgehende Nutzung des Energiepotenzials aus dem anfallenden Schlamm (Faulbehälter 3) und eine effiziente Faulgasnutzung mit einer Blockheizkraftwerk-Technologie nach dem aktuellen Stand.

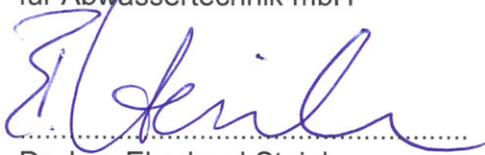
6 Literatur

- KAPP, H. (1984): Schlammfäulung mit hohem Feststoffgehalt. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 86, Kommissionsverlag Oldenbourg München 1984, ISBN 3486262416
- STEINLE, E. (1987): Untersuchungen zur Energiebilanz konventioneller beheizter Faulbehälter, Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen Nr.22, UniBw München, Neubiberg 1987
- DICHTL, N. (1984): Die Stabilisation von Klärschlämmen unter besonderer Berücksichtigung einer zweistufigen aeroben/anaeroben Prozessführung, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Nr. 5, Ruhr Uni Bochum 1984

Gefertigt:

Weyarn, 25.08.2016

Dr.-Ing. Steinle
Ingenieurgesellschaft
für Abwassertechnik mbH



Dr.-Ing. Eberhard Steinle
Geschäftsführer



Energieautarke Zentralkläranlage Jena



Energie-Check und Energie-Analyse vergleichs- und zielrelevanter Systemkomponenten

Gera, Juni 2016



Rudolstädter Straße 39
07745 Jena

BWVC
BIERHALS
WASSER CONSULT
Franz-Petrich-Straße 28
07545 Gera

Energieautarke Zentralkläranlage Jena



Energie - Check

Gera, März 2016



Rudolstädter Straße 39
07745 Jena



Franz-Petrich-Straße 28
07545 Gera

ENERGIE
Effizient
IHR NUTZEN

Inhaltsübersicht

1 Ausgangssituation

- 1.1 Veranlassung
- 1.2 Untersuchungsrahmen und Zielstellung
- 1.3 Einfluss des Klimawandels

2 Grundlagen – Beschreibung des Istzustandes

- 2.1 Technische Grundlagen
 - 2.1.1 Datenmaterial und Auswertezeitraum
 - 2.1.2 Langzeitentwicklung Energieaufwand / Anteil Energiebezug
 - 2.1.3 Kurzbeschreibung der Anlage
 - 2.1.4 Bestandsaufnahme und Auswertung vorhandener Unterlagen
 - 2.1.5 Ermittlung Grundlagendaten zur Energiekennwertberechnung
 - 2.1.6 Kurzeinschätzung der Anlagensituation
 - 2.1.7 Objektspezifische Randbedingungen
 - 2.1.8 Energiesparende Optimierungsmaßnahmen
 - 2.1.9 Sensor- / Messtechnik
 - 2.1.10 Betriebliche Anlagenprobleme
- 2.2 Betriebsführung der Anlage
 - 2.2.1 Personalsituation / Qualifikation
 - 2.2.2 Qualität der Betriebsführung
- 2.3 Energiebezugsvertrag
- 2.4 Vorgehensweise und Untersuchungsmethodik

3 Energie- und CO₂-Bilanz / Istzustandsanalyse – Energie-Check

- 3.1 Langzeitentwicklung und Niveau des Energieverbrauches Gesamtanlage und Kennwertvergleich
- 3.2 Verteilung des Energiebedarfs
- 3.3 Jahresganglinie Langzeitentwicklung Strom / Verbrauch – Eigenerzeugung - Bezug
- 3.4 Energie – und CO₂-Bilanz
- 3.5 Kennwertvergleich zur Bewertung des Energieverbrauches – Schwachstellenanalyse
 - 3.5.1 Energieeffizienz projekt- und vergleichsrelevanter Funktionseinheiten
 - 3.5.2 Energiegewinnung

4 Entwicklung Energie-Performance vergleichs- und zielrelevanter Anlagengruppen

- 4.1 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch
- 4.2 Stromverbrauch Belüftung
- 4.3 Stromverbrauch Schlammbehandlung
- 4.4 Spezifischer Stromverbrauch Gesamtanlage
- 4.5 Energetische Schwachstellen der Anlage
- 4.6 Maßnahmevorschläge mit weiterem Untersuchungsbedarf

5 Jahres-Vergleich Energieverbrauch und – performance

5.1 Gesamtanlage 2010 – 2015

5.2 Stromverbrauch Belüftung

5.3 Stromverbrauch Schlammbehandlung

5.4 Eigenerzeugung Strom- und Eigenversorgungsgrad

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

7 Schrifttumsverzeichnis

8 Anlagenverzeichnis

Verzeichnis Tabellen

Tabelle 1	Einfluss des Klimawandels	S. 3
Tabelle 2	Aktuelle Anlagenauslegung ZKA Jena	S. 10
Tabelle 3	Elektroenergie und CO ₂ -Emission 2000 – 2015	S. 14
Tabelle 4	Energiebedarf Strom gesamt und CO ₂ -Emission 2014 (vor Umbau)	S. 16
Tabelle 5	Rangfolge der Funktionseinheiten und Bedarfsanteile	S. 17
Tabelle 6	Rangfolge nach Verbrauchsgruppen 2014	S. 18
Tabelle 7	Auszug Energie-Bilanz Strom-Verbrauch 2014 – 2015	S. 22
Tabelle 8	Jahres-Vergleich Energie-Verbrauch Strom 2014 – 2015	S. 23
Tabelle 9	Energetische Beurteilungskriterien	S. 25

Verzeichnis Abbildungen

Abb. 1	Vergleich-Kläranlage – Entwicklung Stromkosten	S. 2
Abb. 2	Zentralkläranlage Jena- Entwicklung Strombezugs-Kosten	S. 2
Abb. 3	Langzeit-Entwicklung Energieverbrauch 2006 – 2015	S. 5
Abb. 4	Schema der Anlage	
Abb. 5	Langzeit-Entwicklung Strombezug / CO ₂ -Emission / Stromkosten 2000 – 2015	S. 15
Abb. 6	Prozentuale Verteilung der Energiebedarfsmenge	S. 17
Abb. 7	Prozentuale Verteilung der Energiebedarfsmenge nach Verbrauchsschwerpunkten (-gruppen)	S. 18
Abb. 8	Langzeitentwicklung Energie-Verbrauch , -Bezug und Erzeugung Strom – 2016 - 2014	S. 20
Abb. 9	Langzeitentwicklung Energieverbrauch und –erzeugung Funktions-Einheiten (Unterzähler 2013 – 2015)	S. 28
Abb. 10	Langzeitentwicklung Energieverbrauch und –erzeugung Funktions-Einheiten (Unterzähler 2013 – 2015)	S. 29
Abb. 11	Langzeitentwicklung Spezif. Energieverbrauch / Einwohnerwerte 2006 – 2015	S. 30
Abb. 12	Jahresganglinie Strom-Verbrauch Gegenüberstellung Jahre 2010 – 2015	S. 33
Abb. 13	Jahresganglinie Belüftung Biologie (Turbovernichter) Gegenüberstellung Jahre 2014 – 2015	S. 35
Abb. 14	Jahresganglinie Belüftung Biologie (Turbovernichter) 2014	S. 35
Abb. 15	Jahresganglinie Stromverbrauch Schlammbehandlung Gegenüberstellung Jahre 2012 – 2015	S. 37
Abb. 16	Jahresganglinie Strom-Erzeugung Gegenüberstellung Jahre 2013 / 2015	S. 39
Abb. 17	Jahresganglinie Strom-Bezug Gegenüberstellung Jahre 2014 / 2015	S. 39
Abb. 18	Jahresganglinie Eigenversorgungsgrad Gegenüberstellung Jahre 2014 / 2015	S. 39

1 Ausgangssituation
1.1 Veranlassung

Der Zweckverband hat im zurückliegenden Zeitraum hohe Anstrengungen für den Ausbau einer anforderungsgerechten Abwasserbehandlung unternommen. Die errichteten Kläranlagen reinigen die Abwässer nach höchsten Umweltstandards zum Schutz der Gewässer. Sie tragen somit wesentlich zur Umsetzung der Ziele der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie bei.

Abwasserbehandlungsanlagen benötigen durchschnittlich 20 % des kommunalen Strombedarfes. Insofern ist die Abwasserbehandlung ein klimarelevanter Bereich. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel kommt deshalb die Steigerung der Energieeffizienz und dem Ressourcenschutz eine wachsende Bedeutung zu.

Der spezifische Energieverbrauch der ZKA Jena bewegt sich mit rd. 18,0 kWh/ (E x a) auf einem Niedrigniveau. Dies ist das Ergebnis langjähriger Aktivitäten des Vorhabensträgers für einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess.

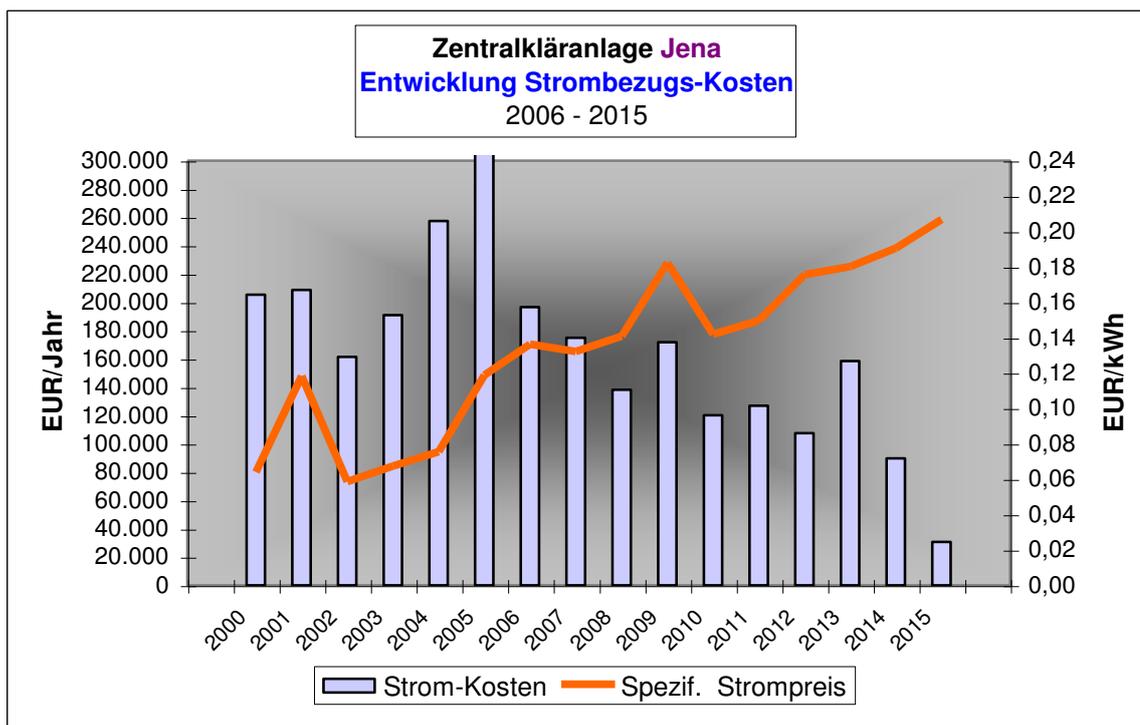
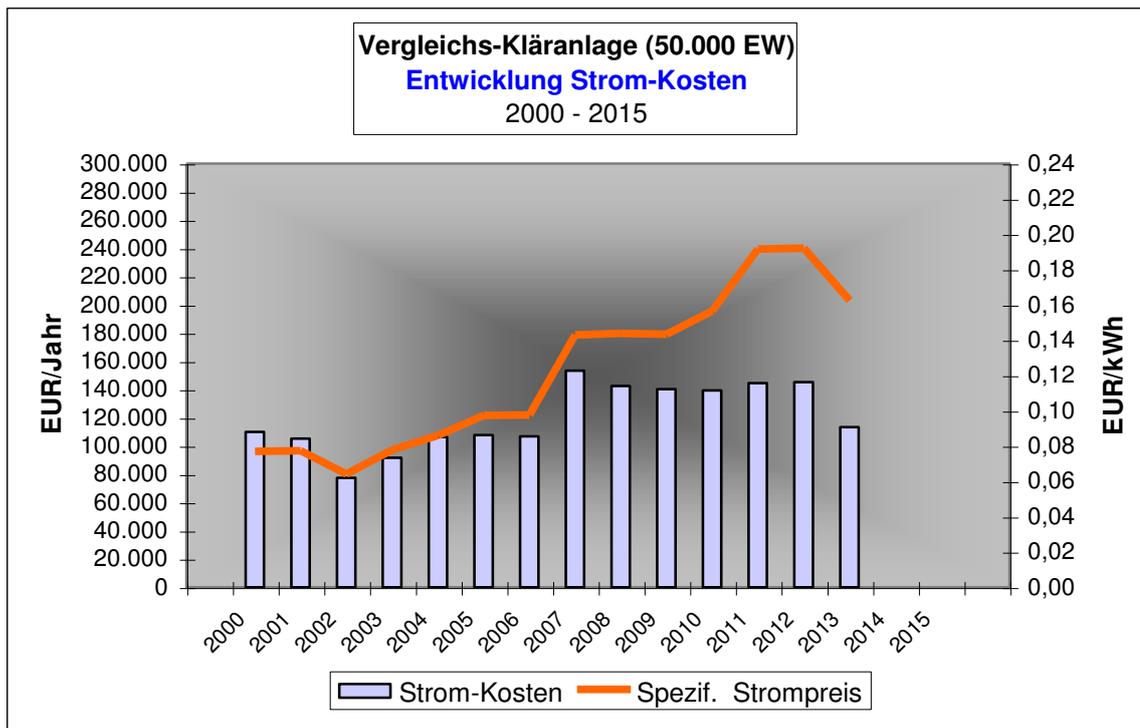
Die aktuelle projektspezifische, anspruchsvolle Zielsetzung

– Erreichen der Energieautarkie –

erfordert nunmehr die Erschließung noch verbleibender Potenziale zur Steigerung der Energie- Effizienz und Energie-Gewinnung. Deshalb möchte der Zweckverband JenaWasser in diesem Zusammenhang projektspezifisch einen Vergleich der Energie-Effizienz energierelevanter Anlagengruppen vor und nach dem Umbau der Faulungsanlage vornehmen lassen.

- **Langzeitentwicklung der Strombezugskosten – Anlagenvergleich** (Anlagen mit anerobere Schlammstabilisierung)

Anmerkung: Qualitativer Vergleich infolge unterschiedlicher Anlagengröße



1.2 Untersuchungsrahmen und Zielstellung

Der Untersuchungsrahmen der vorliegenden Untersuchung – Energie-Check – umfasst die Gesamtanlage der Abwasser- und Schlammbehandlung.

Zielstellung:

- Dauerhafte Senkung des Energieaufwandes und der Treibhausgasemissionen sowie Steigerung der Energiegewinnung für das Erreichung und die Sicherung der Energie-Autarkie der Anlage

1.3 Einfluss des Klimawandels

Aktuelle F/E-Erkenntnisse der TU Dresden zum Einfluss des Klimawandels auf den Bau und Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen lassen sich schwerpunktmäßig wie folgt zusammenfassen

Klimatische Veränderungen	Auswirkungen auf die Abwasserbehandlung
Längere Trockenperioden	<ul style="list-style-type: none"> ○ größere Schwankungen / höhere Zulaufkonzentrationen ○ Zunahme Vorabbau im Kanalnetz → Frachtschwankungen
Zunahme Starkregenereignisse bzw. ggf. Extremereignisse	<ul style="list-style-type: none"> ○ Zunahme Spülstöße → Fracht-Stoßbelastungen ○ Risikozunahme hydraulische Belastung und Überflutung der Anlage
dünnere Schneedecke → mehr Regenwasser geringer Intensität im Winter	<ul style="list-style-type: none"> ○ Abwasseranfalles im Winterzeitraum - weniger Trockenwettertage - kürzere Schmelzwasserperioden

➤ Zunehmende Bedeutung

- der Anlagen-Variabilität
- des ENERGIE-Managements
- der Notwendigkeit der Integralen Entwässerungsplanung

Bei Vorliegen regionaler Klima-Daten sollten die vorgenannten Aussagen ggf. auf die Notwendigkeit einer lokalen Anpassung geprüft werden.

2 Grundlagen – Beschreibung des Istzustandes

2.1 Technische Grundlagen

2.1.1 Datenmaterial und Auswertzeitraum

Für die Erstellung dieser Analyse standen zur Verfügung und wurden ausgewertet:

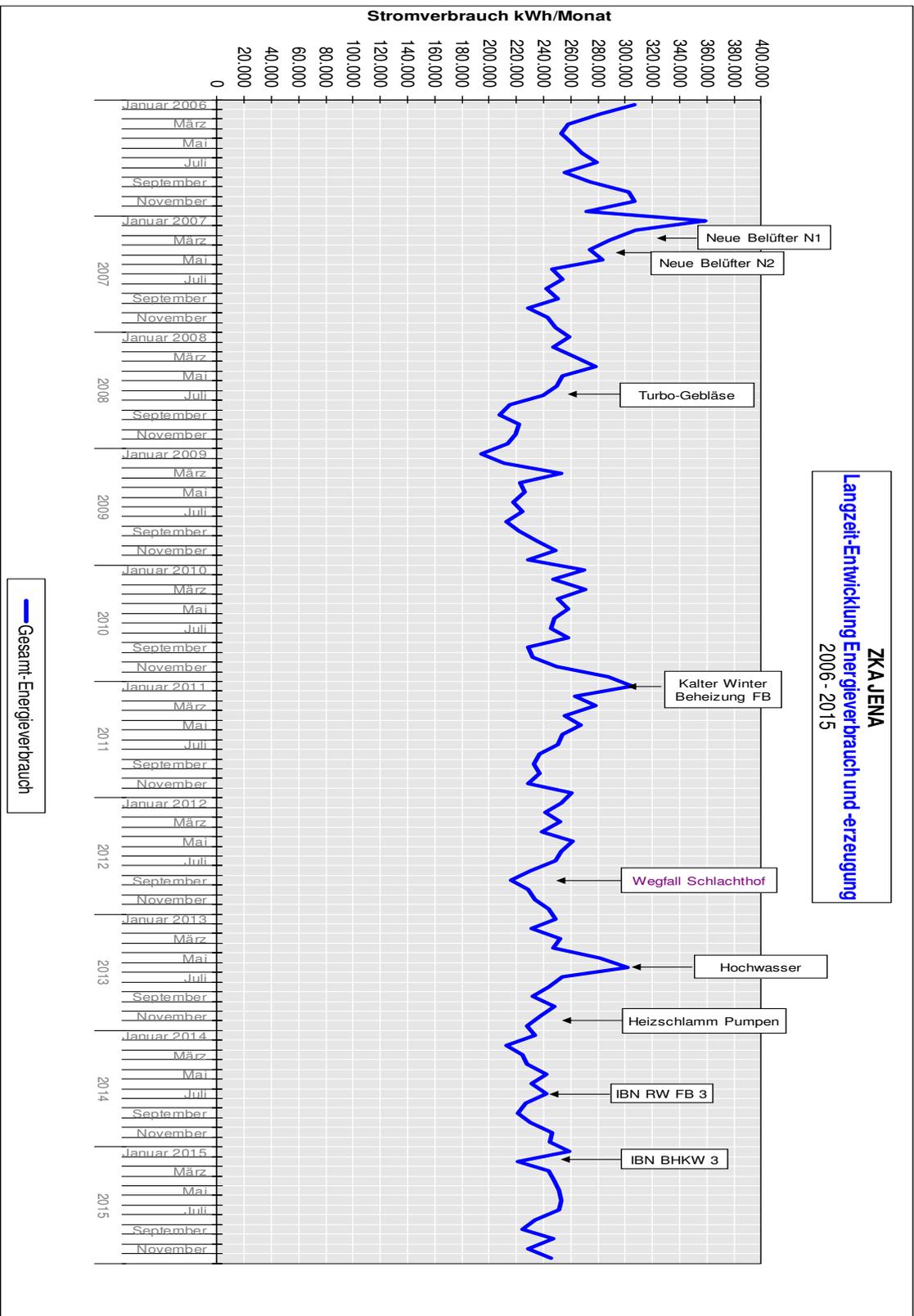
- Betriebstagebuch 2014 / 15
- Energiebuchhaltung 2014 / 15 (Monats- und Jahresdaten)
- Auszug Eigenkontrollbericht 2014 / 15
- Stromabrechnungen

Die Auswertungszeitraum umfasste schwerpunktmäßig die Kalender-Jahre 2013 - 15.

Die Reproduzierbarkeit und Aktualität der Daten wurde anhand des Datenmaterials von Vorjahren geprüft.

2.1.2 Langzeitentwicklung Energieaufwand / Anteil Energiebezug

Die Langzeitentwicklung des Energieverbrauches sowie der Aktivitäten des Anlagenbetreibers zeigt das nachstehende Diagramm.



