

ENERGIEANALYSEN VON KLÄRANLAGEN ERGEBNISSE UND UMSETZUNG

Udo Bäuerle, INGENIEURBÜRO BÄUERLE & PARTNER, Eilwangen

Kläranlagen sind einer der Hauptenergieverbraucher der Kommunen. Deshalb wird z.B. von den Landesregierungen in Baden Württemberg und Bayern die Erstellung von Energieanalysen von Kläranlagen unterstützt. Zur Realisierung der gefundenen Einsparpotentiale müssen die Einsparmaßnahmen umgesetzt werden. An vier Beispielen soll dies dargelegt werden.

Bei der Kläranlage D mit einer Ausbaugröße von 21.000 Einwohnerwerten handelt es sich um eine N-DN Anlage ohne Vorklärung, bei der der Schlamm aerob-thermophil teilstabilisiert (ATS) wird. Wie nicht anders zu erwarten, ergibt sich aus der vorgefundenen Verfahrenstechnik ein relativ hoher spezifischer Stromverbrauch. In Abbildung 1 ist der Verlauf des Stromverbrauchs und der spezifische Verbrauch der letzten 10 Jahre dargestellt.

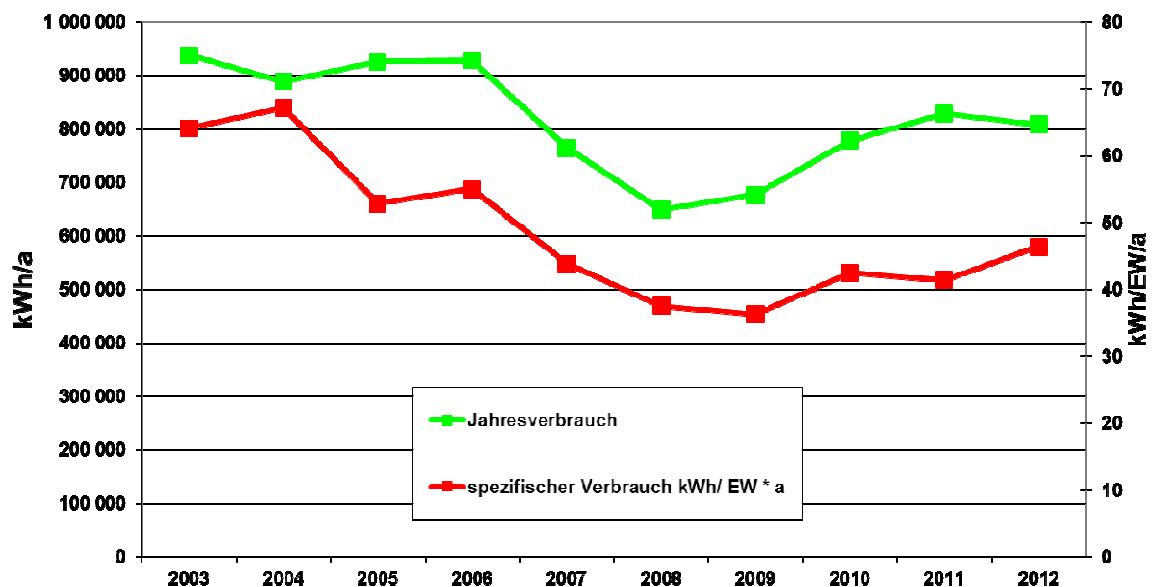


Abbildung 1: Kläranlage D, Stromverbrauch 2003 - 2012

Der Rückgang in den Jahren 2008 und 2009 ist auf die zeitweise Ausserbetriebnahme der aerob-thermophilen Schlammstabilisierung wegen Reparaturarbeiten zurückzuführen. Nach der Reparatur wurde die ATS-Anlage wieder in Betrieb genommen, da sich Probleme mit der Lagerfähigkeit des unstabilierten Schlammes, der landwirtschaftlich verwertet wird, ergaben. Obwohl 2010 weitere ca. 2.000 Einwohner an die Kläranlage angeschlossen wurden, ist der Stromverbrauch nicht wieder auf die Höhe der Jahre 2003 bis 2005 geklettert. Wir führen dies auf die in der Tabelle 1 aufgeführten Maßnahmen zur Energieeinsparung zurück.

Tabelle 1: Kläranlage D, durchgeführte Maßnahmen vor 2010

	Einsparung
• Anhebung Wasserspiegel Zwischenpumpwerk	11 000 kWh
• Energieeffiziente langsam laufende Rührwerke im Belebungsbecken	35 000 kWh
• Steuerung Nitrifikation – Denitrifikation mit Fuzzy Logik	44 500 kWh
• Erneuerung Gebläse mit verbessertem Wirkungsgrad	

Abbildungen 2 und 3 zeigen, dass, wie bei Kläranlagen üblich, auch bei dieser Kläranlage der Energieverbrauch hauptsächlich durch den Strombedarf bestimmt wird.

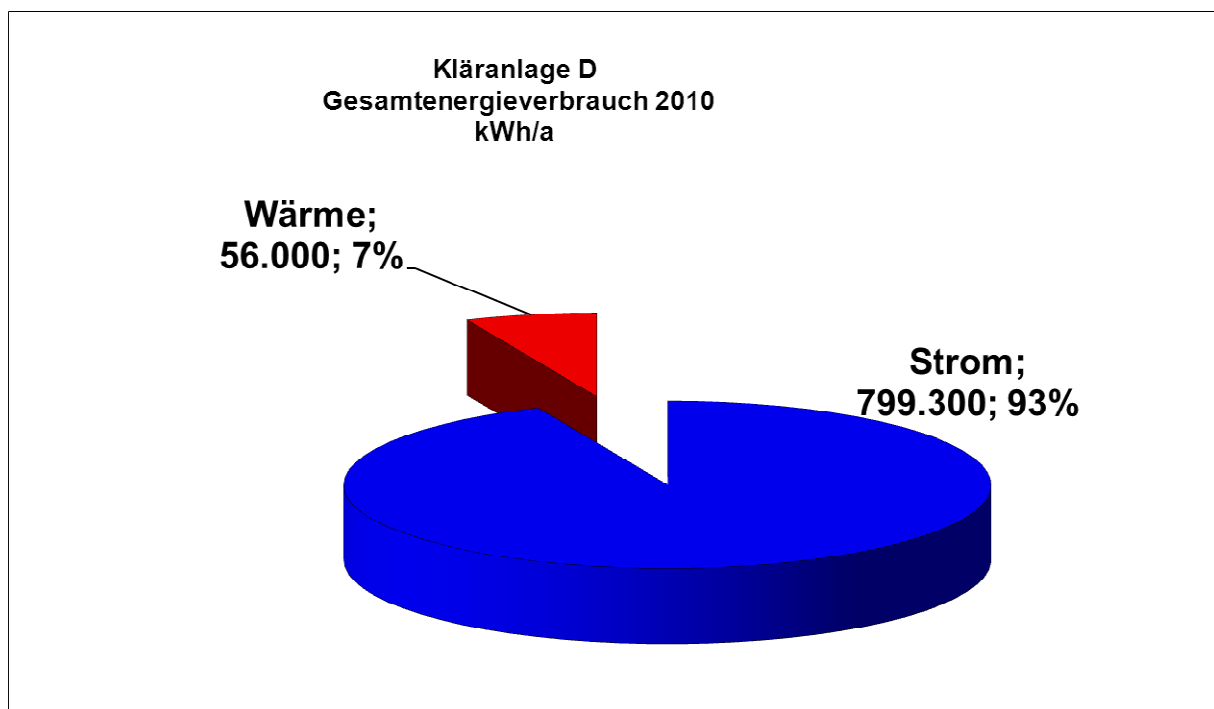


Abbildung 2: Kläranlage D Gesamtenergieverbrauch 2010

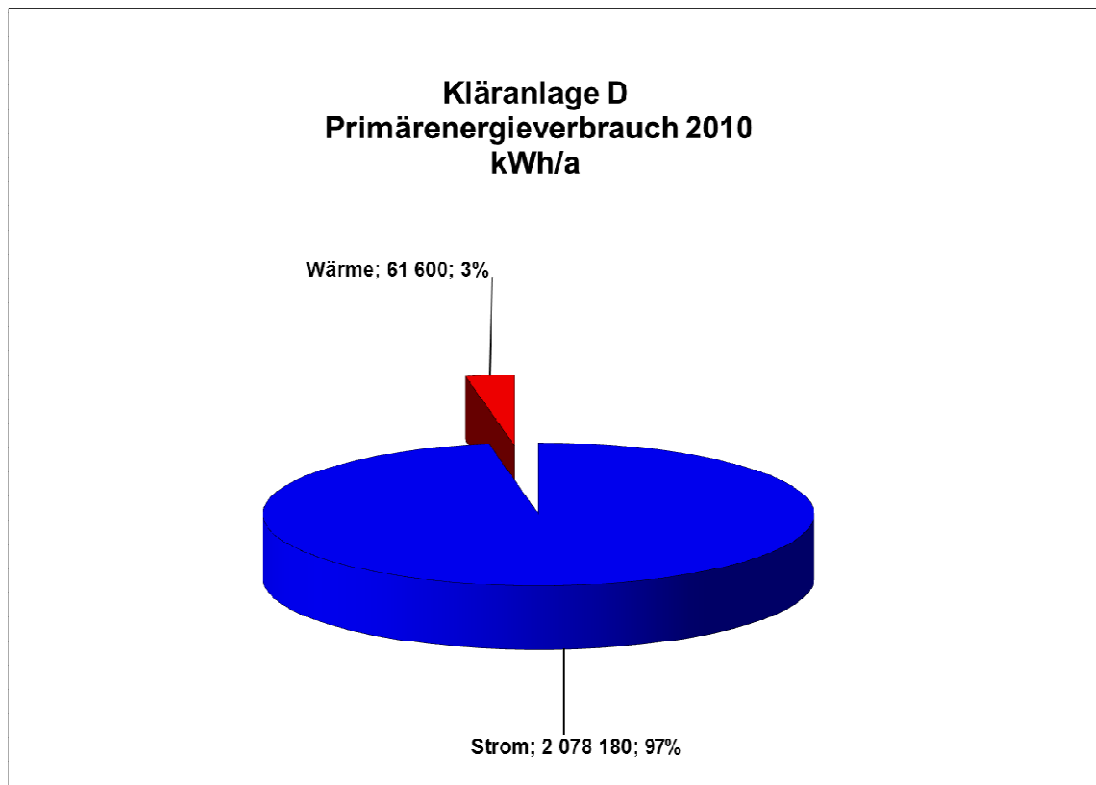


Abbildung 3: Kläranlage D Primärenergieverbrauch 2010

Wird der Energieverbrauch als Primärenergieverbrauch dargestellt, dominiert die Art Strom noch viel mehr. Hohe Einsparpotentiale im Primärenergieverbrauch und damit in der CO₂ Emission sind daher vor allem im Stromverbrauch zu suchen.

Die Abbildung 4 zeigt, dass, wie erwartet, auch hier die Verfahrensstufe Biologie der größte Stromverbraucher ist.