2.1.3 Kurzbeschreibung der Anlage

Die Ausbaugröße der Abwasserbehandlungsanlage beträgt 210.000 Einwohnerwerte.

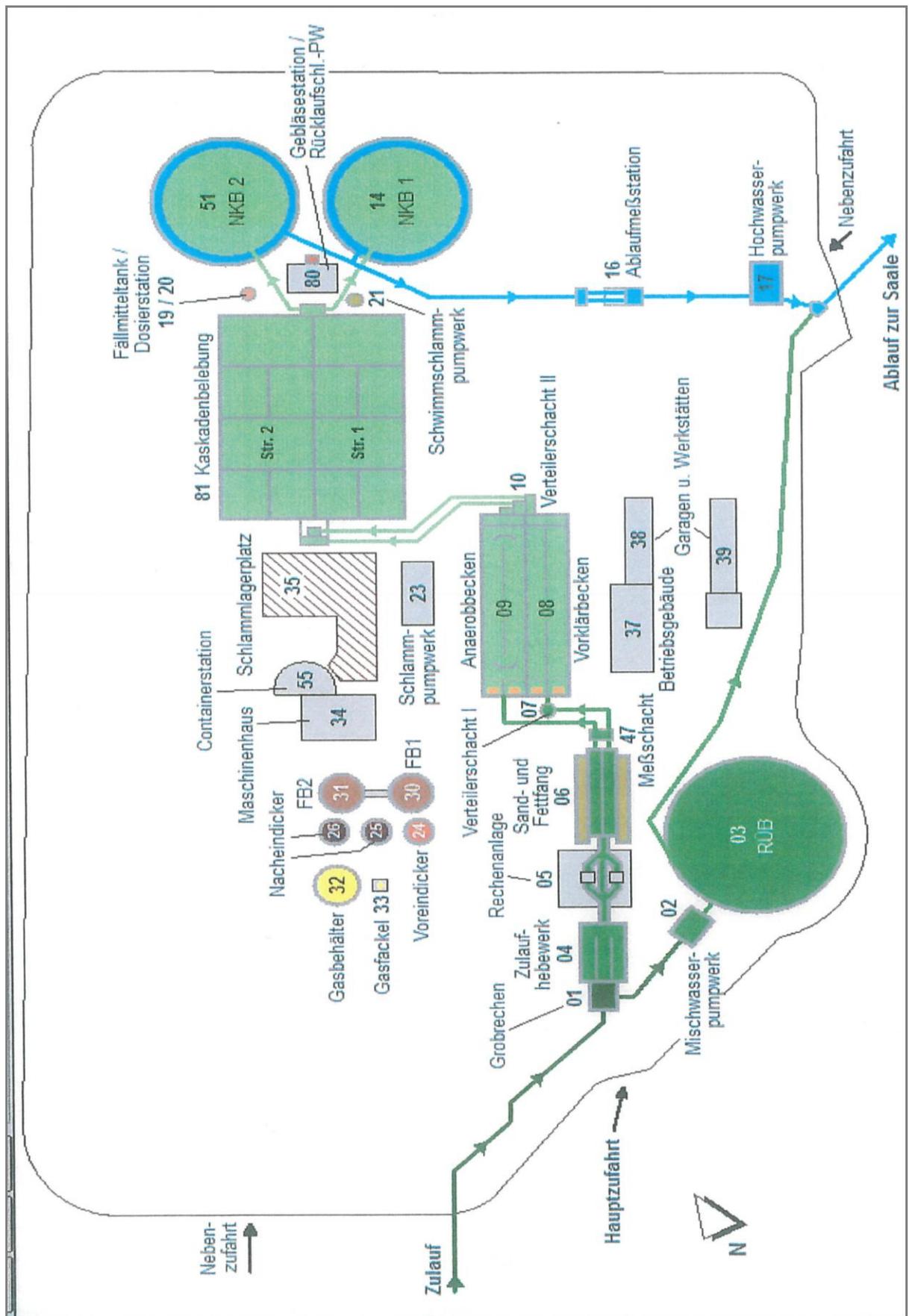
Die Verfahrenstechnologie umfasst schwerpunktmäßig die technologischen Stufen:

- Regenüberlaufbecken
- Zulauf-Pumpwerk
- Rechenanlage
- Belüfteter Sand- und Fettfang
- Vorklärung
- Belebungsanlage (2 Straßen mit je 2 Kaskaden)
Biologisch-Chemische Phosphor – Elimination (Teilstrom – Anaerobbecken)
Kohlenstoffelimination
Nitrifikation
Denitrifikation vorgeschaltet
- Anaerobe Schlammstabilisierung
- Statische und maschinelle Überschussschlammvoreindickung
- Statische Faulschlammnacheindickung
- Schlammentwässerung (Dekanter)
- Faulgasverwertung (BHKW).

Die Regelung des Sauerstoffeintrages erfolgt nach der Sauerstoffkonzentration.

Bauzeitraum:	1981 / Umbau und Sanierung 2001 2005 – 2007 Kapazitätserweiterung
Inbetriebnahme:	1981 / 2001 / 2007
Entwässerungssystem:	Mischsystem / Teil-EZG im Trennsystem
Entsorgungspfad Klärschlamm:	Landwirtschaft

Das Technologieschema (Stand 2014) zeigt nachstehende Abbildung.



Nachstehende Fotos zeigen einen Blick auf die Anlage sowie die Anlagentechnologie.



Blick auf die Belebungsanlage



Blick auf die Schlammfaulungsanlage

2.1.4 Bestandsaufnahme und Auswertung vorhandener Unterlagen

Im Rahmen zweier Anlagenbegehungen erfolgte eine Bestandsaufnahme der energetischen Anlagen. Zusätzlich wurden die Aggregateleistung und die Energiebuchhaltungsunterlagen ausgewertet. Der Auswertung energierelevanter Anlagendaten sowie Belastungsdaten (Abwasseranfall, BSB5, CSB) liegen die Betriebstagebücher bzw. der Jahresbericht 2013 / 15 zugrunde. Die Leistungsangaben auf den Typenschildern von Aggregaten wurden teilweise zusätzlich erfasst. Die wichtigsten Bemessungsgrößen und betrieblichen Kennwerte der Anlage sind in der Anlage zum Bericht zusammengestellt sowie in der Projekt-Stammakte abgelegt.

Die Erfassung des Elektroenergieverbrauchs der Anlage erfolgte langfristig über

- 12 Summenzähler für fast alle Verbrauchsgruppen

Es wird eine Energiebuchhaltung der Verbrauchsdaten für den Energieträger

- Elektroenergie
- Erdgas

in Zeitintervallen geführt.

2.1.5 Ermittlung Grundlagendaten zur Energiekennwertberechnung

Nachstehende Grundlagendaten waren für eine energetische Kennwertermittlung und Bewertung erforderlich, parziell ergänzend zu ermitteln und wurden ausgewertet:

- Tägliche Laufzeiten der Aggregate
- Splittung des Gesamtenergieverbrauches, Erfassung von Einzelverbrauchern und Zuordnung auf Funktionseinheiten
- Ermittlung der repräsentativen Anlagenbelastung
- Ermittlung technischer Anlagenkennwerte

Die ermittelten Daten sind in der Anlage zum Bericht sowie in der Projektstammakte abgelegt.

2.1.6 Kurzeinschätzung der Anlagensituation

- Anlagengröße
 - Bemessungswert: 145.000 EW
210.000 EW (Teilkapazität Belüftung Biologie)
 - Aktueller Anschlusswert 2014: rd. 154.700 EW CSB (50 % Perzentil)
2015: rd. 149.500 EW CSB (50 % Perzentil)
- Erfüllung der Reinigungsanforderungen
Die Anlage weist eine gute und stabile Reinigungsleistung auf. Überschreitungen der wasserrechtlichen Überwachungswerte sind nicht zu verzeichnen.
- Betriebssicherheit
Die vorhandenen Betriebsdaten und Aussagen des Bedienpersonals belegen einen stabilen Anlagenbetrieb mit guter Betriebssicherheit.
- Aktuelle Anlagenauslastung 2014

Parameter	ME	Bemessungswert	Auslastungsgrad Istzustand		Bemerkungen
Hydraul. Kapazität					
- Trockenwetter	m ³ /h	1.420			
	m ³ /d	28.500			
- Mischwasser	m ³ /h	2.480			
Schmutzfracht			Mittelwert		s. Anlage
- CSB	EW	210.000	154.700	74 %	Mittelwert aus 24h-Mischproben incl. Fäkalien
Schlammbelastung					
- BSB5	g BSB / (d x gTS)	0,07			

2.1.7 Objektspezifische Randbedingungen

- Sehr gute Energie-Effizienz Gesamtanlage → Optimierung ist anspruchsvolle Aufgabe
- Wärmeversorgung energieautark über Faulgas
- Spezielle Regelungen für den Normalbetriebsfall im Rahmen eines automatisierten Energiemanagements bestehen für die Gasnutzung (BHKW – Betrieb)
- Mitbehandlung Industrie-Abwasser
- Mitbehandlung von Fäkalien (Direktzugabe im KA-Zulauf)
- Betriebs-Stützpunkt (Personal-Abwasser; Kanal-Fahrzeuge; Lagerhaltung)

2.1.8 Energiesparende Optimierungsmaßnahme

Im Bemühen des Anlagenbetreibers um konsequent energiebewussten Handeln wurden in der Vergangenheit bereits nachstehende Maßnahmen realisiert:

Realisierte Maßnahmen	Jahr
○ Einbau Hocheffizienz-Belüfter Nitrifikationsbecken 1	2007
○ Einbau Hocheffizienz-Belüfter Nitrifikationsbecken 2	2007
○ Einbau Turbo-Gebläse + Erweiterung DL-Verteilung	2008
○ Substitution Siebbandpresse durch Zentrifuge zur Faulschlammwässerung	2010
○ Ergänzung 2. Rezirkulationskreislauf	2011

Aktuelle Maßnahmen – Umbau Schlammstabilisierung und Gasverwertung

- | | |
|--|------|
| ○ Erneuerung Heizschlamm Pumpen und Zubau 3. Wärmetauscher | 2013 |
| ○ Inbetriebnahme Rührwerke Faulbehälter 3 | 2014 |
| ○ Inbetriebnahme 3. BHKW | 2015 |

Die aktuelle Maßnahme „Energieautarke ZKA Jena“ ist eine logische Fortführung des energiebewussten Handelns.

2.1.9 Sensor- und Messtechnik

Die Anlage ist mit Mengen- und Qualitäts-Messtechnik für alle relevanten Stoffströme ausgestattet.

2.1.10 Betriebliche Anlagenprobleme

- Hochwassersituation in 2013
- Optimierung Zusammenwirken Gasspeicher und BHKW-Anlage

2.2 Betriebsführung der Anlage

2.2.1 Personalsituation / -qualifikation

- 1 Leiter Kläranlage - Meister
- 7 Mitarbeiter - Fachkraft Abwassertechnik

2.2.2 Qualität der Betriebsführung

Eine hohe Qualität des Anlagenbetriebes wird nachgewiesen und gesichert durch:

- Erfüllung der Reinigungsanforderungen
- Automatisierung Betriebsüberwachung
- werktäglicher Qualitätsnachweis
- Betriebsanalytik und anlagenüberschreitende Laborüberwachung
- Mitwirkung in KA-Nachbarschaften einschl. Qualifizierungsmaßnahmen
- Teilnahme an Speziallehrgängen

2.3 Energiebezugsvertrag

Der Verband JenaWasser –Zweckverband der Abwasserentsorgung und Wasserversorgung

- hat einen Stromliefervertrag mit der Thüringer Energienetze GmbH (TEN)

2.4 Vorgehensweise und Untersuchungsmethodik

Grundsätzlich sind alle Untersuchungen zur Energie- und Betriebsoptimierung sowie Emissionsreduzierung einer Kläranlage auf der Grundlage der nachfolgenden Kriterien und Prioritätenfolge vorzunehmen:

1. Erfüllung der Reinigungsanforderungen
2. Betriebssicherheit und Prozessstabilität
3. Energieeinsparung / Emissionsreduktion

Unter diesem Aspekt sind auch alle energetischen Untersuchungen und Maßnahmen auf die Erfüllung der vorstehenden Anforderungen 1 und 2 zu überprüfen.

3 Energie- und CO₂-Bilanz / Istzustandsanalyse – Energiecheck

3.1 Langzeitentwicklung und Niveau des Energieverbrauches Gesamtanlage und Kennwertvergleich

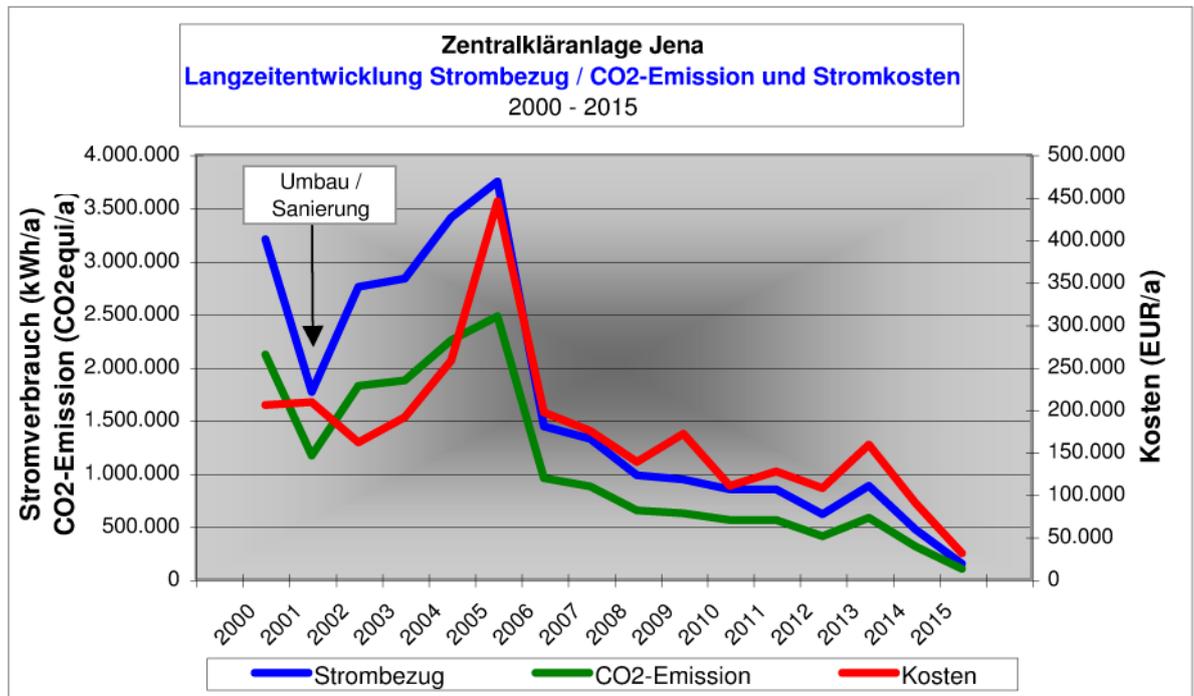
■ Elektroenergie und CO₂-Emission

Im Zeitraum 2000 bis 2015 bewegte sich der Elektroenergieverbrauch der Anlage auf nachstehendem Niveau. Der Energiebezug konnte signifikant reduziert werden.

Jahr	Datenquelle	Energieverbrauch	Energiebezug	CO ₂ -Emission	Kosten
		kWh/a	kWh/a	kg CO ₂ _{equi} /a	€
2000	EVU		3.203.600	2.117.580	205.343,62
2001	EVU		1.764.884	1.166.588	208.822,49
2002	EVU		2.755.318 <small>zzgl. Reinsauerstoff</small>	1.821.265	161.322,43
2003	EVU		2.833.389	1.872.870	191.018,28
2004	EVU		3.407.606	2.252.427	257.380,57
2005	EVU		3.747.501	2.477.098	445.101,68
2006	EVU	3.317.187	1.440.487	952.162	196.439
2007	EVU	3.224.051	1.323.958	875.136	174.915,55
2008	EVU	2.865.727	981.470	648.751	138.218,21
2009	EVU	2.696.183	941.921	622.610	171.496,67
2010	EVU	3.045.423	846.871	559.782	110.277,26
2011	EVU	3.069.335	848.452	560.826,77	126.944,82
2012	EVU	2.899.753	612.504	404.865	107.613,74
2013	EVU	3.005.401	880.052	581.714	158.558,55
2014	EVU	2.781.914	470.221	310.816	89.960,24
2015	EVU	2.906.847	148.417	98.104	30.701,88

○ **Energie-Bezug**

Die Langzeitentwicklung (Trendanalyse) zeigt nachstehende Grafik.



Langfristige Reduzierung des Strom-Bezuges um rd. **96 % !**
(gegenüber Hochwert 2005)

○ **Energiebedarf STROM gesamt und CO₂-Emission 2014 (vor Umbau)**

- Der spezifische Stromverbrauch der Gesamtanlage betrug im Jahr 2014 18,5 kWh/EW_{BSB}.
- Die Anlage weist damit eine sehr gute Energie-Effizienz auf.
- Im Kennziffern-Vergleich positionierte sich die Anlage im optimalen Bereich unterhalb des 10%-Percentiles der Unterschreitungshäufigkeit nach DWA –A 216

Parameter	ME	Anlagenwert	Vergleichswerte	
			Übliche Werte	Optimum UBA 2007
		2014		Zielwert
Elektroenergie ○ absolut Eigenerzeugung Bezug Gesamt ○ spezifisch bzgl. CSB (Belastungswert)	kWh/a kWh/a kWh/a kWh/(EW _{CSB} x a)	2.311.693 470.221 2.781.914 18,0	32,5 DWA-Median von 138 KA	19,0 Incl. Zuschlag Übertiefe Zulaufkanal
Wärmeenergie (Erdgas) ○ absolut Erzeugung Bezug Gesamt ○ spezifisch Bezug	kWh/a kWh/a kWh/a kWh/(EW x a)	0		
Energie gesamt	kWh/a	2.781.914		

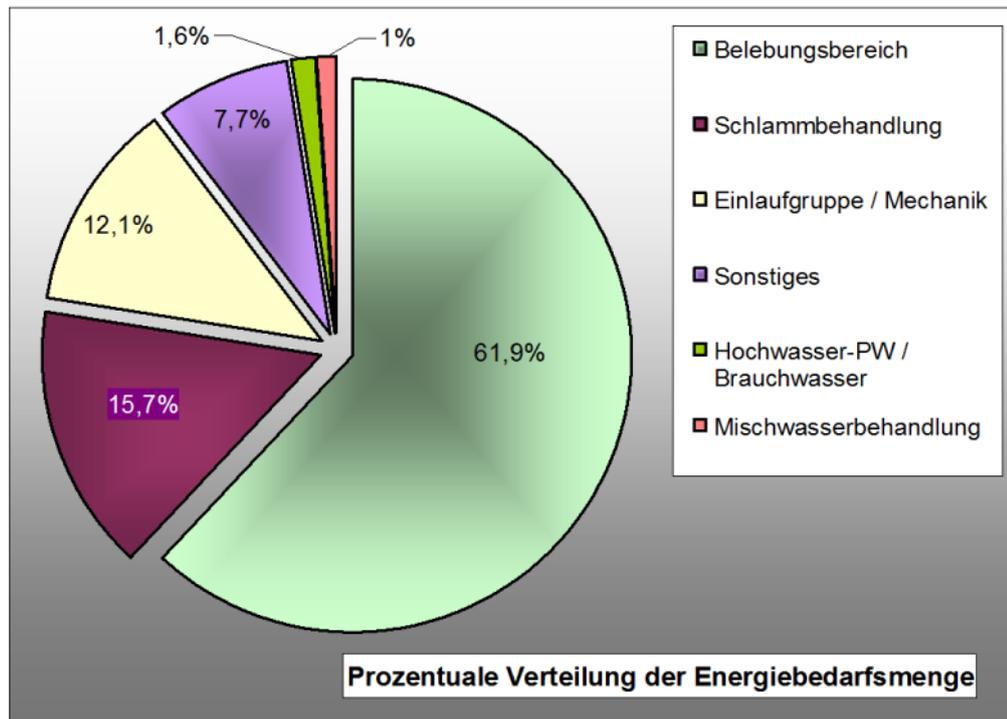
Anmerkung: Anschlussgrad der Anlage rd. 74 %

In der nächsten Arbeitsstufe (Energie-Analyse) erfolgt eine Tiefenprüfung der Betriebs- und Verbrauchsdaten. Auf deren Grundlage wird eine Präzisierung der Bilanzwerte vorgenommen

3.2 Verteilung des Energiebedarfs (Elektroenergie)

■ Verteilung des Energiebedarfes nach Funktionseinheiten

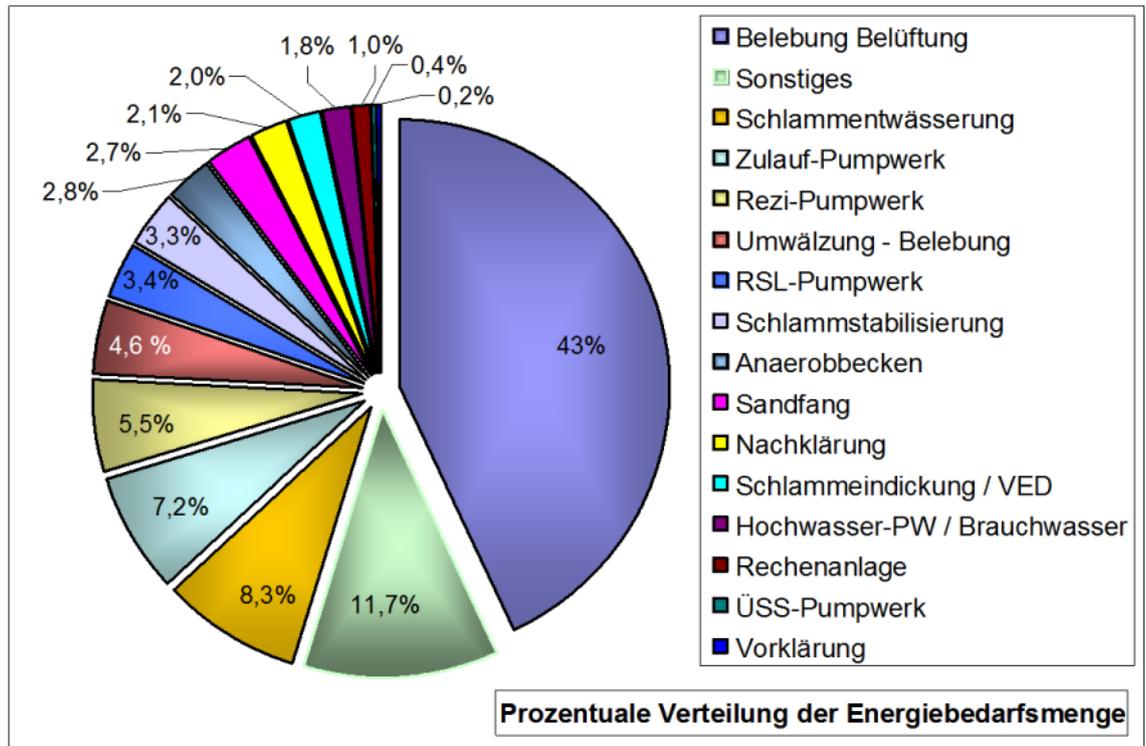
Die Verteilung des Energiebedarfes und Funktionseinheiten der Anlage in 2014 zeigt nachstehende Grafik.