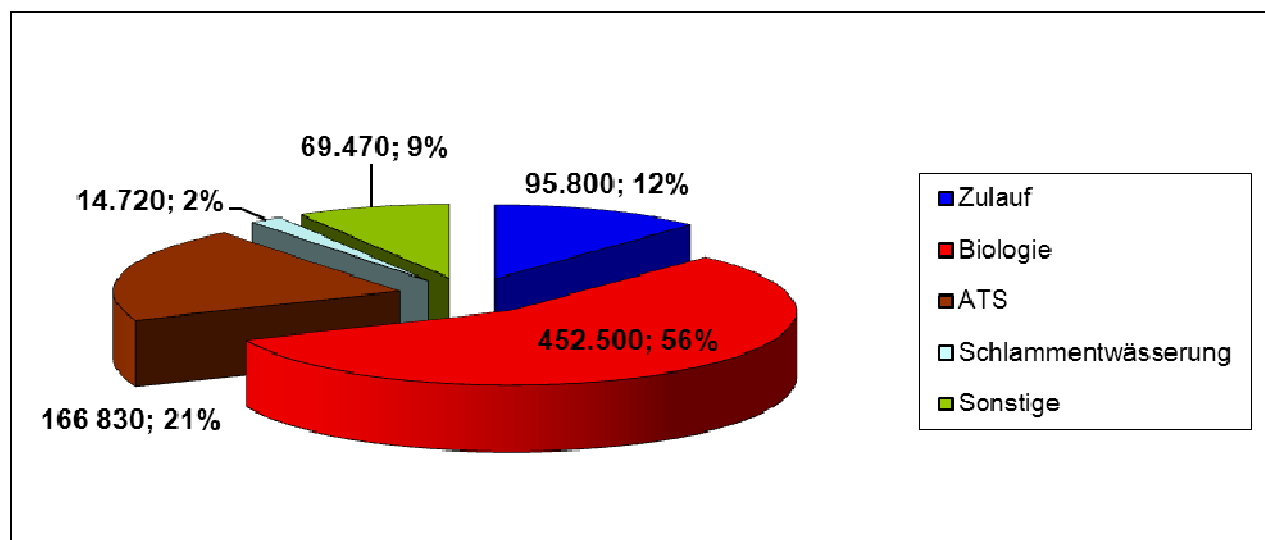


Abbildung 4: Kläranlage D Verteilung Stromverbrauch 2012 kWh/a

Gleich danach kommt jedoch die aerob-thermophile Schlammstabilisierung mit über 20 % des Gesamtverbrauchs. Wie bereits die Analyse des Stromverbrauchs über die letzten 10 Jahre gezeigt hat, steckt in der Umstellung der Schlammstabilisierung ein erhebliches Einsparpotential. Dies wird dann auch bestätigt, wenn man, wie in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgeführt, die möglichen Maßnahmen mit ihrem Einsparpotential bewertet.

Tabelle 2: Maßnahmen Kläranlage D

		Einsparpotential kWh/a
1	Anpassung TS Gehalt Belebung	16.800
2	Betriebszeiten Rührwerke Belebung	16.000
3	Betriebszeiten Rezirkulationspumpen	6.000
4	Erneuerung Sandfanggebläse	8.000
5	Erneuerung Beleuchtung	2.700
6	Austausch Membranen Belüfterplatten	25.000
7	Faulung mit Gasverstromung	
	Einsparung Strom	200.000
	Wärme	50.000
	Stromerzeugung	220.000
	Summe	544.500

Während sich die Maßnahmen 1 bis 6 mit relativ geringen Investitionskosten realisieren lassen bzw. sich im Rahmen der sonstigen Unterhaltung ergeben, ist die Umstellung der Schlammstabilisierung auf eine Faulung eine große Investitionsmaßnahme, die ihre Wirtschaftlichkeit belegen muss.

Nachdem sich in einer ersten Variantenuntersuchung wirtschaftliche Vorteile für die Schlammfaulung gezeigt haben, wurde diese vorplanungsmäßig weiterentwickelt. Als Alternativen wurde eine Erneuerung der aerob-thermophilen Stabilisierung und auf Nachfrage als weitere Alternative auch eine Verdoppelung des Belebungsbeckenvolumens, um eine gemeinsame aerobe Stabilisierung zu erreichen, untersucht.

Die Betriebskosten wurden nur für den Bereich Schlammstabilisierung ermittelt und die Stromerzeugung für die Abwasserreinigung und die Einsparung in der Belebung durch den Ansatz von negativen Kosten bei der Schlammfaulung berücksichtigt. Die hohen Betriebskosten der aerob-thermophilen Stabilisierung sind vor allem auf die hohen Stromkosten zurückzuführen. Im Betrieb werden hier zurzeit ca. 8,7 kWh/EW/a benötigt. Die Wirtschaftlichkeit wurde mit der Barwertmethode nachgewiesen, die Barwerte dann auf greifbarere Jahreskosten umgerechnet.

Tabelle 3: Wirtschaftlichkeit einer Faulung Kläranlage D

Wirtschaftlichkeit einer Faulung			
Auslastung ca. 19 000 EW			
Strompreis 2015	0,20 €/kWh		
	Variante 1	Variante 3	Variante 4
	Schlammfaulung	Aerob Thermophile	gemeinsame aerobe
	18l Gas /EW/d	Stabilisierung	Stabilisierung
		neu	
Investitionskosten	2 470 000 €	880 000 €	2 600 000 €
Betriebskosten			
erste 10 Jahre mit KWK Zulage	18 716 €	126 822 €	104 959 €
ab dem 11. Jahr	31 452 €		
Jahreskosten			
bei einem Zinssatz von 3%	157 666 €	169 574 €	217 462 €
Jahreskosten			
bei einem Zinssatz von 3%			
und Energiepreissteigerungen von 2%	119 142 €	183 076 €	221 379 €

Es zeigt sich, dass die Schlammfaulung trotz ihrer fast dreimal so hohen Investitionskosten bereits bei der Annahme konstanter Energiepreise wirtschaftlich ist. Wird erwartet, dass die Energiepreise mehr als die allgemeine Inflationsrate steigen, wird der Unterschied noch wesentlich größer.