○ Rangfolge der Funktionseinheiten und Bedarfsanteile

Rang	Anlage	Gruppe	Funktionseinheit 2014	Funktionseinheit 2015
1	Belebungsbereich		61,9 %	61,0 %
2	Schlammbehandlung		15,7 %	14,0 %
3	Einlaufgruppe / Mechanik		12,1 %	12,1 %
4	Sonstiges		7,7 %	10,2 %
5	Hochwasser-PW / Brauchwasser		1,6 %	1,7 %
6	Mischwasserbehandlung		1,0 %	1,0 %

■ **Verteilung des Energiebedarfes nach Verbrauchsschwerpunkten (-gruppen)**

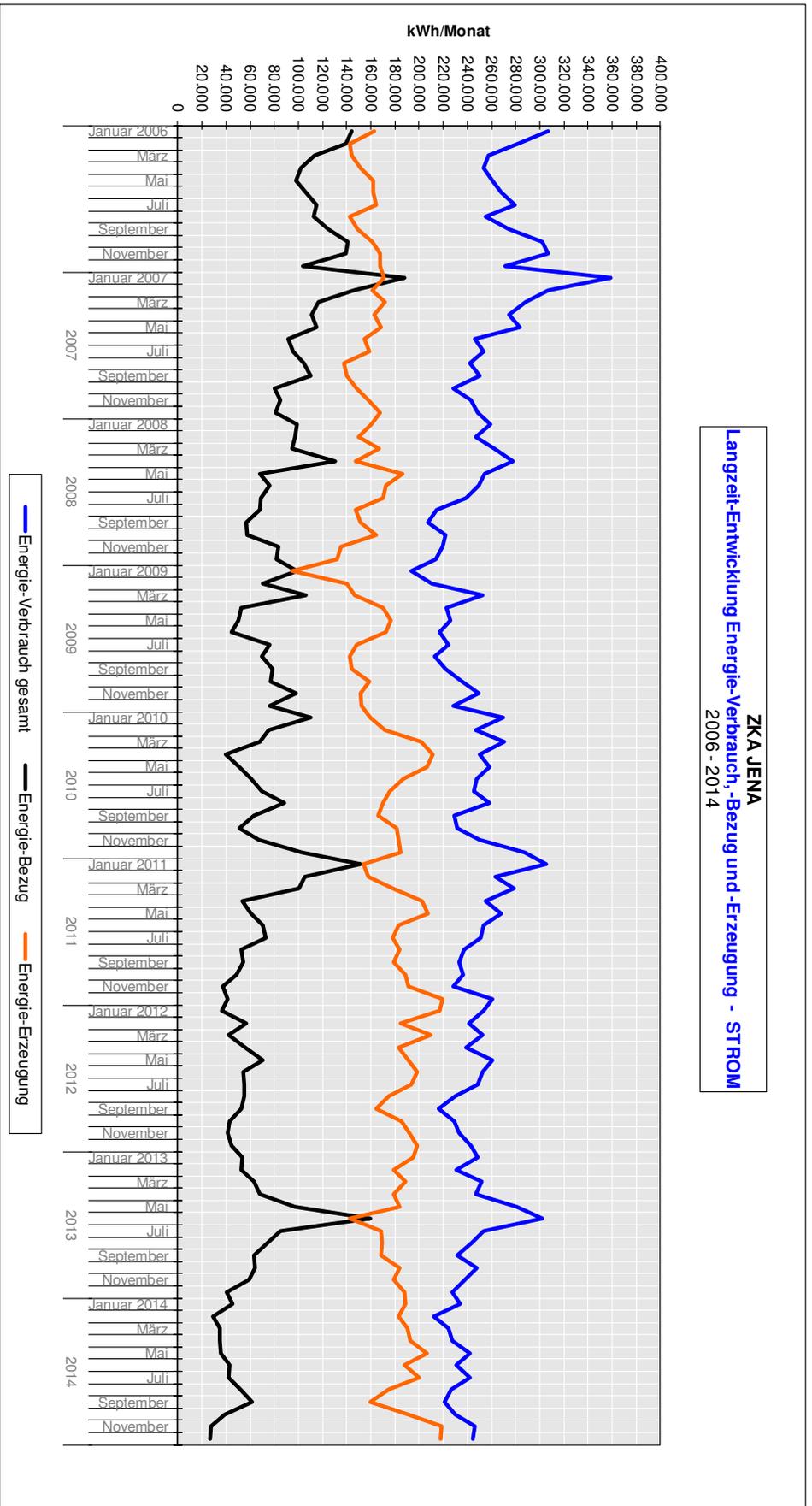


○ Rangfolge der Verbrauchsgruppen	2014
1. Belüftung Belebungs	43,0 %
2. Sonstiges	11,7 %
3. Schlammwässerung	8,3 %
4. Zulauf-Pumpwerk	7,2 %
5. Rezi-Pumpwerk	5,5 %
6. Umwälzung Belebungs	4,6 %
7. RLS-Pumpwerk	3,4 %
8. Schlammstabilisierung	3,3 %
9. Anaerobbecken	2,8 %
10. Sandfang	2,7 %
11. Nachklärung	2,1 %
12. Schlammthickung	2,0 %
13. Hochwasser-PW / Brauchwasser	1,8 %
14. Rechenanlage	1,0 %
15. ÜSS-Pumpwerk	0,4 %
16. Vorklärung	0,2 %

3.3 Jahresganglinie Langzeitentwicklung Strom / Verbrauch – Eigenerzeugung - Bezug

Die Darstellung einer Langzeit-Entwicklung der Parameter zeigt nachstehende Grafik.

ZKA JENA
Langzeit-Entwicklung Energie-Verbrauch, -Bezug und -Erzeugung - STROM
2006 - 2014



3.4 Energie- und CO₂-Bilanz

Die Energie- und CO₂-Bilanz der Anlage ist im Anlagenteil des Berichtes dokumentiert.

3.5 Kennwertvergleich zur Bewertung des Energieverbrauches - Schwachstellenanalyse

3.5.1 ENERGIEEFFIZIENZ projekt- und vergleichsrelevanter Funktionseinheiten

Die Entwicklung der spezifischen Energiebedarfszahlen 2014/15 der projekt- und vergleichsrelevanten Hauptverbraucher wird nachstehend verglichen und den üblichen und optimalen Kennwerten vergleichbarer Anlagen nach DWA-A 216 (Entwurf) gegenübergestellt.

projekt- / vergleichsrelevante

Auszug Energie-Bilanz STROM-Verbrauch 2014-2015

Funktionseinheiten

Datenquelle Last:

Betriebsdatenauswertung 2014/15

Datenquelle Energieverbrauch:

Unterzähler

	Funktionseinheit	Energie- verbrauch kWh/a	Energie- verbrauch kWh/a	CO2-Emission t _{CO2equi/a}	Bemerkungen
		2014	2015	2015	Datenquelle
		vor Umbau	nach Umbau		Strom-Unterzähler (UZä)
	Anschlusswert EW_{CSB}				Betriebsdatenauswertung 2014/15 - Last
	Zulauf KA	154.700	149.500		
	Biologie	79.206	76.544		nach Vorklärung
	Schlammweg	154.700	149.500		
2	Biologische Reinigung				
	Biologie Belüftung, nur Turbos	1.093.497	1.156.815	764,7	UZä Turbo's zzgl. Gebläse 3 + 4
3	Schlammbehandlung	583.379	538.304	355,8	
	VKB/PrimärSchlamm-PW/BioP	172.766	166.374	110,0	UZä abzgl. VKB u. Rührwerke BioP
	Schlammbehandlung/Faulung	410.613	371.930	245,8	
	Stromverbrauch KA gesamt	2.781.914	2.906.847	1.921,4	Summe Zählerwerte Strom-Bezug und Eigenerzeugung
	davon Strombezug / Emission KA gesamt	470.221	148.417	98,1	Zählerwert Strom-Bezug

Jahres-Vergleich
Energie-Verbrauch STROM 2014-2015

projekt- / vergleichsrelevante

Funktionseinheiten

Datenquelle Last: Betriebsdatenauswertung 2014/15
Datenquelle Energieverbrauch: Unterzähler

Funktionseinheit	Spezif. Energieverbrauch kWh/EW	Spezif. Energieverbrauch kWh/EW	Veränderung Spez. Energieverbrauch %	Bemerkungen	Vergleichswert DWA-A 216 kWh/EW
	2014	2015	2014/15		
	vor Umbau	nach Umbau		Datenquelle	
Anschlusswert EW_{CSB}				Betriebsdatenauswertung	
Zulauf KA	154.700	149.500			
Biologie	79.206	76.544		nach Vorklärung	
Schlammweg	154.700	149.500			
Biologische Reinigung					10%-Perzentil
Biologie Belüftung (Turbo's) - e _{Bel}	13,8	15,1	9,5	Erhöhung	10,0
					111 Kläranlagen
Schlammbehandlung	3,8	3,6	-4,5	Reduzierung	
VKB/PrimärSchlamm-PW/BioP	1,1	1,1	-0,4		
Schlammbehandlung/Faulung	2,7	2,5	-6,3	Reduzierung	
Spezif. Stromverbrauch KA gesamt incl. Externe	18,0	19,4	8,1	Bezugsbasis: Summe Zählerwerte Strom-Bezug und Eigenerzeugung	20,0 132 Kläranlagen

Legende:
e_{Bel} - spezif. Stromverbrauch

3.5.2 ENERGIEGEWINNUNG (Schlammbehandlungsanlage)

Die Ergebnisse zur Ermittlung der Kennziffern der Energiegewinnung sind auf der Folgeseite zusammengestellt.

Signifikante Ergebnisse des Kennwertvergleichs

der Zeiträume vor und nach Realisierung der UIP-Maßnahme zur Verbesserung der Energiegewinnung sind die

- Steigerung der Faulgasproduktion von 15,9 auf 23,0 l/(EW x d)
- Erhöhung des Grades der Faulgasumwandlung in Strom von 33 % auf 40%
- Steigerung des Eigenversorgungsgrades der KA gesamt auf bis 99 %
(incl. externer Verbrauch)

Kennwertübersicht Energie - Energetische Bewertung

Energie-CHECK

ZKA Jena

Bezeichnung Kennzahl		ME	Istwert	Istwert	Istwert	Zielwert	Bewertung / Bemerkungen
			Mittelwert	Mittelwert	Bereich	UBA	
			2014	2015	2015		
e _{ges}	Spezif. Gesamt-Elektrizitätsverbrauch	kWh/(EW*a)	18,0	19,4		18 + 1* = 19	Effizienz auf Zielwert-Niveau ! *Zuschlag 1,0 für Zulauftiefe
e _{Bel}	Spezif. Elektrizitätsverbrauch Belüftung Belebung	kWh/(EW*a)	15,0	16,3		10	- Gesamtverbrauch Belüftung - Belastung: CSB-Last 76.544 EW im Ablauf VKB
Energie-Gewinnung			2007-2011	nach Umbau			
e _{FG,1}	spez. Faulgasproduktion	l/(EW*d)	15,9	23		bis 30	ohne Co-Vergärung
e _{FG,2}	spez. Faulgasproduktion pro TR	l/kg oTR		590	384... 915	475	signifikantes Übertreffen Zielwert ! GV im Faulschlamm i.M.60%
e _{FG,3}	spez. Faulgasproduktion pro CSB Roh	m³/kg	0,142	0,177			Steigerung um 25% (ggü. 2012)
N ₁	Grad der gesamten Faulgasnutzung	%		93		99	Verbrauch BHKW 1.159.053 < Faulgasprod. 1.248.312 (Messdaten)
N _{FG}	Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität	%	33	40	38 ... 41	36...39 bei P=101-250 kW _{el}	Effizienz auf Zielwert-Niveau !
E _{kW_{el}}	Eigenerzeugung Strom	kWh/(EW*a)		18,5		Maximum 21,7 (GK 4) 25,0 (GK 5)	Zielwerte = max. mögl. Eigenerzeugung bei eta= 33% (GK 4) bzw. eta= 38% (GK 5)
V _E	Eigenversorgungsgrad-Elektrizität KA incl. mitversorgte externe Stromverbraucher	%		95%	95 ... 99	100	Bezugsbasis: Gesamtverbrauch KA incl. angeschloss Externe Verbraucher
V _w	Eigenversorgungsgrad-Wärme	%	100	100		99	
e _{ext}	Externer Wärme-Bezug	kWh _{th} /(EW*a)	0,0	0,0		0	

Legende: Optimalbereich Optimierungschance

4 Entwicklung Energie-Performance vergleichs- und zielrelevanter Anlagengruppen - Trend- und Potenzialanalyse 2013 - 2015

4.1 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch

Zur Feststellung der Ursachen für ein hohes Niveau des Strombedarfes sind schwerpunktmäßig einzubeziehen:

- Topografie des Standortes
- Reinigungsanforderungen
- Betriebswert der Sauerstoffkonzentration
- Art der Belüftungsregelung
- Belüftungstechnologie
- Schlammalter und Schlammbelastung
- Schlammanfall und Schlammabzug
- Bemessungswerte und tatsächliche Belastungswerte der Anlagengruppen
- Bemessungswerte und tatsächliche Belastungswerte von Einzelaggregaten
- Anlagenzustand (Verschleiß)
- Industrierwasseranteil

Zur Feststellung der Ursachen einer evtl. Trendentwicklung des Strombezuges sind schwerpunktmäßig einzubeziehen:

- Betriebsweise und Laufzeitanalyse der Hauptaggregate
- Lastentwicklung (Zulaufast und Zulaufmenge)
- Reinigungsziel und tatsächliche Ablaufwerte
- Anlagenzustand (mechanischer und hydraulischer Verschleiß)
- Sondereinflüsse

4.2 Stromverbrauch Belüftung

Die mittelfristige Entwicklung des Stromverbrauches der vergleichs- und zielrelevanten Funktionseinheiten wurde für die Jahre 2013 bis 2015 ermittelt und in den nachfolgenden Grafiken visualisiert.

Die Entwicklung wurde auf der Grundlage der Messdaten des Strom-Unterzählers für die Turbo-Gebläse untersucht. Diese Aggregate repräsentieren ca. 96 % des Energieverbrauches für die Belüftung.

4.3 Stromverbrauch Schlammbehandlung

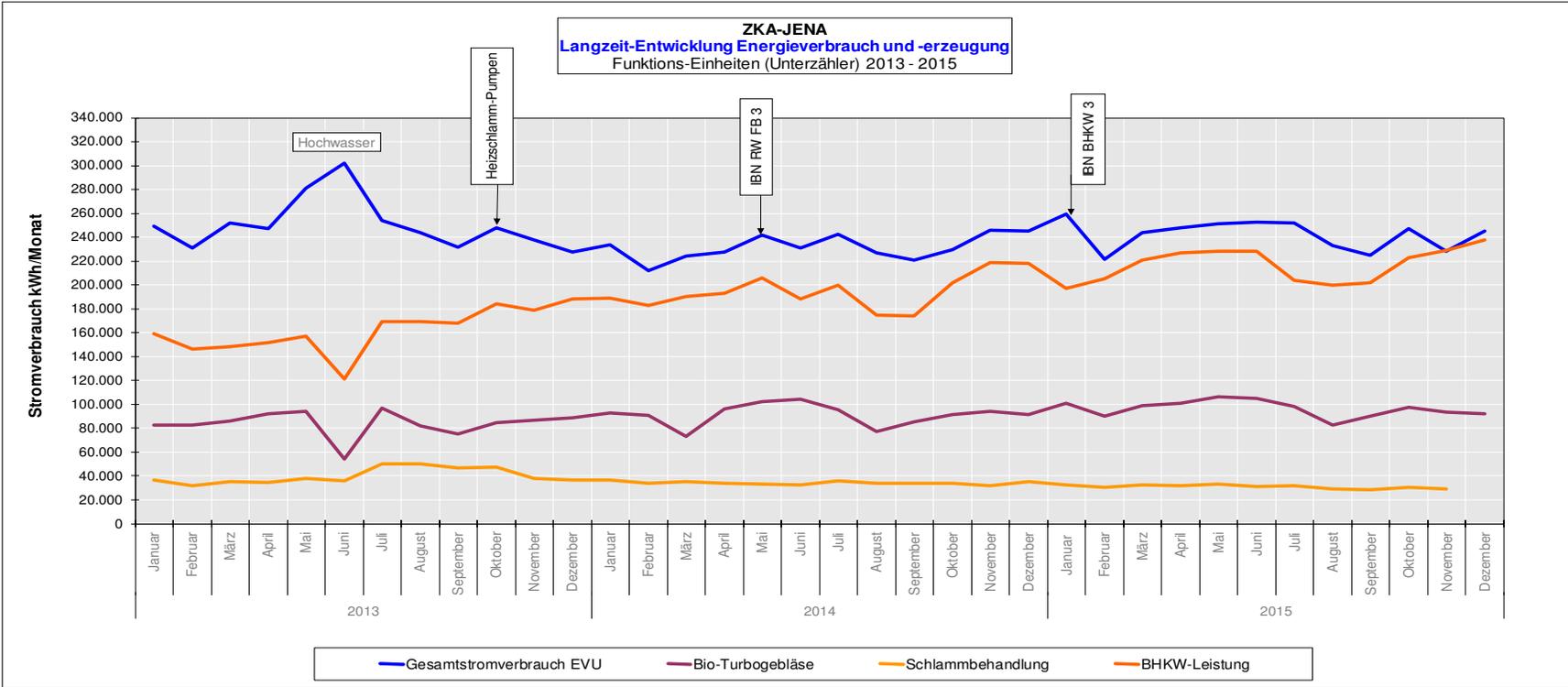
Die Langzeitentwicklung wurde auf der Grundlage der Messdaten des Strom-Unterzählers der Funktionseinheit Schlammbehandlung untersucht.

4.4 Spezifischer Stromverbrauch Gesamtanlage

Die Langzeitentwicklung des spezifischen Energieverbrauches der Gesamtanlage (Basis: BSB5) ist im Anschluss dargestellt.

→ Fallender Trend bis 16 kWh / (EW_{BSB} x a) !