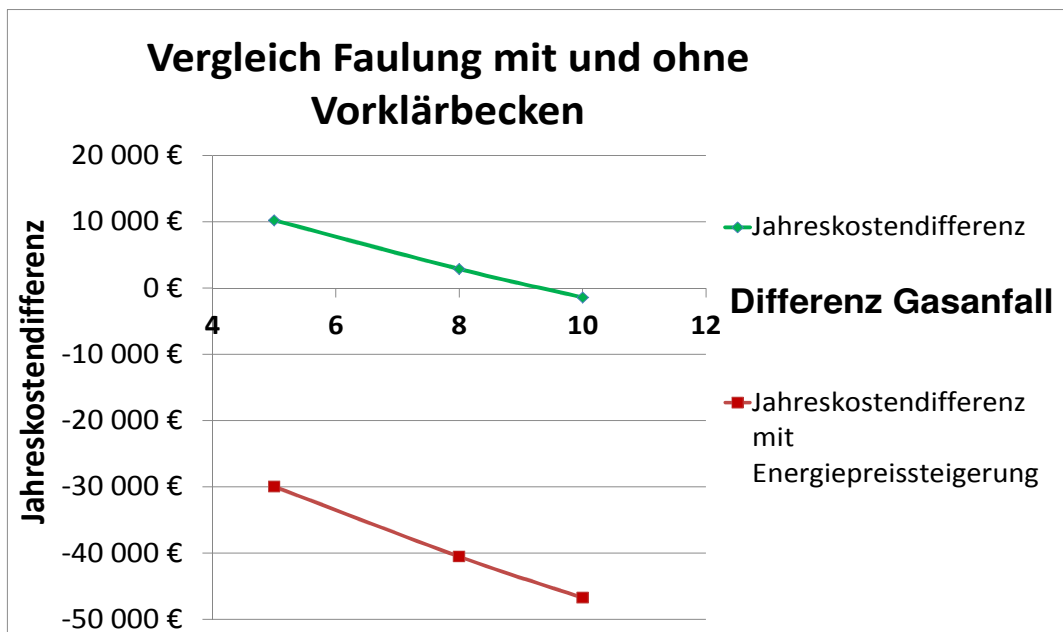
Die gemeinsame aerobe Schlammstabilisierung ist zwar energetisch günstiger als die ATS, jedoch in dieser Größenklasse und bei den heutigen Energiepreisen nicht konkurrenzfähig gegenüber einer Schlammfaulung. Zum gleichen Ergebnis kommt auch die Studie des Landes Rheinland-Pfalz [1], die die Umwandlung von Schlammstabilisierungsanlagen in anaerobe Faulungsanlagen untersucht.

Wie in der Literatur empfohlen, wurde für die Anlage ein neues Vorklärbecken eingeplant. Da auch Überschussschlamm faulfähig ist, und damit ein Vorklärbecken für den Betrieb einer Faulung nicht zwingend erforderlich wird, wurde die Frage gestellt, ob ein Vorklärbecken wirtschaftlich sinnvoll ist.

Die Tabelle 4 zeigt, dass es dabei auf die angesetzten Grunddaten ankommt. Dargestellt ist die Differenz der Investitionskosten, der angesetzte Mehrgasanfall durch das Vorklärbecken und die Differenz der Jahreskosten mit und ohne Energiepreissteigerung.

Tabelle 4: Wirtschaftlichkeit eines Vorklärbeckens Kläranlage D

Wertedifferenzen zwischen mit und ohne VKB				
- bedeutet Minderkosten mit VKB				
Investitionskostendifferenz		680 000 €		
Differenz Gasanfall	I/EW/d	5	8	10
Jahreskostendifferenz bei einem Zinssatz von 3%		10 237 €	2 884 €	-1 405 €
Jahreskostendifferenz bei einem Zinssatz von 3% und Energiepreissteigerungen von 2%		-29 955 €	-40 525 €	-46 733 €



Das Ergebnis lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Ab einem Unterschied von 9-10 l Gas/EW/d ist ein Vorklärbecken bereits bei konstanten Energiepreisen wirtschaftlich. Wird von gegenüber der allgemeinen Inflationsrate überproportional steigenden Energiepreisen ausgegangen, ist ein Vorklärbecken immer wirtschaftlich. Da man geneigt ist, zurzeit eher ein Szenario mit überproportional steigenden Energiepreisen zu erwarten, wird man sich eher für den Bau eines Vorklärbeckens entscheiden als dagegen.

Die genannten 10 l/EW/d entsprechen dabei der im Merkblatt DWA-M 363 Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogas, November 2010, genannten Differenz von Belebungsanlagen mit und ohne Vorklärung.

Die Auswirkungen einer neuen Faulung mit Gasverstromung auf die Strombilanz und die Stromkosten einer Kläranlage lassen sich gut am Beispiel der Kläranlage L (Ausbaugröße 41.000 EW) ablesen, bei der im Jahr 2006 eine neue anaerobe Schlammstabilisierung mit Gasverstromung in Betrieb ging. Die Kläranlage hatte ursprünglich ihren Rohschlamm aus Primär- und Überschussschlamm direkt ohne Stabilisierung entwässert. Auslöser des Baubeschlusses 2002 war daher nicht so sehr die zu erwartende Energieeinsparung, sondern vor allem die ca. 30 %ige Reduzierung des Schlammvolumens und die daraus resultierende Einsparung bei den Entsorgungskosten. Die Abbildung 5 zeigt, dass sich durch die Schlammfäulung zwar der Gesamtstrombedarf etwas erhöht, der Fremdbezug sich jedoch drastisch vermindert.