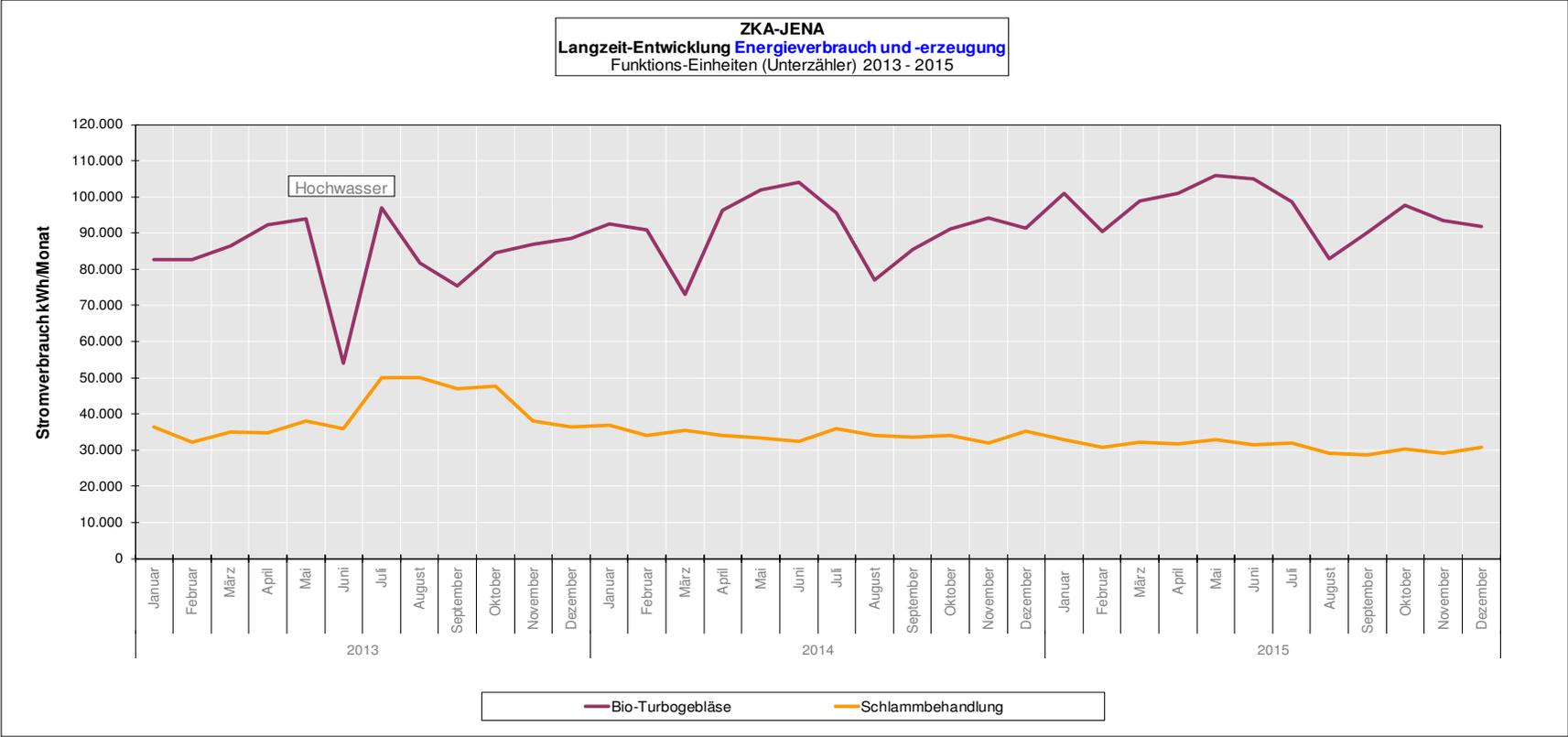
Langzeit-Entwicklung Jahre 2013 - 2015



➡ **Bewertung Trendverhalten des Energie-Verbrauches:**

Kriterium	Wertung - Gesamt-Stromverbrauch		
Niveau:	hoch		
Trend:	schwankend		
Schwankungsbreite:	46.820 kWh/Mon. ohne Ausreißer	entsprechend	18 % ggü. Min.
Jahreszeitl. Abhängigkeit:	ja		

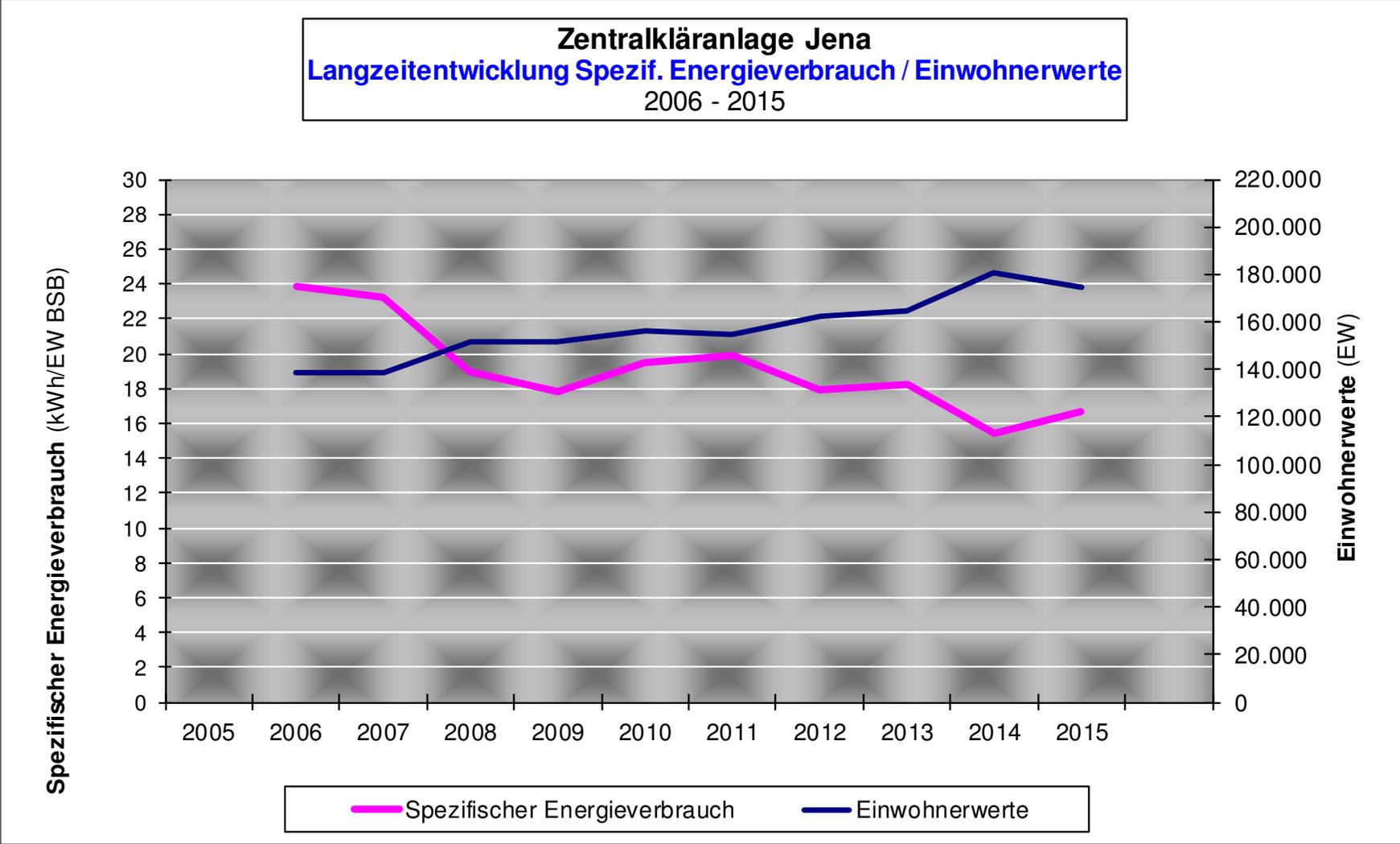
Kriterium	Wertung - BHKW-Eigenerzeugung		
Niveau:	hoch		
Trend:	steigend		
Zunahme:	65.139 kWh/Mon. ohne Ausreißer	entsprechend	37 % ggü. Min.
Jahreszeitl. Abhängigkeit:	ja		



➡ **Bewertung Trendverhalten des Energie-Verbrauches:**

Kriterium	Wertung - Turbo-Gebläse		
Niveau:	hoch		
Trend:	leicht steigend		
Schwankungsbreite:	32.909 kWh/Mon. entsprechend ohne Ausreißer	31 %	ggü. Min.
Jahreszeitl. Abhängigkeit:	ja		

Kriterium	Wertung - Schlammbehandlung		
Niveau:	mittel		
Trend:	leicht fallend		
Reduzierung:	9.444 kWh/Mon. entsprechend	25 %	ggü. Min.
Jahreszeitl. Abhängigkeit:	keine Abhängigkeit erkennbar		



4.5 Energetische Schwachstellen der Anlage

Als energetische Schwachstellen der Kläranlage sind schwerpunktmäßig nachfolgende Verbrauchsgruppen / Anlagen festzustellen bzw. zu überprüfen

- Belüftung Belebung
- Handlungsgrundlagen Energie-Management

4.6 Maßnahme mit weiterem Untersuchungsbedarf

- Messprogramm Energieverbrauch der Hauptaggregate

5 Jahres-Vergleich Energieverbrauch und –performance

5.1 Gesamtanlage 2010 – 2015

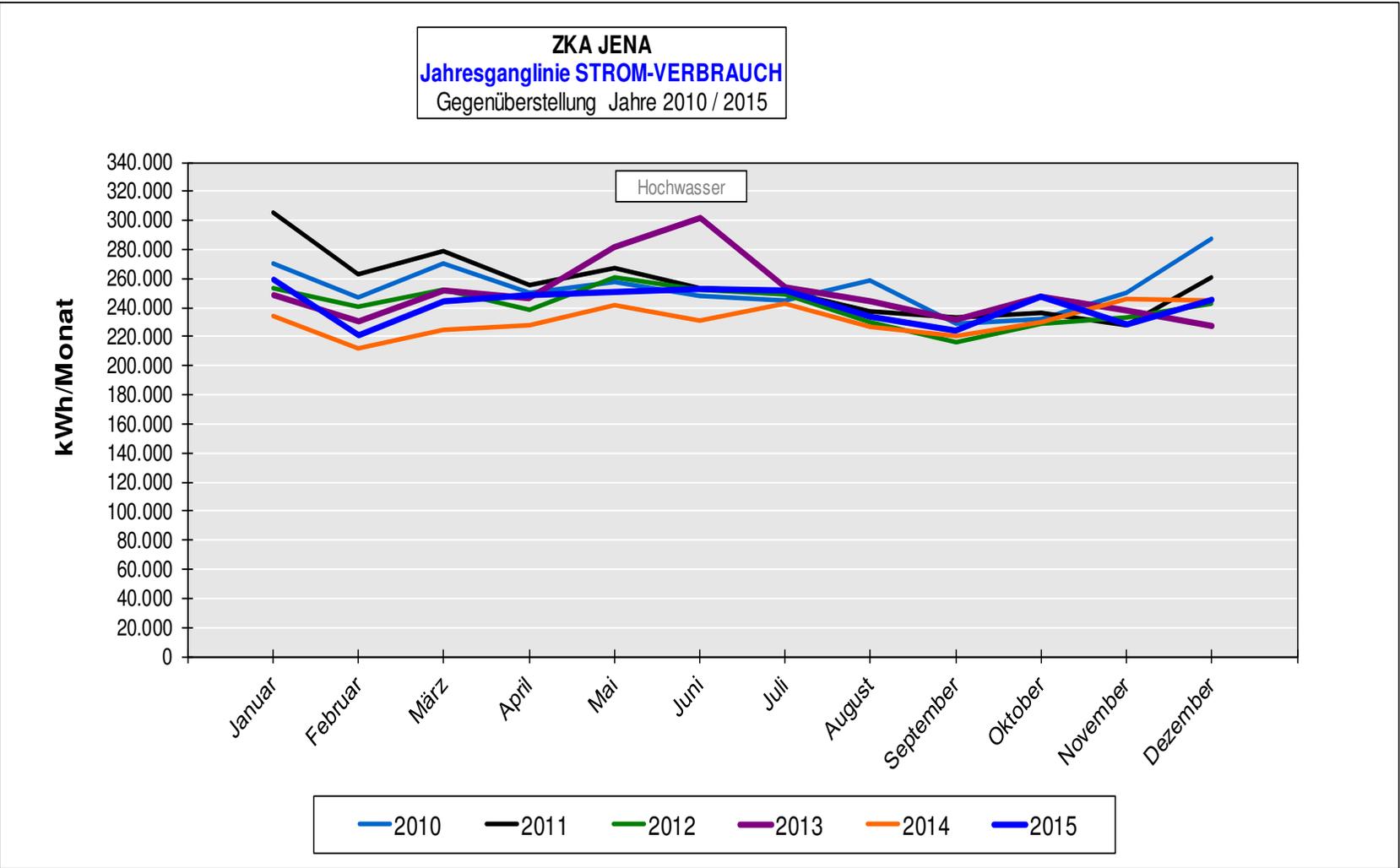
Eine Gegenüberstellung der Stromverbräuche der Jahre 2010 – 15 zeigt die nachfolgende Grafik

➤ Erkenntnisse

- Reproduzierbares Gangverhalten
- vergleichbares Verbrauchsniveau
ausgenommen 1. Halbjahr 2014
(niedrigerer Level / Minderverbrauch bzw. Optimierungs-Potenzial
ca. 20.000 kWh / Mon. x 6 Monate = 120.000 kWh)

⇒ Auswahl der Jahre 2014 und 2015 für einen repräsentativen Jahres-Vergleich zur Bewertung der Wirkung der Optimierungs-Maßnahme

Gegenüberstellung Jahre 2010 - 2015

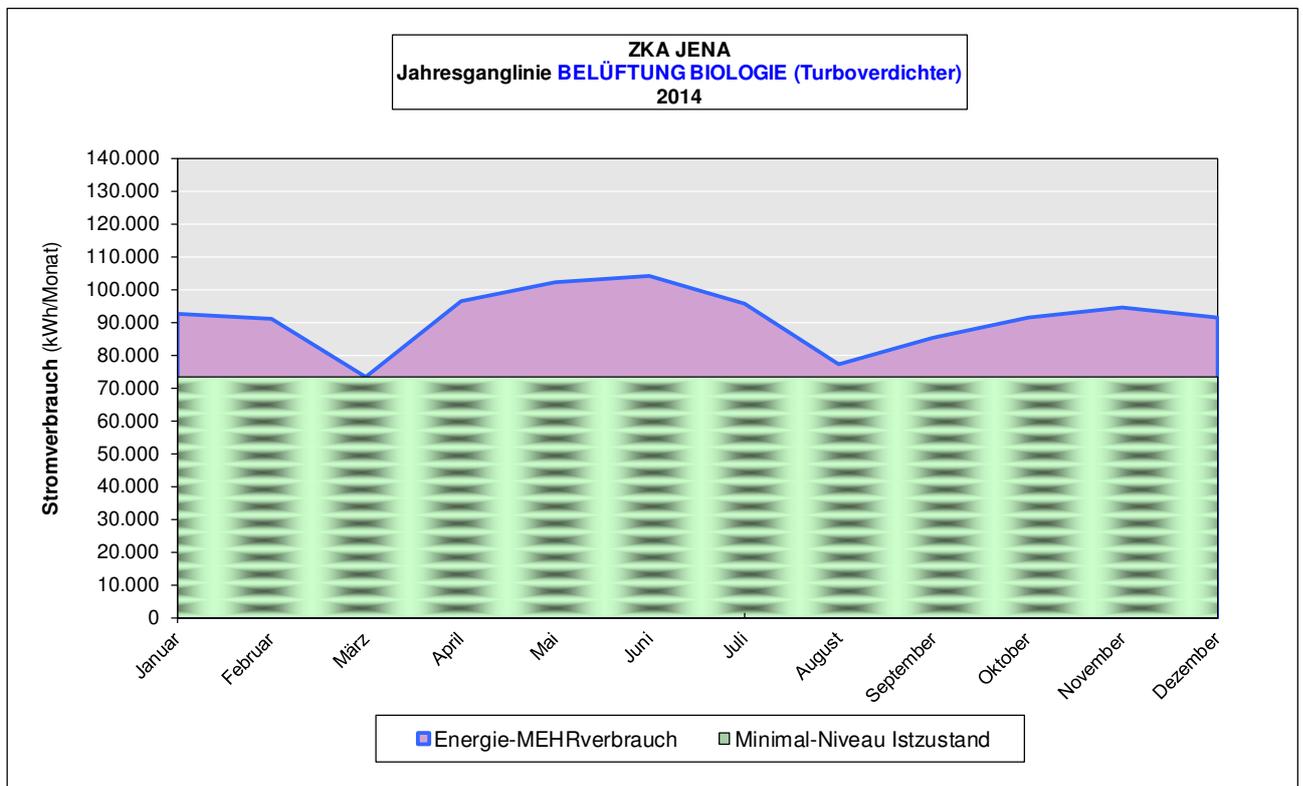
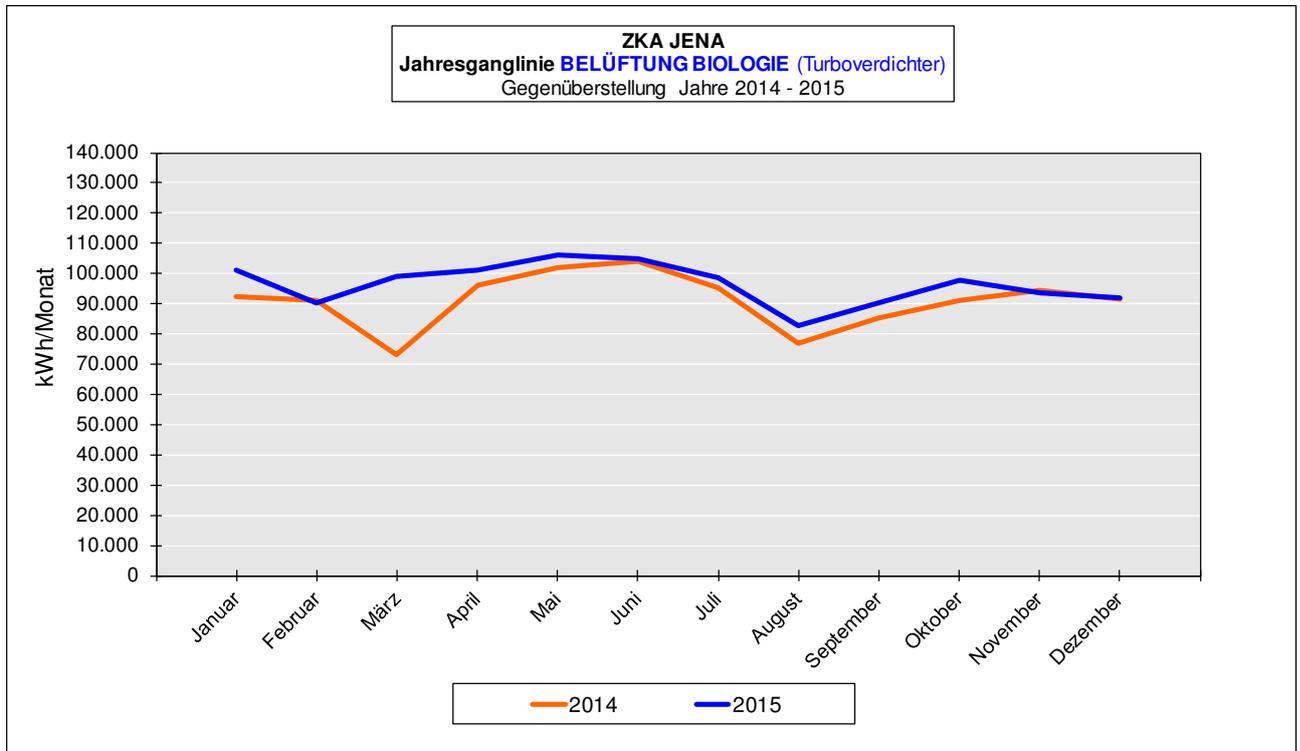


5.2 Stromverbrauch Belüftung

- Erkenntnisse
 - Stromverbrauch der Belüftung in 2015 nach der Maßnahme größer als 2014
 - Überlagerung Einflüsse
 - Prüfen Optimierungspotenzial

 - Ausgeprägter Jahresgang → Optimierungs-Potenzial prüfen

Gegenüberstellung Jahre 2014 - 2015



Jahres-Minimum - wurde unter den Bedingungen im Istzustand bereits erreicht !

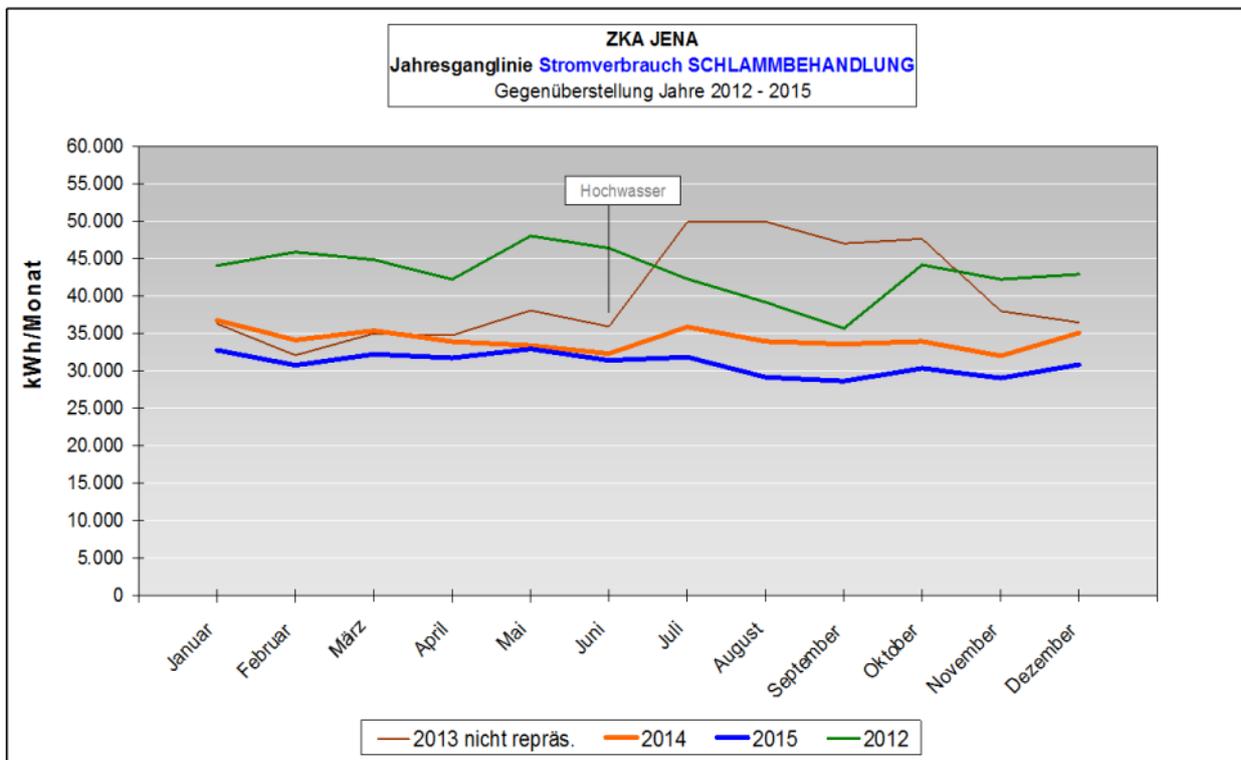
5.3 Stromverbrauch Schlammbehandlung

➤ Erkenntnisse

- Reduzierung Stromverbrauch nach Realisierung der
1. Teilmaßnahme – Erneuerung Heizschlamm-Pumpen
- Ersparnis ist größer als Mehrverbrauch durch Umwälzung des 3. Faulbehälters
- Das Saldo der Ersparnis
für die Funktionseinheit Schlammbehandlung durch die Maßnahme beträgt
überschlägig mindestens $5.000 \text{ kWh/Monat} \times 12 \text{ Monate} = \text{rd. } 60.000 \text{ kWh / a}$

Anmerkung: Infolge großer Schwankungen des Stromverbrauches mit unbekannter Ursache in den Vorjahren ist eine exakte Ermittlung unmöglich.

Gegenüberstellung Jahre 2012 - 2015



5.4 Eigenerzeugung Strom- und Eigenversorgungsgrad

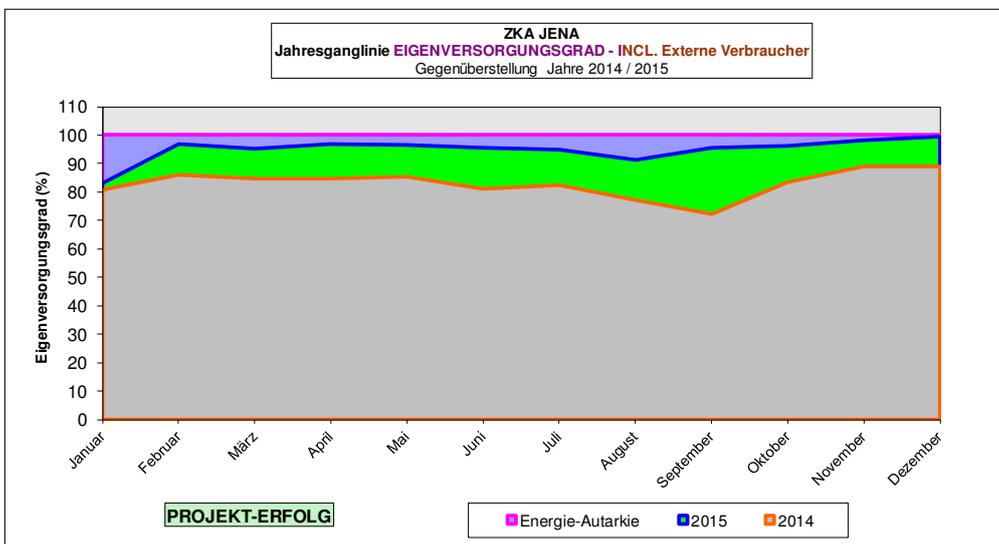
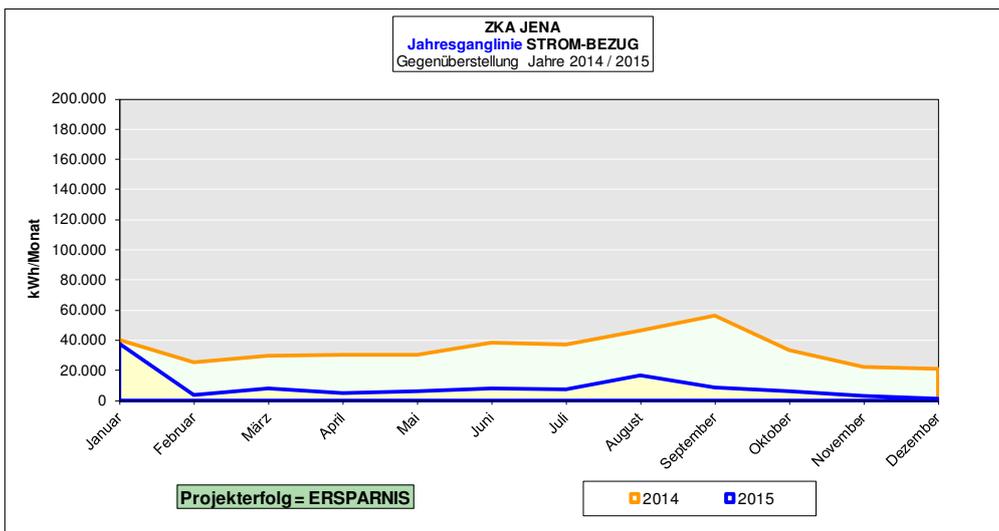
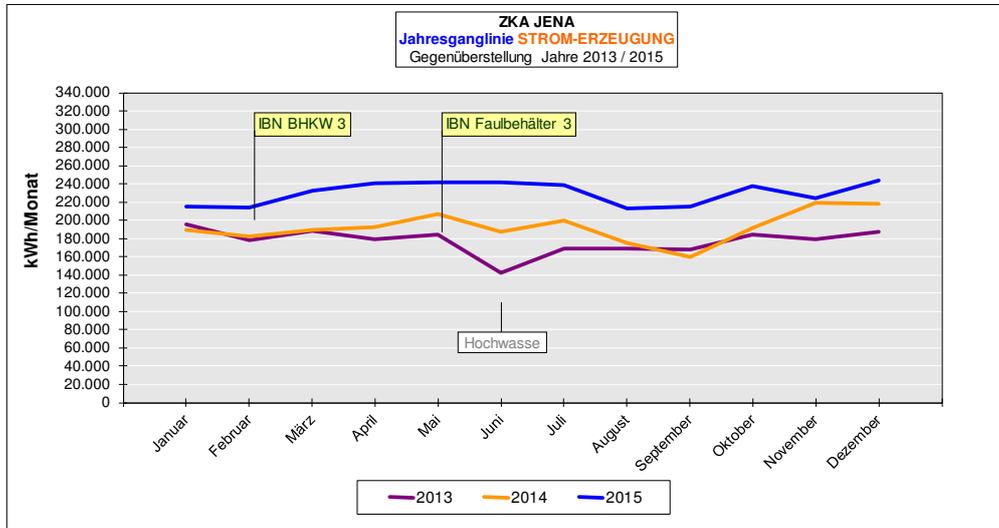
Die Entwicklung der vergleichsrelevanten Parameter

- Eigenerzeugung Strom
 - Strom-Bezug
- und
- Eigenversorgungsgrad

zeigen nachfolgende Grafiken.

Sie dokumentieren bildhaft den Projekterfolg der Maßnahme „Energieautarke ZKA Jena“.

Gegenüberstellung Jahre 2014 - 2015



6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des vorliegenden Energie-Check's (Grobanalyse) lassen sich im Vergleich des Jahres 2015 (Kalenderjahr) gegenüber den zurückliegenden Bezugszeiträumen Projekterfolg der UIP-Maßnahme schwerpunktmäßig wie folgt zusammenfassen:

Projekterfolg der UIP-Maßnahme

1. Steigerung der spezifischen Gasproduktion (UIP-Maßnahme) um 34%
2. Steigerung der Gasverwertung (UIP-Maßnahme) auf 40 %
3. Anstieg des Eigenversorgungsgrades STROM auf bis zu 99 %
(KA incl. ext. Verbraucher)
4. Energieverbrauch STROM
 - Energie-Effizienz der Anlage auf Zielwert-Niveau
 - Senkung spezif. Energieverbrauch Schlammbehandlungsanlage /
Faulung um 6,3 %
(rd. 26.000 kWh/a)

Verbleibende Optimierungs-Potenziale

bzw. ein entsprechender Überprüfungsbedarf konnten aus nachstehenden Untersuchungsergebnissen abgeleitet werden:

- **Gesamtanlage**
 - Anstieg spezifischer Energieverbrauch – Gesamtanlage 2014/15
- **Belüftung Biologie**
 - Spezifischer Energieverbrauch der Belüftung Belebung überschreitet Zielwert
 - Trendanstieg Energieverbrauch Turbogebläse um 19 % in 3 Jahren trotz Lastrückgang → Mehrverbrauch rd. 210.00 kWh in 3 Jahren
 - große Schwankungsbreite Energieverbrauch Belüftung
 - ausgeprägter Jahresgang des Stromverbrauches Belüftung Biologie mit signifikanten Saisonalenminima
(Lastrückgang in Ferienzeiten / 23.000 Studenten + Urlauber)
 - komplexe Abhängigkeit des Stromverbrauches Belüftung von mehreren Einflussparametern

7 **Schrifttumsverzeichnis**

1. Haberkern, Dr. Maier, Schneider; Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen, Forschungsbericht des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 11/2006
2. DWA – Arbeitsblatt A 216 (Entwurf) „Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Kläranlagen“
3. DWA – Deutsche Vereinigung Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (1996); ATV-Handbuch Klärschlamm, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 4. Auflage

8 **Anlagenverzeichnis**

1. Betriebs- und Energiedaten - Auszug
2. Energieverbrauchermatrix / Aggregatliste - Auszug
3. Energie-Bilanz Funktionseinheiten

Anlagen

Verbrauchermatrix - Aggregatliste - AUSZUG										Anlage 2		
Bauwerksnummer	Aggregat / Betriebsmittel	Laufende Nummer	Lfd. Nr. / Medium	Bezeichnung	Kennziffer	Nennspannung	Nennleistung 1	Nennleistung 2	Nennstrom 1	Nennstrom 2	Drehzahl max	FU Betrieb
				Beschilderung	1. Aggregat 2. Antrieb 3. Meßstelle	V	kW	kW	A	A	min ⁻¹	
				Angaben in R & I								
01	KT	01	AA	Grobrechen	1							nein
01	NM	00	01	Hubantrieb	2	400	1,500					nein
01	NM	00	02	Schwenkantrieb	2	400	0,750					nein
04	KF	01	AC	Förderschnecke	1							
04	NM	00	01	Schneckenantrieb	2	400	37,000		67,0			ja
04	KF	02	AC	Förderschnecke	1							
04	NM	00	03	Schneckenantrieb	2	400	37,000		67,0			ja
04	KF	03	AC	Förderschnecke	1							
04	NM	00	05	Schneckenantrieb	2	400	37,000		67,0			ja
05	KT	01	AC	Filterrechen 1	1							
05	NM	00	01	Bürstenantrieb	2	230 / 400	1,500		3,5			nein
05	NM	00	02	Kettenantrieb	2	230 / 400	0,750		2,4			nein
05	NM	00	03	Walzeantrieb	2	230 / 400	0,250		0,7			nein
05	KT	02	AC	Filterrechen 2	1							
05	NM	00	05	Bürstenantrieb	2	230 / 400	1,500		3,5			nein
05	NM	00	06	Kettenantrieb	2	230 / 400	0,750		2,4			nein
05	NM	00	07	Walzeantrieb	2	230 / 400	0,250		0,7			nein
05	KT	03	AC	Filterrechen 3	1							
05	NM	00		Bürstenantrieb	2	230 / 400	1,500		3,5			nein
05	NM	00		Kettenantrieb	2	230 / 400	0,750		2,4			nein
05	NM	00		Walzeantrieb	2	230 / 400	0,250		0,7			nein
05	KK	01	FA	Rechengutwaschpresse	1							
05	NM	00	09	Antrieb	2	230 / 400	2,500		5,3			nein
05	KT	03	AC	Stabrechen	1							
05	KT	01	PA	Fäkalannahmestation	1							
05	NM	00	11	Antrieb	2	230 / 400	3,600		7,4			nein
05	NM	00	12	Fördererantrieb	2	230 / 400	0,250		0,7			nein
05	MZ	01	PA	Fäkalschlammumpfen	1							
05	NM	00	14	Antrieb	2	400	1,300		3,4			nein
05	MY	01	PA	Fäkalschlammumpfen	1						200	
05	NM	00	17	Antrieb	2	230 / 400	2,200				250	nein
05	MY	02	PA	Fäkalschlammumpfen	1						200	

Anlage 3

ENERGIE-CHECK

Energie-Bilanz STROM-Verbrauch 2014-2015

Funktionseinheiten

Datenquelle Last: Betriebsdatenauswertung 2014/15
Datenquelle Energieverbrauch: Unterzähler

	Funktionseinheit	Energie- verbrauch 2014 kWh/a vor Umbau	Energie- verbrauch 2015 kWh/a nach Umbau	CO2-Emission tCO ₂ equi/a 2015 Rechenwert	Bemerkungen Datenquelle
	Anschlusswert EW_{CSB}			fiktive Hochrechnung	Strom-Unterzähler (UZä) Betriebsdatenauswertung 2014/15 - Last
	Zulauf KA	154.700	149.500		
	Biologie	79.206	76.544		nach Vorklärung
	Schlammweg	154.700	149.500		
1	Mechanische Reinigung	325.963	331.295	219,0	UZä zzgl. Vorklärung
2	Biologische Reinigung	1.576.549	1.646.470		
	Biologie Belüftung, nur Turbos	1.093.497	1.156.815	764,7	UZä Turbo's zzgl. Gebläse 3 + 4
	Biologie, incl. Gebläse 3/4	483.052	489.655	323,7	UZä abzgl. Gebläse 3 + 4, zzgl. Rührwerke BioP
3	Schlammbehandlung	583.379	538.304	355,8	
	VKB/PrimärSchlamm-PW/BioP	172.766	166.374	110,0	UZä abzgl. VKB u. Rührwerke BioP
	Schlammbehandlung/Faulung	410.613	371.930	245,8	
4	Sonstiges	<i>Annahme wie 2015</i>			
4.1	Betriebsgebäude	41.543	41.543	27,5	Unterzähler ab 2015
SUMME	KA-technologietypische Unterzähler	2.527.434	2.557.612	1.690,6	
4.2	Hochwasser-PW	43.952	48.937	32,3	
4.3	Mischwasser-PW	10.507	7.081	4,7	
4.4	Kleinverbraucher KA, Infrastruktur, Frostschutz				nur v. Gesamtzähler erfasst
4.5	Externe Sonstige				nur v. Gesamtzähler erfasst, ohne eigenen Unterzähler
	RÜB / Mischwasser-Pumpen P2+P3				nicht im Unterzähler Mischwasser- PW erfasst
	Antennenmast				
	2 externe Abwasser-PW				
	1 externe Trinkwasser-PW				
	Summe Stromverbrauch / Emission Unterzähler	2.581.893	2.613.630	1.727,6 Rechenwert	Strom-Unterzähler
	Stromverbrauch KA gesamt	2.781.914	2.906.847	1.921,4 tatsächlich	Summe Zählerwerte Strom-Bezug und Eigenerzeugung
	davon Strombezug / Emission KA gesamt	470.221	148.417	98,1	Zählerwert Strom-Bezug
	Bilanz	-200.021 -7,7%	-293.217 -11,2%		Differenz Verbrauchsermittlung Unterzähler zu Strombezug von Unterzählern nicht erfasst (--> Verbrauch Pos. 4.4 + 4.5)

Energieautarke Zentralkläranlage Jena



Energie – Analyse

vergleichs- und zielrelevanter Systemkomponenten

Gera, Juni 2016



Rudolstädter Straße 39
07745 Jena



Franz-Petrich-Straße 28
07545 Gera

ENERGIE
Effizient
IHR NUTZEN

Inhaltsübersicht

1	Ausgangssituation und Zielstellung
1.1	Veranlassung
1.2	Aktuelle Anlagensituation
1.2.1	Datenmaterial und Auswertzeitraum
1.2.2	Anschlusswert und Kurzbeschreibung der Anlage
1.2.3	Energierrelevante Anlagengruppen
1.2.4	Langzeit- und aktuelle Trendentwicklung
1.3	Untersuchungsrahmen und Zielstellung
2	Vorgehensweise und Untersuchungsmethodik
3	Grundlagenermittlung und Präzisierung Energie-Check
3.1	Grundlagenermittlung
3.2	Präzisierung Energie-Check
3.2.1	Verteilung Energieverbrauch und Energie-Bilanz
3.2.2	Energetische Bewertung der Umbaumaßnahmen und des Istzustandes 2015
4	Konzeptplanung - Maßnahmen zur Steigerung der Energie-Effizienz
5	Konzeption zur Steigerung der Energie-Effizienz und Emissionsenkung
5.1	Maßnahmekatalog mit Einspar- und Minderungspotenzialen
5.2	Maßnahmen mit weiterem Untersuchungsbedarf
5.3	Einstufung der Maßnahmen in Prioritätskategorien
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zur weiteren Vorgehensweise
7	Schriftumsverzeichnis
8	Verzeichnis Tabellen – Abbildungen - Diagramme

Energie-Analyse zu Verbrauch und Reduzierung von Elektroenergie sowie Senkung der CO₂-Emissionen

1 Ausgangssituation und Zielstellung

1.1 Veranlassung

Der Energieverbrauch von Kläranlagen ist ein beträchtlicher Emissions- und Kostenfaktor. Dies gilt insbesondere in Zeiten steigender Energiepreise.

Im Bezugsjahr 2014 waren nachstehende Parametergrößen (Strom) zu verzeichnen:

Die ZKA Jena - Auf einen Blick

ENERGIE	2014	KLIMA
2.781.914	Stromverbrauch	
davon 470.221	Strombezug	310,81
kWh/a		t CO _{2equi} /a

Anmerkung: Gesamt-Stromverbrauch - Strombezug = Eigenproduktion

In der 1.Stufe der Erarbeitung wurde ein Energie-Check (Grobanalyse) der Anlage vorgenommen.

Deren Ergebnisse umfassten schwerpunktmäßig:

- Ermittlung und Quantifizierung des Energiebedarfes nach technologischen Funktionseinheiten der Kläranlage
- Vergleich der Verbrauchswerte der Funktionseinheiten mit anerkannten spezifischen Kennzahlen und Richtwerten für Kläranlagen
- Identifizierung von Schwachstellen
- technische und wirtschaftliche Ermittlung und Benennung von Energieeinsparpotentialen durch Betriebs- und Anlagenoptimierung

Gegenstand der vorliegenden Energie-Analyse (Feinanalyse) sind weiterführende tiefergehende Untersuchungen zur Ermittlung und Nachweis der Optimierungseffekte der Maßnahme „Energieautarke ZKA Jena“ sowie die maßnahmenkonkrete Erschließung weiterer verbleibender Kosteneinsparpotentiale.

1.2 Aktuelle Anlagensituation

1.2.1 Datenmaterial und Auswertezeitraum

Für die Erstellung dieser Feinanalyse standen zur Verfügung und wurden ausgewertet:

- Betriebsdaten 2014 / 15
- Anlagen- und Maschinenkartei
- Energie-Messdaten 2014 / 15

Die Auswertungszeitraum umfasste schwerpunktmäßig das Kalender-Jahr 2015.

1.2.2 Anschlusswert und Kurzbeschreibung der Anlage

Die Ausbaugröße und Belastungswert der Anlage betragen 210.000 bzw. rd. 155.000 / 150.000 (50% Perzentil 2014/15) Einwohnerwerte (CSB).