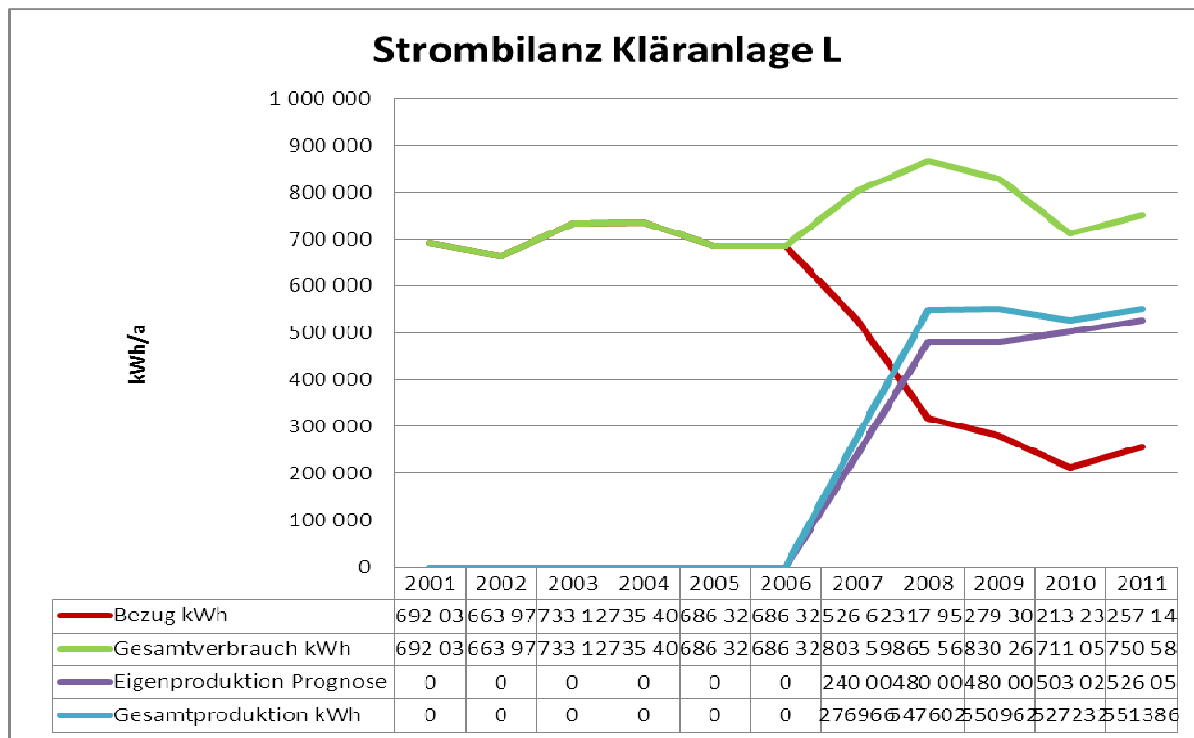


Abbildung 5: Strombilanz Kläranlage L

Die erzeugten Strommengen lagen dabei immer über den Prognostizierten. Werden anstatt des Stromverbrauchs die Strombezugskosten betrachtet, zeigt sich, wie aus Abbildung 6 ersichtlich, der wirtschaftliche Vorteil der Faulung noch wesentlich mehr.