Die Verfahrenstechnologie der Kläranlage umfasst schwerpunktmäßig die technologischen Stufen:

Verfahrenstechnologie umfasst schwerpunktmäßig die technologischen Stufen:

- Regenüberlaufbecken
- Zulauf-Pumpwerk
- Rechenanlage
- Belüfteter Sand- und Fettfang
- Vorklärung
- Belebungsanlage (2 Straßen mit je 2 Kaskaden)
Biologisch-Chemische Phosphor – Elimination (Teilstrom – Anaerobbecken)
Kohlenstoffelimination
Nitrifikation
Denitrifikation vorgeschaltet
- Anaerobe Schlammstabilisierung
 - Statische und maschinelle Überschussschlammvoreindickung
 - Statische Faulschlammnacheindickung
 - Schlammentwässerung (Dekanter)
 - Faulgasverwertung (BHKW).

Die Regelung des Sauerstoffeintrages erfolgt nach der Sauerstoff-Konzentration

- aktuelle schmutzfrachtspezifische Anlagenauslastung Allwetter 74 % (CSB)

74 % (Schlammweg)

Quelle Last-Daten: 24 h – Mischproben Betriebsüberwachung mit N-Parametern

- Starke Fracht-Schwankungen und hydraul. Stoßbelastungen

Nachstehende Fotos zeigen einen Blick auf die Anlagentechnologie sowie die Anlage.



Blick auf die Belebungsanlage



Blick auf die Schlammfäulungsanlage



Schlammstabilisierungs-Anlage
Zubau 3. Faulbehälter (links)



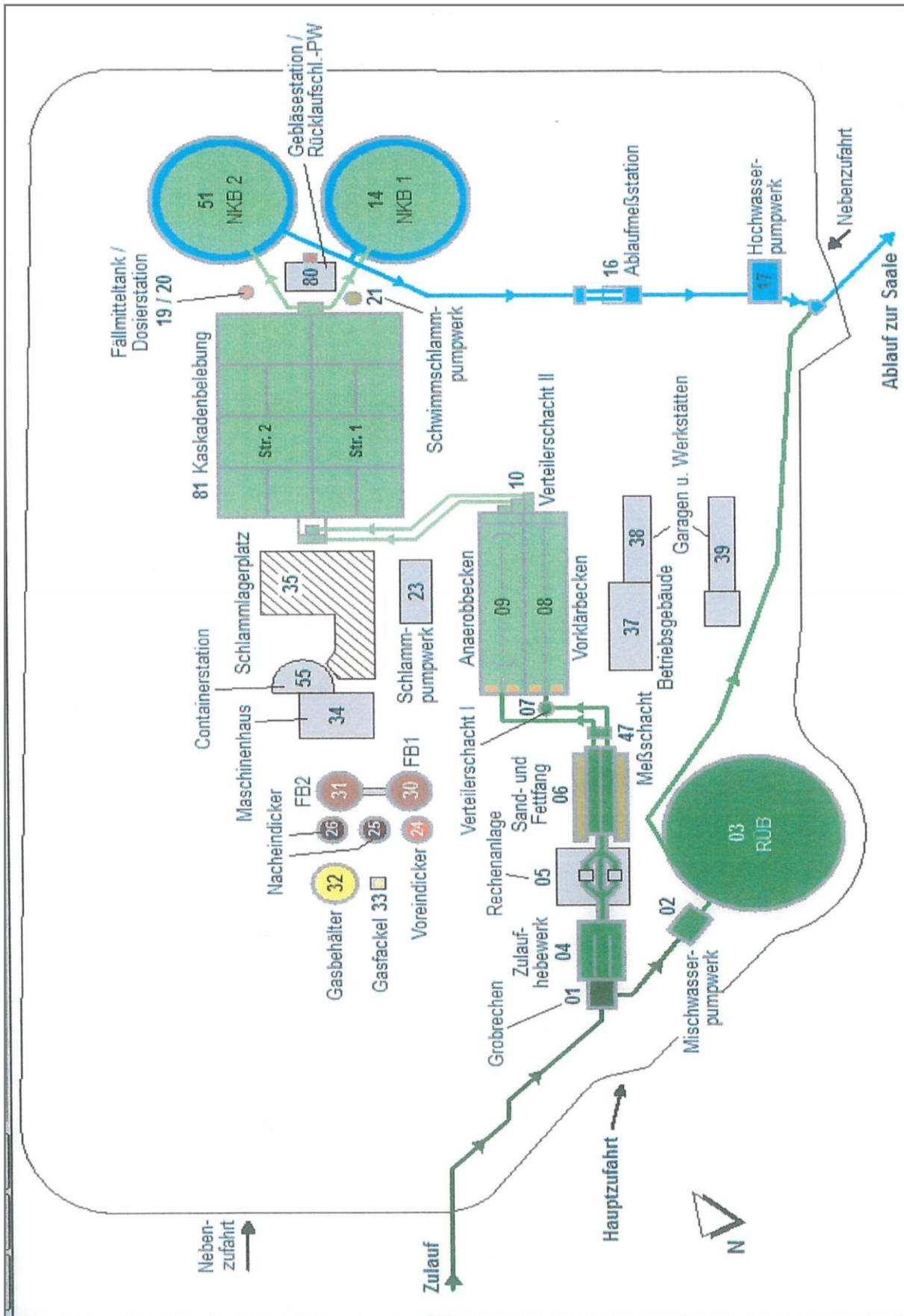
BHKW-Anlage
Zubau 3. Hocheffizienz-BHKW



Erneuerung Heizschlamm-Pumpwerk



Erweiterung Wärmetauscher-Anlage



1.2.3 Energierrelevante Anlagengruppen

Einen Überblick über die energierelevanten Anlagengruppen gibt die nachfolgende Übersicht.

1. Belüftung Belebung
2. Schlammwässerung
3. Schlammstabilisierung
4. Schlammthickung
5. ÜSS-Pumpwerk

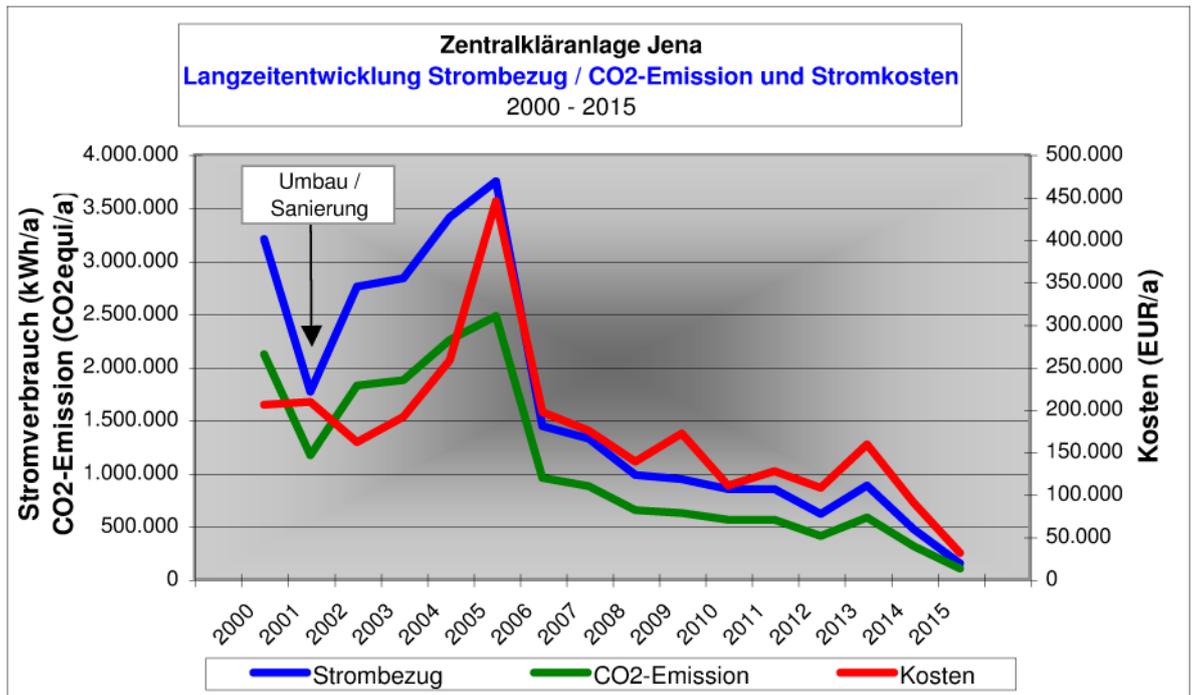
Die aufgeführten relevanten Verbrauchsgruppen sind Bestandteil von Energie-Summenmessungen für Anlagen-Gruppen.

Eine transparente Messung der Energieverbräuche relevanter Einzelanlagen oder Anlagengruppen, existiert nicht.

Davon ausgenommen sind die Turbo-Gebläse.

1.2.4 Langzeit- und aktuelle Trendentwicklung

Die Entwicklung der energetischen Aufwandsparameter der Anlage zeigt das nachstehende Diagramm



Langfristige Reduzierung des Strom-Bezuges um rd. **96 % !**
(gegenüber Hochwert 2005)

1.3 Untersuchungsrahmen und Zielstellung

Gegenstand der Energie-Analyse (Feinanalyse) sind nachfolgende Teilleistungen:

- Erweiterte Bestandsaufnahme und Tiefenauswertung der vorhandenen Unterlagen
- Istzustandsanalyse - Feinanalyse zu Schwachstellen / Problembereichen der Grobanalyse
 - Identifizierung von Schwachstellen und Optimierungsschwerpunkten
- Optimierungsanalyse – Feinanalyse der Optimierungsschwerpunkte
- Konzeptionelle Entwicklung von Einzelmaßnahmen zur Energieoptimierung
- Machbarkeitsuntersuchung der Optimierungsmaßnahmen
- Erarbeitung einer Optimierungskonzeption
 - Präzisierung der Optimierungspotenziale
 - Erstellen Optimierungskonzeption - Maßnahmepaket
 - Einstufung der Maßnahme in Prioritätskategorien
 - Entscheidungsvorschläge zur weiteren Vorgehensweise

Der Untersuchungsrahmen dieser vorliegenden Unterlage umfasst einen wesentlichen Teil des energetischen Einsparpotenziales.

Das Übersichtsschema der Kläranlage kennzeichnet den Untersuchungsrahmen dieser Energie-Analyse zur Energieoptimierung.

Zielstellung

Zielstellung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Energieoptimierungskonzeptes für die Anlage zur

- Minimierung des Energiebedarfes der Anlagengruppen und Entwicklung detaillierter Optimierungsmaßnahmen
- Maßnahmenbezogenen Untersetzung des im Rahmen des Energie-Check (Grobanalyse) ermittelten Einsparpotenziales
- Die Energie-Analyse (Feinanalyse) liefert die Entscheidungsgrundlagen über die Notwendigkeit / Zweckmäßigkeit der Optimierung oder Erneuerung von Anlagen und Aggregaten incl. des Auslösens der Anlagenplanung

2 Vorgehensweise und Untersuchungsmethodik

Die vorgelegte Detailanalyse baut auf den Daten der Grobanalyse auf. Sie verbessert die bisherige Bewertung aber in Bezug auf Genauigkeit und Aussagekraft. Konkrete Energiesparmaßnahmen wurden hinsichtlich der Aggregatauslegung, der Anlagenbemessung, der Betriebsweisen und der Auswahl der Maschinenteknik untersucht. Im Resultat werden Veränderungen vorgeschlagen.

Grundsätzlich sind alle Untersuchungen zur Betriebsoptimierung einer Kläranlage auf der Grundlage der nachfolgenden Kriterien und Prioritätenfolge vorzunehmen:

1. Erfüllung Reinigungsanforderungen
2. Betriebssicherheit und Prozessstabilität
3. Energieeinsparung

Unter diesem Aspekt sind auch alle energetischen Untersuchungen und Maßnahmen auf die Erfüllung der vorstehenden Anforderungen 1 und 2 zu überprüfen.

○ **Berichtsstruktur für die Optimierungsmaßnahmen**

Die nachfolgenden Gliederungspunkte beschreiben die Untersuchungen zu den in der Grobanalyse benannten Optimierungspotenzialen.

Die Dokumentation der Untersuchungsergebnisse erfolgt im

- Textteil – Ergebnisbericht (Zusammenfassung)
- Anlagenteil – Detailergebnisse

3 Grundlagenermittlung und Präzisierung Energie-Check (Grobanalyse)

3.1 Grundlagenermittlung

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurden schwerpunktmäßig nachstehende Aktivitäten unternommen:

- Tiefenauswertung ausgewählter Betriebsdaten in unterschiedlichen Zeitintervallen im Zeitraum 01/14 bis 12/15
- Messtechnische Untersetzung von Datengrundlagen und getroffenen Annahmen
 - Stromstärkemessungen
 - Stromverbrauchsmessungen/Leistungsmessungen
- Betriebstagebuch
 - Anlagenbelastung
 - Energieverbrauch Gesamtanlage
- PLS-Daten
 - Prozessganglinien Parameterkonzentrationen, Laufzeiten
- Bedienungsanleitungen, u.a.
- Workshops und Abstimmungen mit der technischen Leitung und dem Betriebspersonal der Kläranlage

Die Untersuchungsergebnisse sind in der Projektstammakte abgelegt.

Für die Bearbeitung stand ein großer Datenumfang mit unterschiedlicher Datenqualität zur Verfügung. Letzteres drückte sich in nachstehenden Einschränkungen aus

- Begrenzungen im Datenformat (pdf) für eine Auswertung
- Bildung von Ersatzwerten (für Realwerte)
- Formelle Begrenzungen für Darstellen von Zahlenwerten (Anzahl Stellen → Kunstzahlen)

die zur Notwendigkeit umfangreicher Konvertierungsaktivitäten und Plausibilitätsprüfungen führten. Für ein perspektivisches Energiemanagement wird hier eine partielle Optimierung des PLS als sinnvoll empfohlen.

3.2 Präzisierung Energie-Check (Grobanalyse)

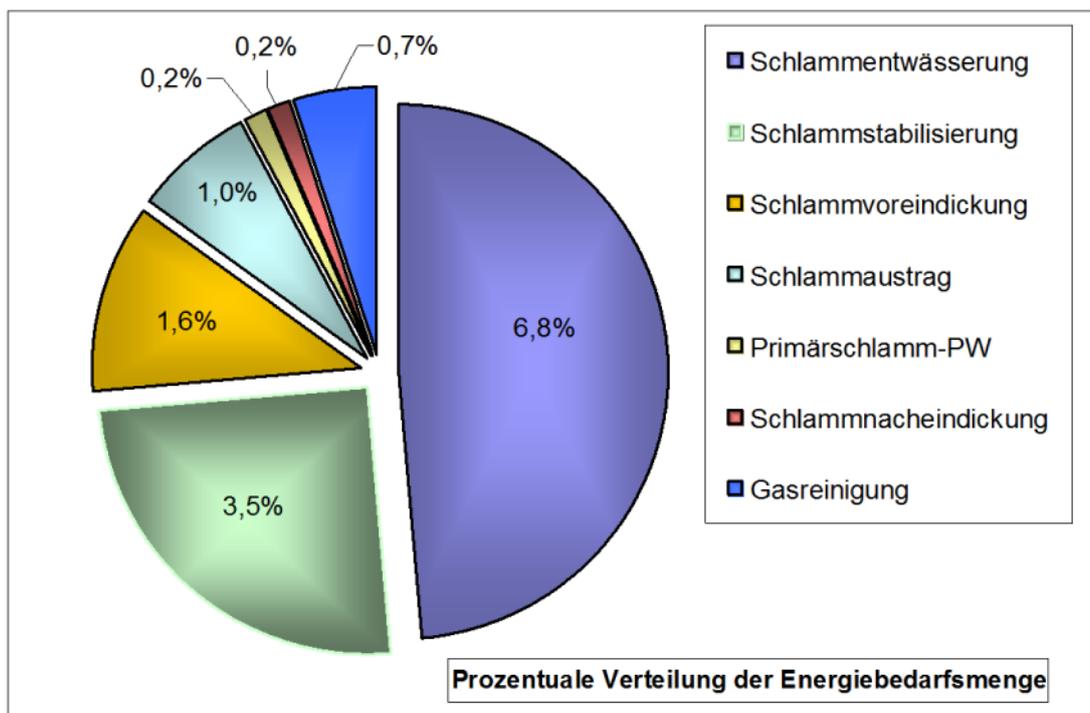
3.2.1 Verteilung Energieverbrauch und Energie-Bilanz

Im Ergebnis der vertiefenden Grundlagenermittlung lassen sich aus der aktualisierten Energiebilanz die Verteilung des Energiebedarfes und die Verbrauchsschwerpunkte gegenüber der Grobanalyse wie nachstehend präzisieren:

○ **Rangfolge der Funktionseinheiten und Bedarfsanteile Strom (Ist-Betrieb)**

	2014	2015
1. Belebungsereich	61,9 %	61,0 %
2. Schlammbehandlung	15,0 %	14,0 %
3. Einlaufgruppe Mechanik	12,1 %	12,1 %
4. Sonstiges	7,7 %	10,2 %
5. Hochwasser-PW / Brauchwasser	1,6 %	1,7 %
6. Mischwasserbehandlung	1,0 %	1,0 %

■ **Verteilung des Energiebedarfes nach Verbrauchsschwerpunkten (-gruppen)**
Funktionseinheit Schlammbehandlung



○ Rangfolge relevanter Verbrauchsgruppen	2014	2015 (nach Umbau)
1. Schlammwässerung	8,3 %	6,8 %
2. Schlammstabilisierung	3,3 %	3,5 %
3. Schlammvoreindickung	2,0 %	1,6 %
4. Schlammaustrag	1,0 %	1,0 %
5. Primärschlamm-PW	0,2 %	0,2 %
6. Schlammnacheindickung	0,2 %	0,2 %
7. Gasreinigung	---	0,7 %
Summe Schlammbehandlung	15,0 %	14,0 %

■ Energie-und Umwelt-Bilanz / Strom-Verbrauch der **Funktionseinheiten**

Eine Gegenüberstellung des Stromverbrauchs der Funktionseinheiten vor und nach der Umbaumaßnahme zeigt die nachfolgende Übersicht. Im Zuge der Energieanalyse erfolgte hier eine technologieorientierte Bereinigung der Verbrauchsdaten der jeweiligen Unterzähler.

Darauffolgend wurde ein Jahresvergleich des spezifischen Stromverbrauches der Funktionseinheiten vorgenommen.

Energie- und Umwelt-Bilanz STROM-VERBRAUCH 2014-2015

Funktionseinheiten

Datenquelle Last:
Datenquelle Energieverbrauch:
NEU:

Betriebsdatenauswertung 2014/15
Unterzähler (ohne technologiefremde Zähler)
sowie technologiebezogene Zuordnung von Einzelgruppen

Pos.	Funktionseinheit	Energie- verbrauch	Energie- verbrauch	CO2- Emission	CO2- Emission	Bemerkungen
		kWh/a	kWh/a	t _{CO2equi/a}	t _{CO2equi/a}	
		2014	2015	2014	2015	Datenquelle
		vor Umbau	nach Umbau			Strom-Unterzähler (UZä)
	Anschlusswert EW_{CSB}					Betriebsdatenauswertung 2014/15 - Last
	Zulauf KA	154.700	149.500			
	Biologie	79.206	76.544			nach Vorklärung
	Schlammweg	154.700	149.500			
2	Biologische Reinigung					
	Biologie Belüftung	1.145.030	1.202.884	756,9	795,1	UZä Turbo's zzgl. Gebläse 3 + 4
						zzgl. Rührwerke BioP
3	Schlammbehandlung	500.942	454.369	331,1	300,3	
	PrimärSchlamm-PW u.a.	90.329	82.439	59,7	54,5	UZä abzgl. VKB u. Rührwerke BioP
	Schlammbehandlung/Faulung	410.613	371.930	271,4	245,8	
	Strombezug + Eigenerzeugung / Emission KA gesamt	2.781.914	2.906.847	1.838,8	1.921,4	Summe Zählerwerte Strom-Bezug und Eigenerzeugung

Jahres-Vergleich Spezif. Energie-Verbrauch STROM 2014-2015

Funktionseinheiten

Datenquelle Last:
Datenquelle Energieverbrauch:
NEU:

Betriebsdatenauswertung 2014/15
Unterzähler (ohne technologiefremde Zähler)
sowie technologiebezogene Zuordnung von Einzelgruppen

Pos.	Funktionseinheit	Spezif. Energieverbrauch kWh/EW	Spezif. Energieverbrauch kWh/EW	Spezif. Energieverbrauch %	Bemerkungen
		2014	2015	2014/15	Datenquelle
		vor Umbau	nach Umbau		
	Anschlusswert EW_{CSB}				Betriebsdatenauswertung 2014/15
	Zulauf KA	154.700	149.500		
	Biologie	79.206	76.544		nach Vorklärung
	Schlammweg	154.700	149.500		
2	Biologische Reinigung				
	Biologie Belüftung (Turbo's + Gebläse)	14,5	15,7	8,7	Erhöhung
3	Schlammbehandlung	3,2	3,0	-6,1	Reduzierung
	PrimärSchlamm-PW u.a.	0,6	0,6	-5,6	
	Schlammbehandlung/Faulung	2,7	2,5	-6,3	Reduzierung
	Spezif. Stromverbrauch KA gesamt incl. Externe Verbr.	18,0	19,4	8,1	Bezugsbasis: Summe Zählerwerte Strom-Bezug und Eigenerzeugung

3.2.2 Energetische Bewertung der Umbaumaßnahmen und des Istzustandes 2015

Die Ergebnisse zum ermittelten spezifischen Energieverbrauch der Anlagengruppen des Schlammweges der Jahre 2014 und 2015 sind in nachfolgenden Übersichten zusammengestellt.

- Stromverbrauch und Energie-Effizienz 2014/2015
(Jahresübersichten 2014 und 2015 – s. Anlage)
- Energetische Beurteilungskriterien – Kennwertvergleich
- Jahresganglinie Eigenversorgungsgrad – ohne Externe Verbraucher

■ **Kennwertvergleich – Energieeffizienz der Verbrauchsgruppen** Kennziffern nach Momentanmessung und für SOLL-Betrieb Istzustand

- Gegenüberstellung des spezifischen Stromverbrauches 2014 / 2015

Eine Gegenüberstellung der spezifischen Stromverbräuche vor und nach der Umbaumaßnahme wurde auf der darauffolgenden Seite vorgenommen.

Die spezifischen Energiebedarfszahlen der Hauptverbraucher der Funktionseinheit Schlammbehandlung werden den üblichen und optimalen Kennwerten vergleichbarer Anlage gegenübergestellt und einer Bewertung unterzogen.

Legende:

Toleranzwert Stand der Energie-Effizienz, der üblicherweise bei optimierter Betriebsweise von KA mit vertretbarem Aufwand erreicht werden kann

Zielwert Optimum ; kann unter jeweiligen Randbedingungen nicht von allen KA mit vertretbarem Aufwand erreicht werden.

- Datengrundlage: Momentanmessung Strom und Spannung 05/2015
- Ermittlung der Leistungsaufnahme aus Messwerten

ENERGIE-ANALYSE

ZKA Jena

STROM-Verbrauch und Energieeffizienz der Verbrauchsgruppen

Gegenüberstellung

2014 / 2015

vor / nach Umbau

Funktionseinheit / Anlagengruppe (Hauptanlagen)	Energie- verbrauch absolut		Energie- verbrauch spez.		Verhältnis Stromverbrauch spez.		Mehr-/Minder- Energie- verbrauch absolut	Bemerkung	Vergleichswerte e _{spez}		Bewertung
	vor Umbau	nach Umbau	vor Umbau	nach Umbau	2015/2014 nach- / vorher	2015 nach Umbau			Optimal-Bereich Zielwerte	Optimalwerte und -bereich	
	kWh/a	kWh/a	kWh/EW x a	kWh/EW x a	%	kWh/a			kWh/EW x a	DWA	
	2014	2015	2014	2015	2015/2014	2015			UBA	DWA	
	vor Umbau	nach Umbau	vor Umbau	nach Umbau	nach- / vorher	nach Umbau			KSTK		
Belastungswert (EW)											
Mechanik	154.700	149.500									
Biologie	79.206	76.544									
Schlammweg	154.700	149.500									
Jahresabwassermenge (m³/a)	6.675.215	6.816.193									
Belebung Belüftung	1.196.564	1.248.953	15,1	16,3	108	95.831		Erhöhung	10		Optimierungschance
Schlammwässerung / Zentrifuge	231.531	196.365	1,5	1,3	88	-28.336		Reduzierung	1,0	0,7 - 1,0	nahe Optimal-Niveau
Schlammstabilisierung / Faulung	91.706	100.769	0,59	0,67	114	-868	fiktiv	neutral	1,5 ... 2,0		Optimal-Niveau
Beschickung FB	10.342	10.466	0,07	0,07	105	488					
Umwälzung FB	18.904		0,12								incl. 7,5 Mon. Umwälzen FB 3
Umwälzung FB	1.462	28.237	0,01	0,19	1.999	27.757		Erhöhung			2014 fiktiv ohne Umwälzen FB 3
Beheizen FB	62.459		0,40								in 2014 mit Neu-Aggregaten
Beheizen FB	93.338	62.066	0,60	0,42	69	-29.113		Reduzierung			2014 fiktiv mit Alt-Aggregaten
Voreindickung (maschinell)	56.459	47.278	0,4	0,3	87	-7.537		Reduzierung	0,4...0,5		Optimal-Niveau
Schlamm-Austrag	28.648	27.986	0,2	0,2	101	311					keine Kennziffern
Gasreinigung / -verdichtung	140	20.580	0,0	0,1		21.156		Erhöhung			Probetrieb / keine Kennziffern
ÜSS-Pumpwerk	10.332	9.554	0,1	0,1	96	-446					keine Kennziffern
Primärschlamm-Pumpwerk	5.482	5.856	0,04	0,04	111	578					keine Kennziffern
Nacheindickung statisch	4.686	4.985	0,03	0,03	110	472				0,03 - 0,17	Optimal-Niveau
Summe Schlammweg						-14.668		Reduzierung			
Gesamtanlage ohne Heizung + WW	2.781.914	2.906.847	18,0	19,4	108				19,0*		Optimal-Niveau
Gesamtanlage	2.781.914	2.906.847	18,0	19,4	108				---		* Zuschlag 1,0 für Zulauf-PW

Übersicht: Gegenüberstellung der Jahre 2014 (vor Maßnahme) und 2015 (nach Maßnahme) für die Verteilung des Energieverbrauches nach Verbrauchsgruppen und Energetische Bewertung des Istzustandes – Schwachstellenanalyse

Legende:

- UIP-projektrelevante Anlagen
- REIHENFOLGE der Verbrauchsgruppen nach energetischer Relevanz
- GRÜN-Schrift IMPULS-Programm Hessen, B. Haberkern

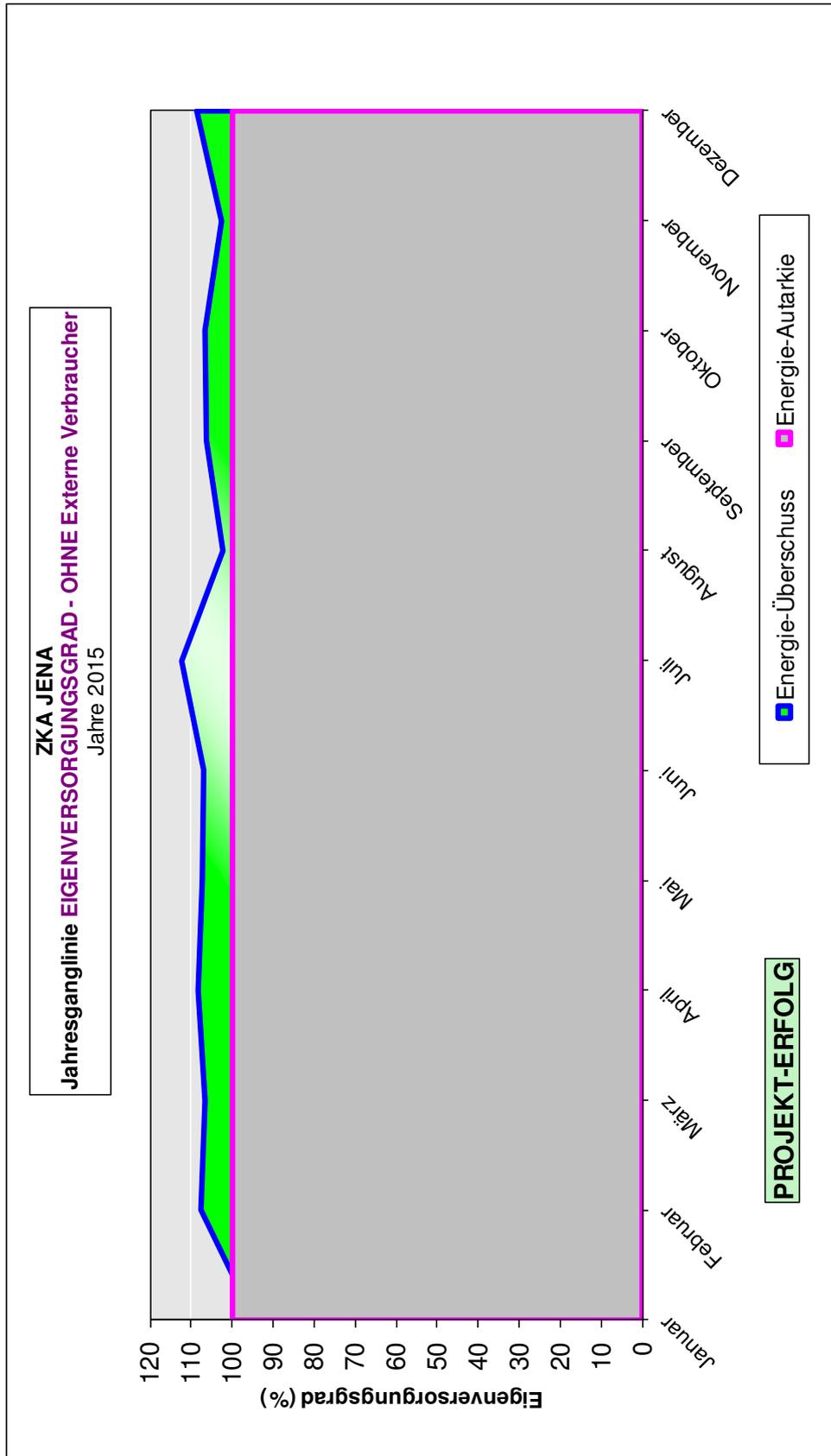
Kennwertübersicht Energie - Energetische Bewertung

Energie-ANALYSE

ZKA Jena

	Bezeichnung Kennzahl	ME	Istwert	Istwert	Istwert	Toleranzwert	Zielwert	Bewertung / Bemerkungen	
			Mittelwert	Mittelwert	Bereich		GK 4 / 5		UBA
			2014	2015	2015				
e _{ges}	Spezif. Gesamt-Elektrizitätsverbrauch	kWh/(EW*a)	18,0	19,4		30	18 + 1* =19	Effizienz auf Zielwert-Niveau ! *Zuschlag 1,0 für Zulauftiefe	
e _{Bel}	Spezif. Elektrizitätsverbrauch Belüftung Belebung	kWh/(EW*a)	15,0	16,3		16	10	- Gesamtverbrauch Belüftung - Belastung: CSB-Last 76.544 EW im Ablauf VKB Hohes Optimierungs-Potenzial	
Energie-Gewinnung			2007-2011	nach Umbau					
e _{FG,1}	spez. Faulgasproduktion	l/(EW*d)	15,9	23		20	bis 30	ohne Co-Vergärung	
e _{FG,2}	spez. Faulgasproduktion pro TR	l/kg oTR		590	384... 915	450	475	signifikantes Übertreffen Zielwert ! GV im Faulschlamm i.M.60%	
e _{FG,3}	spez. Faulgasproduktion pro CSB Roh	m³/kg	0,142	0,177				Steigerung um 25% (ggü. 2012)	
N ₁	Grad der gesamten Faulgasnutzung	%		93			99	Verbrauch BHKW 1.159.053 < Faulgasprod. 1.248.312 (Messdaten)	
N _{FG}	Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität	%	33	40	38 ... 41	Richtwert 31	36...39 bei P=101-250 kW _{el}	Effizienz auf Zielwert-Niveau !	
E _{KW_{el}}	Eigenerzeugung Strom	kWh/(EW*a)		18,5			Maximum 21,7 (GK 4) 25,0 (GK 5)	Zielwerte = max. mögl. Eigenerzeugung bei eta= 33% (GK 4) bzw. eta= 38% (GK 5)	
V _E	Eigenversorgungsgrad-Elektrizität KA incl. mitversorgte externe Stromverbraucher	%		95%	95 ... 99	60	100	Bezugsbasis: Gesamtverbrauch KA incl. angeschlossen Externe Verbraucher	
V _E	Eigenversorgungsgrad-Elektrizität KA ohne mitversorgte externe Stromverbraucher	%		106%	102 ... 112	60	100	Basis: Gesamtverbrauch Technologie KA ohne angeschlossen. Externe Verbr.	
Energie-AUTARKIE der KA									
V _w	Eigenversorgungsgrad-Wärme	%	100	100		98	99		
e _{ext}	Externer Wärme-Bezug	kWh _{th} /(EW*a)	0,0	0,0		3	0		

Legende: Optimalbereich Optimierungschance



■ Klärungsbedarf für Widersprüche/Ergänzungsbedarf

- Daten – Plausibilität der Messdaten Leistungsaufnahme und Betriebsstunden im Prozessleitsystem (PLS)
 - Verbesserung der Datenqualität (s. Pkt. 3.1)

■ Maßnahme-Effekte – Umbau Schlammbehandlungsanlage

○ Verbrauch und Energieeffizienz Strom

→ Erkenntnisse:

1. Mehraufwand für Umwälzen des 3. Faulbehälters wird durch Steigerung Energieeffizienz des Heizschlammkreislaufes ausgeglichen
2. Wahrscheinlich Verbesserung der Entwässerbarkeit des Klärschlammes
3. Mehraufwand für Gasreinigung für 3.BHKW wird durch Steigerung der Energieeffizienz der KS-Entwässerung ausgeglichen
4. Reduzierung Energieverbrauch Schlammweg um rd. 14.700 kWh/a

○ Gasproduktion und –verwertung

→ Erkenntnisse:

1. Steigerung des Eigenversorgungsgrades STROM auf 100%
(Monatsbilanzen/Bezugsbasis: Gesamtverbrauch ohne externe Verbraucher)
2. Detailergebnisse – siehe Haupt-Bericht

■ Energetische Schwachstellen der Anlage

Als energetische Schwachstellen der Kläranlage sind schwerpunktmäßig nachfolgende Verbrauchsgruppen / Anlagen festzustellen:

- A** Senken Energiebedarf (Prüfen)
- B** Belüftung Belebung
- J** Handlungsgrundlagen Betriebsführung

4 Konzeptplanung - Maßnahmen zur Steigerung der Energie-Effizienz und Energie-Gewinnung

- Die maßnahmebezogenen Konzeptplanungen für die Hauptmaßnahmen wurden mit nachstehender Bezeichnungsmethodik versehen und sind im Maßnahme-Katalog (Pkt. 5) zusammengefasst dargestellt.
- Bezeichnungsmethodik der Maßnahmen:

Einzelmaßnahmen

■ Optimierungsbereich – Senken Energiebedarf

A Einzelmaßnahmen (Ist- und Sollzustand)

■ Optimierungsbereich – Reduzierung Energieverbrauch

B Belüftung Belebung

D Schlammbehandlung

■ Optimierungsbereich – Energiegewinnung

K Nutzung Erneuerbarer Energien

5 Konzeption zur Steigerung der Energie-Effizienz, Energie-Gewinnung und Emissionssenkung

5.1 Maßnahmekatalog mit Einspar- und Minderungspotenzialen

Die nachfolgende Aufstellung gibt eine Übersicht über die Untersuchungen und erarbeiteten Maßnahmenkonzepte zur energetischen Optimierung der Anlage

Maßnahmekatalog						
Maßnahme	Bezeichnung	Energieverbrauch kWh/a	Energieverbrauch kWh/a	Einsparpotenzial bis ca. kWh/a	Senkung CO2-Emission bis ca. t CO2equi/a	
		2015	nach Maßnahme			
Optimierungsbereich - Energiegewinnung						
K	Nutzung erneuerbarer Energien	Energieerzeugung 2014 bzw. vor Maßnahme	Energieerzeugung 2015 nach Maßnahme	Steigerungspotenzial	Senkung CO2-Emission	
PROJEKT-ERFOLG UIP	K 1	Prozess-Optimierung Schlammstabilisierung - Steigerung Eigenstrom-Produktion für Energie-Autarkie	Rück-rechnung	Vergleichs-rechnung		
			Rechenwert	Übernahme IST 2015 v. K 1.3		
	1.1	Erhöhen Ausfallgrad des Faulschlammes - Verlängerung der Verweil- / Faulzeit	1.825.707	2.275.705	449.998	297,4
	1.2	Temperierung Faulungsprozess - Stabilisierung Optimal-Temperaturniveau Faulbehälter	Rechenwert	Istwert	in Maßnahme K 1.1 enthalten	
	1.3	Optimierung Anlagen- und Aggregate-Konzept Gasverwertung -Zusatz-Installation 1 Hocheffizienz-BHKW als Grundlast-Aggregat	2.275.705	2.758.430	482.725	319,1
			Summe	932.723		
K 2	Prozess-Optimierung und Steigerung der Faulgas-Gewinnung	2015				
	Bedarfsgerechte Reduzierung TS-Gehalt / Schlammalter - Sekundär-Effekt Maßnahme B 1					
K 3	Optimierung Anlagen- und Aggregate-Konzept Gasverwertung - Ersatzinstallation 1 Hocheffizienz-BHKW für BHKW 2 oder 3					
K 4	Eigen-Nutzung Faulgas-/Eigenstrom-Überschuss					
K 5	Nutzung Faulgas-/Eigenstrom-Überschuss für E-Mobilität					
K 6	Potenzialanalyse / Machbarkeitsstudie Regel-Pooling - Teilnahme am Markt für Regel-Energie (Virtuellen Kraftwerken)					
Summe Gewinnungspotenzial bis ca.				932.723	616,5	

Hinweis: 1) Der Charakter der Abwasser- und Schlammbehandlungsprozesse ist biologischer Natur. Insofern folgen sie einer mathematischen Summenbildung nicht zwingend. Alle Maßnahmen und Änderungen von Betriebsparametern sind schrittweise umzusetzen und auf mögliche negative Wechselwirkungen sowie Erfolg zu überprüfen!

2) Faktor für spez. CO2-Reduktion - (SAENA 2012)

0,661 kg CO2 equi./ kWh (Strom)

rechtsbündig - nicht kumulierbar

Leer-Spalte Potenzial vorhanden, jedoch nicht quantifizierbar

* - Abhängige Maßnahme

5.2 Maßnahmen mit weiterem Untersuchungsbedarf

Nachstehende Maßnahmen sollten in einer nächsten Arbeitsstufe tiefergehend untersucht werden.

- Maßnahme A 1 – Bedarfsgerechte Hydraulische System-Anpassung an die Teil-Auslastung der Kläranlage

- Maßnahme K 4 – K 6
Potenzialanalysen / Machbarkeitsstudien Energie-Gewinnung

5.3 Einstufung der Maßnahmen in Prioritätskategorien

Eine Priorisierung der entwickelten Maßnahmen

- unter den Aspekten ihrer energetischen Effizienz – der erreichbaren Emissionsreduktion – Wirtschaftlichkeit sowie
- Einordnung in zeitliche Umsetzungskategorien

wurde im nachstehenden „Stufenplan mit Prioritäten“ vorgenommen.