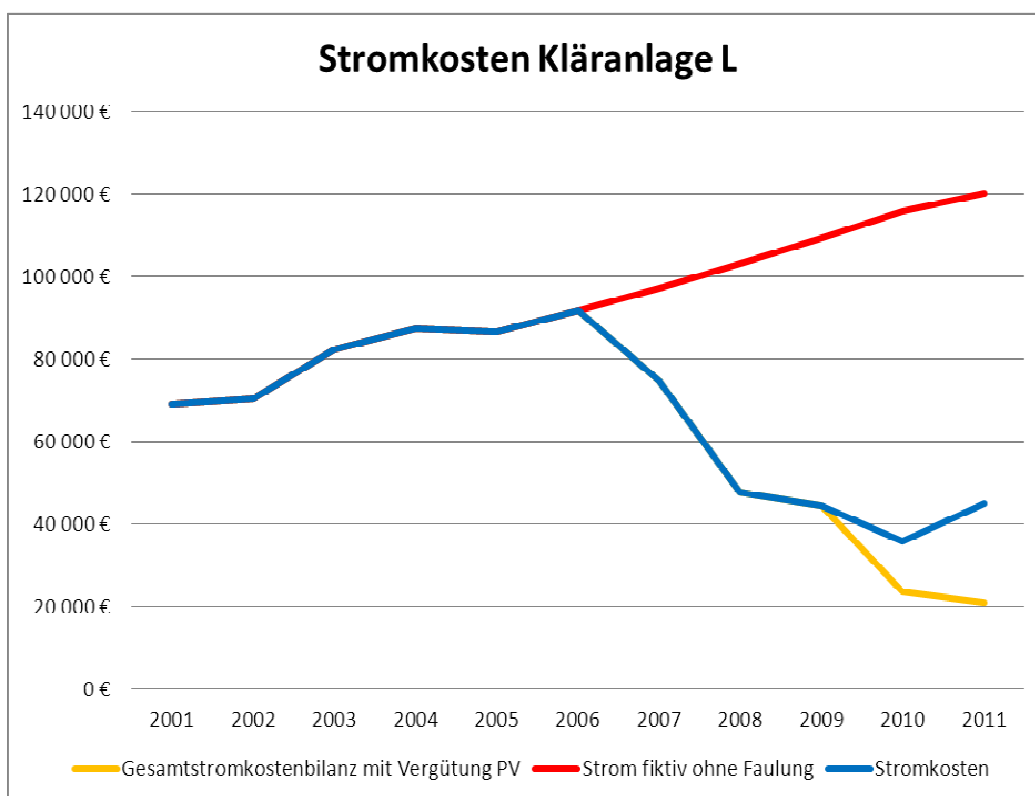


Abbildung 6: Stromkosten Kläranlage L

Die realen und die fiktiven Stromkosten ohne Faulung klaffen jedes Jahr weiter auseinander. Werden die Erlöse der auf den Dächern der Kläranlage installierten Photovoltaikanlage mit hinzugerechnet, verbessert sich diese Kostenbilanz noch mehr.

Auf der Suche nach weiteren Energieeinspar- und Produktionsmöglichkeiten wurde auch für diese Kläranlage der Strombedarf näher analysiert. Als große Stromverbraucher bleiben dann nur noch die zur Biologie gehörende Belüftung und die Rücklaufschlammumpen (Abbildung 7). Wie aus Tabelle 5 ersichtlich, ist das noch vorhandene Erzeugungs- und Einsparpotential gegenüber der Schlammfäulung wesentlich geringer. Die Maßnahme mit dem noch größten Potential, der Ersatz der Linienbelüftung aus den 80er Jahren durch eine flächendeckende Belüftung, konnte bisher wegen der Einsträngigkeit der Anlage nicht realisiert werden. Der Einbau in das bisher seit 25 Jahren ununterbrochen in Betrieb befindliche Belebungsbecken ohne Entleerung erschien allen als problematisch. Da auch die Nachklärung nur einfach vorhanden ist, ergibt sich hier das gleiche Problem.

Deshalb ist vorgesehen, nun die Kläranlage zweistraßig auszubauen und dann auch die Anforderungen des Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Mai 2000, zu erfüllen.

Tabelle 5: Energieerzeugungs- und Einsparmaßnahmen Kläranlage L (2008)

Massnahme	Beschreibung	Investitions-kosten	Energie-potential kWh/a	Bemerkung	Einsparung CO2-Em. To/a
Photovoltaik	25-50 kWp	150-300.000 €	24.500/49.000	Abhängigkeit Preis-entwicklung	17
Wasserkraft	Wasserrad	120.000 €	33.000		23
Solare Trocknung	2.500 m ²	1.375.000 €	600.000 (Verdampfung), 60.000 Transport	Abhängig von künftigen Entsorgungswegen	16
Erneuerung Belüftung	Flächendeckend, Membran	300.000	100.000	Abhängig Bau Belebungs 2	70
Optimierung Sandfang		5.000	5.000	Im Betrieb	
Zur Info Faulung	Strom und Wärme		580.000	umgesetzt	360