Energieautarke ZKA Jena

Stand: 06/2016

Aktionsplan / Stufenplan und Prioritäten					
Zeitliche Realisierung	Nr.	Bezeichnung	Einspar-/Gewinnungs-Potenzial bis ca. kWh/a	Energetische Priorität Rating	
PROJEKT-ERFOLG UIP-Maßnahmen	A 3	Senkung Strombedarf für Beheizen Faulbehälter - Erweiterung Wärmeaustauschfläche	in Maßn. D1 enthalten	hoch	
	K 1.1	Erhöhen Ausfallgrad des Faulschlammes - Verlängerung der Verweil- / Faulzeit	449.998	sehr hoch	
	K 1.2	Temperierung Faulungsprozess - Stabilisierung Optimal-Temperaturniveau Faulbehälter	in Maßn. K 1.1 enthalten	sehr hoch	
	K 1.3	Optimierung Anlagen- und Aggregate-Konzept Gasverwertung - Zusatz-Installation 1 Hocheffizienz-BHKW als Grundlast-Aggregat	482.725	sehr hoch	
	D 1	Optimierung Anlagen- und Aggregatekonzept Heizschlamm-PW Faulbehälter	30.879	sehr hoch	
Sofort- Maßnahmen	B 1.1	Bedarfsger. Anpassung TS-Gehalt (Belebtschlammmenge) an Schmutzfracht-Belastung	36.377	sehr hoch	
	B 1.2	Jahreszeitliche bedarfsgerechte Anpassung TS-Gehalt an Bakterienaktivität	39.664	sehr hoch	
	B 1.3	Bedarfsgerechte Anpassung TS-Gehalt an saisonale Schmutzfracht-Minima	8.541	mittel	
	B 1.4	Last- und temperaturgeführte Steuerung TS-Gehalt - <i>adäquate Maßnahme</i> zu B 1.1 - 1.3 / Vorzugslösung	84.582	sehr hoch	
	B 2	Bedarfsger. Senkung Betriebswert O2-Konzentration Belegung - Optim. Sollwert-Vorgabe	76.174	sehr hoch	
	B 6	Turnusmäßige Kontrolle Gegendruck Gebläse - Kondenswasser		sehr hoch	
	K 2.1	Bedarfsger. Reduzierung TS-Gehalt / Schlammalter - Sekundär-Effekt Maßnahmen B 1		sehr hoch	
	A 1	Prüfen/Reduz. Sollwert Drosselabfluss MW-Entlastungsanlagen Kanalnetz (Teilauslastung)		mittel	
	A 2.1	Vergleichmäßigung Hydraul. Anlagenbelastung - Beibehalten Kanalnetz-Bewirtschaftung	realisiert	mittel	
	A 2.2	Vergleichmäßigung Schmutzfracht-Rückbelastung - Beibehalten	realisiert	mittel	
			Zwischensumme Einspar- / Senkungs-Potenzial bis ca.	191.635	
		Zwischensumme Gewinnungs-Potenzial bis ca.	932.723	bereits realisiert	
Kurzfristige Maßnahmen	B 3	Optimierung Sauerstoffeintragungseffizienz der Belüftungselemente - Erneuerung Membranen	165.996	sehr hoch	
	B 4.2	Optimierung Steuerung Luftzufuhr - Umstellung auf Luftmengen-Regelung ALPHAMETER	156.761	sehr hoch	
	B 4.3	Optimierung Steuerung Luftzufuhr - Implementierung "Belüftungs-Monitor"		hoch	
	D 2	Optim. Aggregatekonzept Förder-Aggregate Schlammbehandlung - Hocheffizienz-Motoren	9.051	mittel	
	B 5.1	Substitution 1 Drehkolbengebläse durch 1 energieeffizienteres Neuaggregat (Turboverdichter)		hoch	
	B 5.2	Optimierung Steuerung Lufterzeugungs-Aggregate - Implementierung "Druckluft-Manager"		sehr hoch	
	K 3	Ersatzinstallation 1 Hocheffizienz-BHKW für BHKW 2 oder 3 - bei Re-Invest oder K 4 - K 6		sehr hoch	
	K 4	Eigen-Nutzung Faulgas-/Eigenstrom-Überschuss - für externe ZV-Anlagen		sehr hoch	
K 5	Nutzung Faulgas-/Eigenstrom-Überschuss für E-Mobilität		hoch		
K 6	Potenzialanalyse / Machbarkeitsstudie Regel-Pooling - Markt für Regel-Energie		hoch		
		Summe Einspar-Potenzial bis ca.	523.443	kWh/a	
		Summe Gewinnungs-Potenzial - bereits realisiert bis ca.	932.723	kWh/a	
		Summe Einspar- und Gewinnungs-Potenzial bis ca.	1.456.166	kWh/a	
linksbündig	Gewinnungs-Potenzial		962,5	t CO2 equa/a	
rechtsbündig	nicht kumulierbar		96.837	EUR/Jahr	
Legende:			172.554	EUR/Jahr UIP	

zzgl. Preissteigerungen

- Stufe 1** Betriebsorganisatorische Maßnahmen oder zeitnah realisierbar
- Stufe 2** Zeitraum 1 - 2 Jahre - Maßnahmen mit Vorbereitungsaufwand (Planung, Organisation)
- Stufe 3** Zeitraum 3 - 10 Jahre - Abhängige, langfristige Maßnahmen

Leer-Spalte Potenzial vorh. jedoch nicht quantifizierbar

UIP-Maßnahme bereits realisiert

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zur weiteren Vorgehensweise

■ Ausgangssituation und Arbeitsmethodik

Gegenstand der vorliegenden Energie-Analyse (Feinanalyse) sind weiterführende tiefergehende Untersuchungen zur Ermittlung und Nachweis der Optimierungseffekte der Maßnahme „Energieautarke ZKA Jena“ sowie die maßnahmenkonkrete Erschließung weiterer verbleibender Kosteneinsparpotentiale.

In diesem Rahmen erfolgte eine zielorientierte, ganzheitliche Untersuchung der Optimierungsmöglichkeiten der Kläranlage mit den Arbeitsphasen

- Istzustandsanalyse
- Energie- und CO₂-Bilanz
- Potenzialanalyse
- Maßnahmenkatalog
- Akteursbeteiligung

Zielstellung dieser Arbeit war das Erstellen einer Entscheidungsgrundlage und eines strategischen Planungsinstrumentes zur weiteren nachhaltigen Reduzierung des Energieverbrauches und der Treibhausgasemissionen, Erschließung energetischer Einsparpotenziale und Untersuchung von Möglichkeiten zur Nutzung Erneuerbarer Energien sowie Zusammenführung von Klima- und Gewässerschutz.

■ Konzeption zur Steigerung der Energie-Effizienz und Energie-Gewinnung

Im Ergebnis der Energieanalyse (Feinanalyse) wurde ein Maßnahmenkatalog entwickelt mit

- **31 Einzelmaßnahmen, davon 5 UIP-Maßnahmen**

Optimierungsgegenstand sind die Maßnahme-Pakete

- A Senkung Energiebedarf
- B Optimierung Belüftung Belebung
- D Optimierung Schlammbehandlung
- K Eigenenergie-Gewinnung

Auf einen Blick – Die PROJEKT-ERGEBNISSE

EINSPAR- und GEWINNUNGS- POTENZIALE

ENERGIE	KOSTEN	KLIMA
Gewinnung 932.700*	172.550 EUR	616,5
Verbrauch 523.400*	96.800 EUR	346,0
kWh/a	JÄHRLICH	t CO ₂ equi/a

Grundlagen*: - bei Potenzialrealisierung 100% Strom zzgl. nicht quantifizierbarer Potenziale

- UIP-Maßnahmen Energie-Gewinnung: Bezugsjahr 2014
- Maßnahmen Energie-Verbrauch: Bezugsjahr 2015
- Preisbasis: Strombezug 2016

Anmerkung:

Die vorstehenden Potenziale wurden mit Augenmaß ermittelt. Sie beruhen auf vorliegenden bzw. veröffentlichten Erfahrungswerten des Anlagenbetriebes. Der Charakter der Abwasser- und Schlammbehandlungsprozesse ist biologischer Natur. Insofern folgen sie einer mathematischen Zusammenfassung/Summenbildung nicht zwingend. Sie können auch Schwankungen unterliegen.

■ **Gesamtübersicht Einspar- und Senkungspotenziale Energieverbrauch und CO₂-Emissionen**

1. Energie – Einsparpotenzial

➤ voraussichtliche Energieeinsparung in Höhe von (bei Annahme Potenzialrealisierbarkeit Strom 85 %)	bis ca.	445.000 kWh/a
entsprechend	sofort	bis ca. 30.100 EUR/a
	kurzfristig	bis ca. 52.200 EUR/a
	gesamt in 10 Jahren	ca. 823.000 EUR
○ zzgl Einsparpotenziale aus Energie-Preissteigerungen		

2. CO₂-Emissions - Senkungspotenzial

- voraussichtliche Minderung in Höhe bis ca. 294 t CO₂ equi / a
- Energie-Effizienz leistet Beitrag zum Klimaschutz

3. Erhöhung der Energie-Effizienz

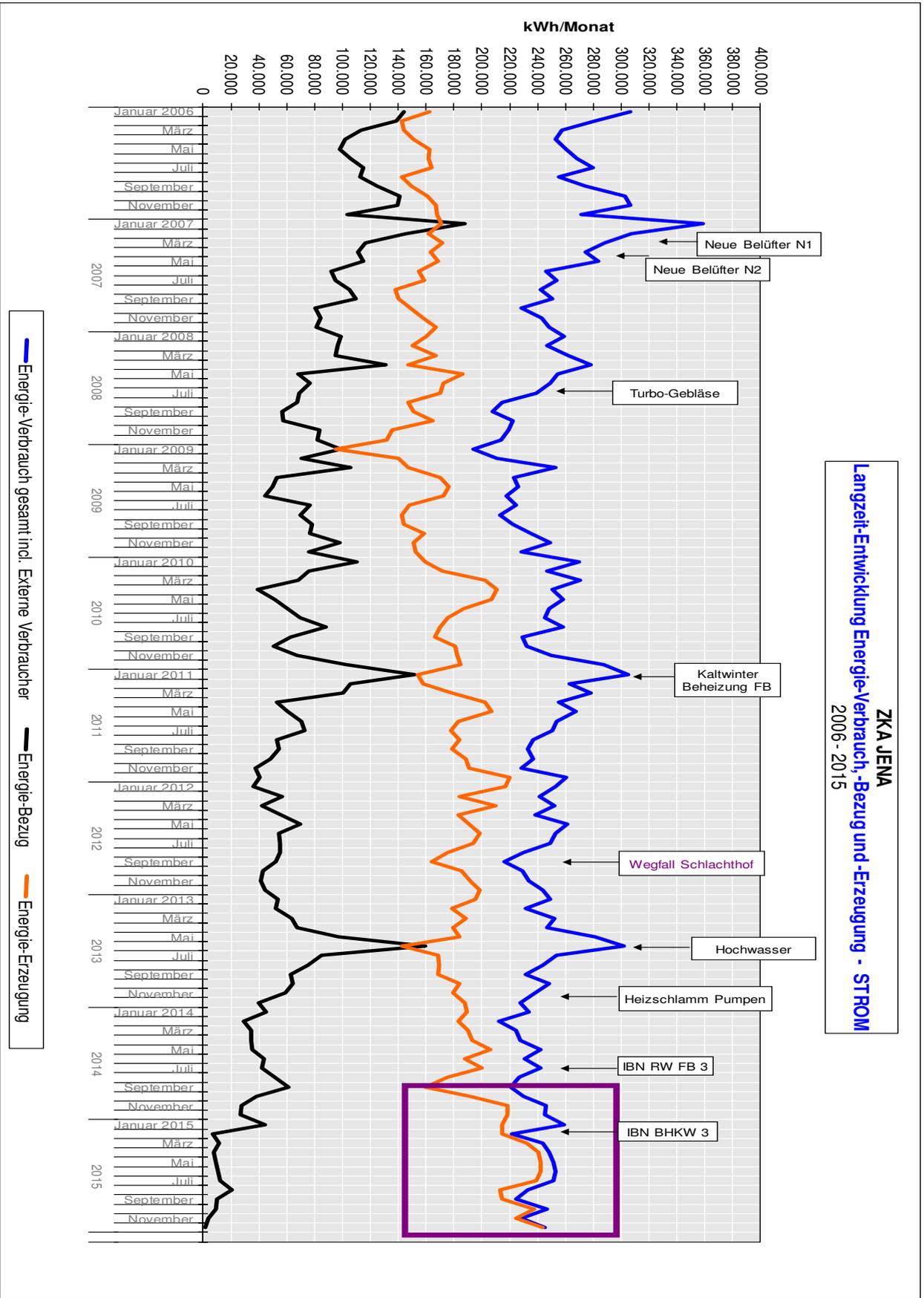
➤ Gesamtanlage (Strom):
Reduktion des spezif. Energiebedarfes von 19,4 auf 16,5 kWh/(EW _{CSB} x a)
bzw. um 15,3 %

Grundlagen:	
Energieverbrauch 2015:	2.906.8470 kWh / a
Einsparpotenzial:	523.443 kWh / a
davon erschließbar (rd. 85 %):	444.927 kWh / a
Belastung:	149.500 EW _{CSB} Abwasserbehandlung
	149.500 EW _{CSB} Schlammbehandlung

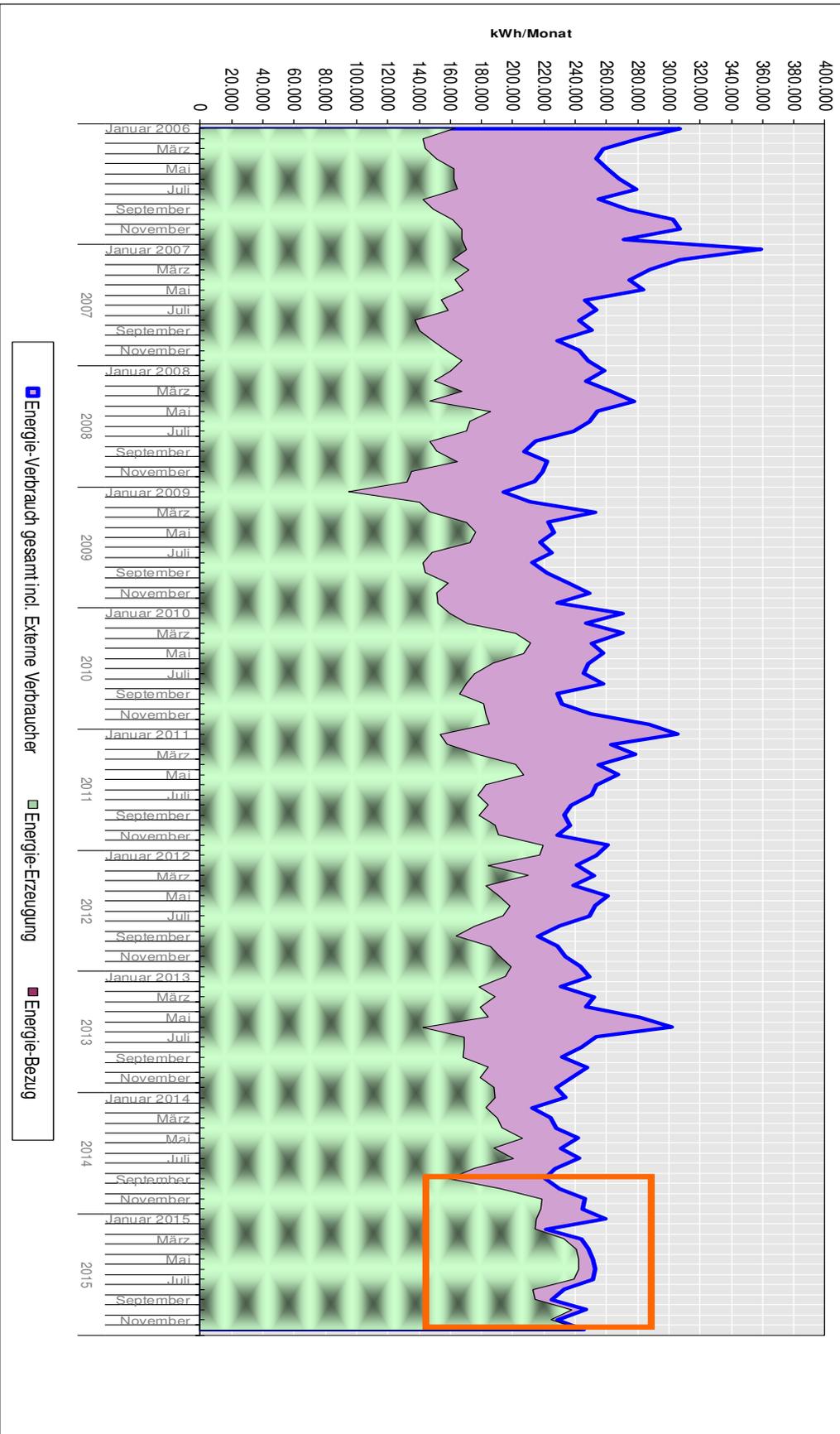
4. Energie-Gewinnung (UIP-Maßnahmen – bereits realisiert)

➤ Energie – Gewinnung bis rd. 932.700 kWh / a
--

- voraussichtliche Emissions-Senkung in Höhe von bis ca. 616,5 t CO₂ equi/a



ZKA JENA
Langzeit-Entwicklung Energieverbrauch und -erzeugung
2006 - 2015



■ Grundlagen erfolgreicher Energieoptimierungs- und Klimaschutz – Aktivitäten

In Auswertung vergleichbarer Projekterfahrungen lassen sich nachstehende Grundlagen für eine erfolgreiche Steigerung der Energie-Effizienz und Senkung der CO₂-Emissionen ableiten

1. Gewissenhafte, tiefgründige Grundlagenermittlung und methodische Vorgehensweise in den 2 Arbeitsstufen Energie-Check (Grobanalyse) und Energie-Analyse (Feinanalyse)
2. Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen in einem möglichst kurzem überschaubaren Zeitraum
3. Laufendes Controlling der energie- und emissionsrelevanten Anlagenparameter
Der spezifische Energieverbrauch der Anlagen unterliegt aus objektiven Gründen Veränderungen (Schwankung Abwasseranfall und Schmutzfracht, Anlagenverschleiß, Schwankungen biologischer Prozessparameter). Das Erreichen von Bestwerten kann infolgedessen nicht immer erreicht werden. Es gilt, das höchstmögliche Einsparpotenzial unter den vorliegenden Randbedingungen zu erreichen.
 - Energieoptimierung als gedankliche Tagesaufgabe im Anlagenbetrieb
 - Die Sicherung erzielter Erfolge ist nur über regelmäßiges Controlling möglich
monatliches Überwachen - Jahrescontrolling

■ Schlussfolgerungen und weitere Aktivitäten

Für die weitere konsequente Steigerung der ENERGIE-Effizienz der Anlage können nachfolgende Empfehlungen gegeben werden:

1. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen zur Betriebsoptimierung einer Anlage auf der Grundlage der nachfolgenden Kriterien und Prioritätenfolge vorzunehmen:
 1. Erfüllung Reinigungsanforderungen
 2. Betriebssicherheit und Prozessstabilität
 3. Energieeinsparung

Unter diesem Aspekt sind auch alle energetischen Optimierungsmaßnahmen auf die Erfüllung der vorstehenden Anforderungen 1 und 2 unmittelbar vor Realisierung bzw. im Testbetrieb nochmals zu überprüfen.

2. Durchführung einer – Energetischen Anlagenplanung – zur Vorbereitung der Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen (Messprogramm Planungsgrundlagen (P-I-H) / Aktualisierung Anlagenbemessung / Anlagenauswahl / Überprüfung Einspareffekt und Amortisationszeit) einschließlich Planung bzw. Maßnahmen zur Gewährleistung der Energieeffizienz und der Aggregate.
3. Schrittweise Maßnahmeumsetzung und Erfolgskontrolle

Die Steigerung der Energie-Effizienz von Abwasserbehandlungsanlagen ist ein Gebot der Wirtschaftlichkeit

und

ein nachhaltiger Beitrag für den Erhalt unserer Umwelt, die Realisierung der Energiewende und den Klimaschutz!

Möglich wurde das gute Ergebnis der Energiereduzierung insbesondere durch das engagierte und konstruktive Mitwirken des Anlagenbetreibers, wofür wir an dieser Stelle nochmals unseren Dank aussprechen möchten.

Gera, Juni 2016



Stefan Bierhals

7 Schrifttumsverzeichnis

1. Haberkern, Dr. Maier, Schneider; Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen, Forschungsbericht des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 11/2006
2. DWA – Arbeitsblatt A 216 (Entwurf);
Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen
3. DWA – Deutsche Vereinigung Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (1996);
ATV-Handbuch Klärschlamm,
Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 4. Auflage

8 Verzeichnis Tabellen – Abbildungen – Diagramme

Verzeichnis Tabellen

Tabelle 1	Die ZKA Jena – Auf einen Blick	S. 2
Tabelle 2	Rangfolge der Funktionseinheiten und Bedarfsanteile	S. 14
Tabelle 3	Rangfolge relevanter Verbrauchsgruppen 2014 / 2015	S. 15
Tabelle 4	Energie- und Umweltbilanz STROM-VERBRAUCH 2014 – 2015	S. 16
Tabelle 5	Jahres-Vergleich Spezif. Energie-Verbrauch Strom 2014 – 2015	S. 17
Tabelle 6	STROM-Verbrauch und Energieeffizienz der Verbrauchs- Gruppen – Gegenüberstellung	S. 19
Tabelle 7	Energetische Beurteilungskriterien	S. 20
Tabelle 8	Maßnahmekatalog	S. 25/26
Tabelle 9	Aktionsplan / Stufenplan und Prioritäten	S. 28
Tabelle 10	Einspar- und Gewinnungs-Potenziale	S. 30

Verzeichnis Abbildungen

Abb. 1	Blick auf die Belebungsanlage	S. 5
Abb. 2	Blick auf die Schlammfauungsanlage	S. 5
Abb. 3	Schlammstabilisierungs-Anlage	S. 6
Abb. 4	BHKW-Anlage	S. 6
Abb. 5	Erneuerung Heizschlamm-Pumpwerk	S. 7
Abb. 6	Erweiterung Wärmetauscher-Anlage	S. 7
Abb. 7	Technologie-Schema der Anlage	S. 8

Verzeichnis Diagramme

Diagramm 1	Langzeit-Entwicklung Strombezug / CO ₂ -Emission / Stromkosten 2000 – 2015	S. 10
Diagramm 2	Prozentuale Verteilung der Energiebedarfsmenge	S. 14
Diagramm 3	Jahresganglinie Eigenversorgungsgrad 2015 ohne Externe Verbraucher	S. 21
Diagramm 4	Langzeitentwicklung Energie-Verbrauch, -Bezug, und Erzeugung – STROM	S. 32
Diagramm 5	Langzeitentwicklung Energieverbrauch und –erzeugung 2006 – 2015	S. 33