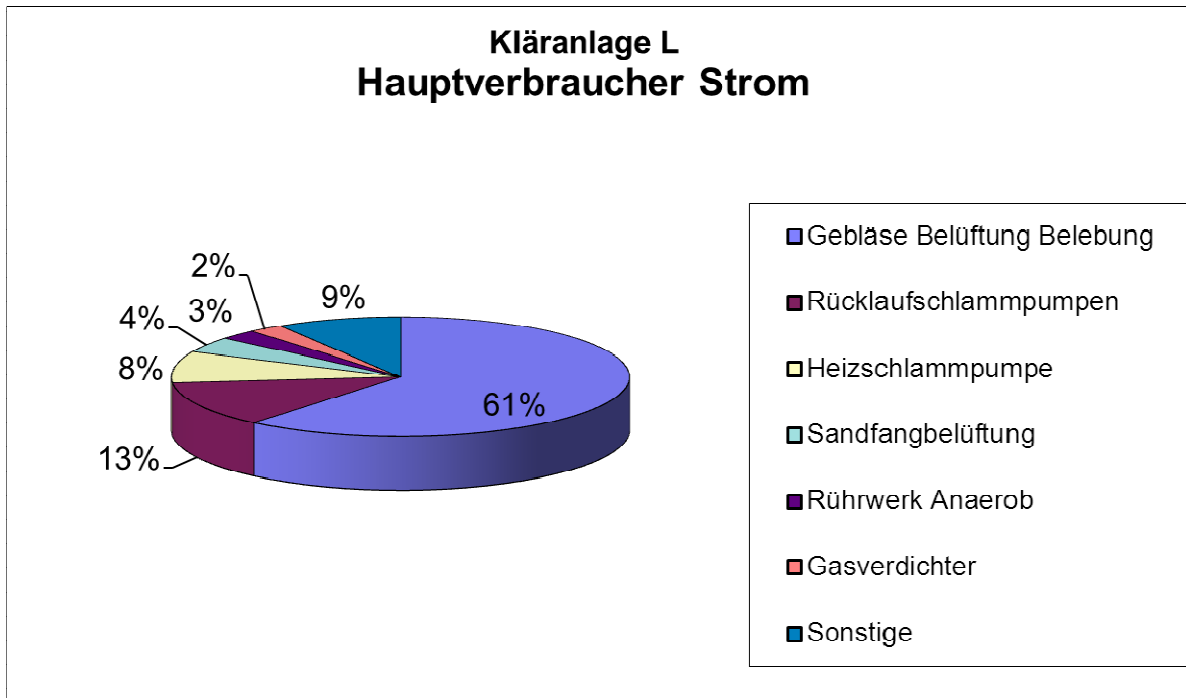


Abbildung 7: Kläranlage L Hauptverbraucher Strom

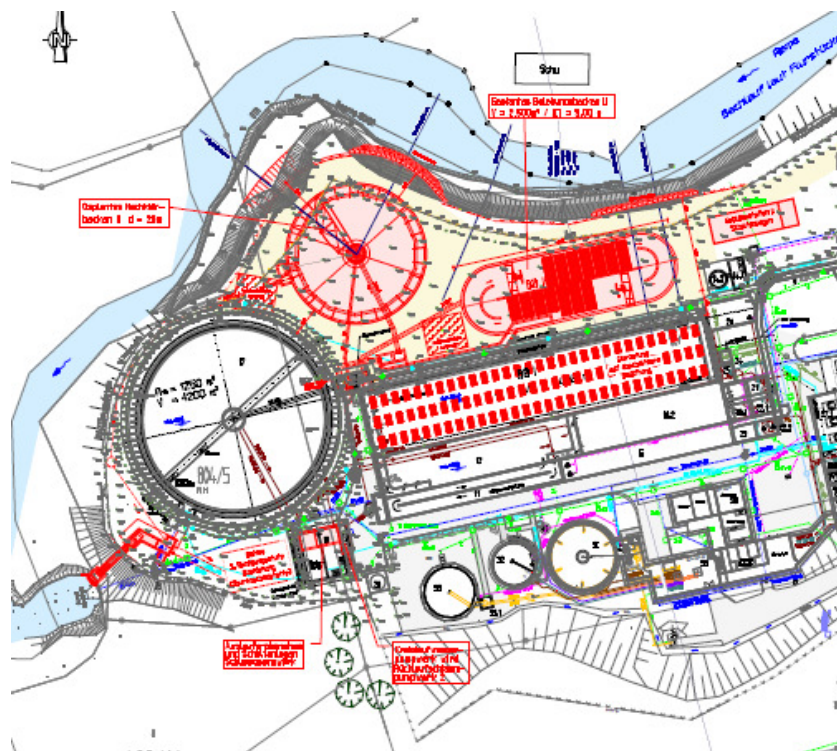


Abbildung 8: Ausbau Kläranlage L

Besonders charmant erschien dem Betreiber die Realisierung der Wasserkraftnutzung am Auslauf mit relativ geringen Investitionskosten gegenüber dem Ausbau der Kläranlage. Möglich ist die Wasserkraftnutzung durch einen ca. 3 m hohen Absturz nach dem Auslauf des Nachklärbeckens (siehe hierzu Abbildung 10).

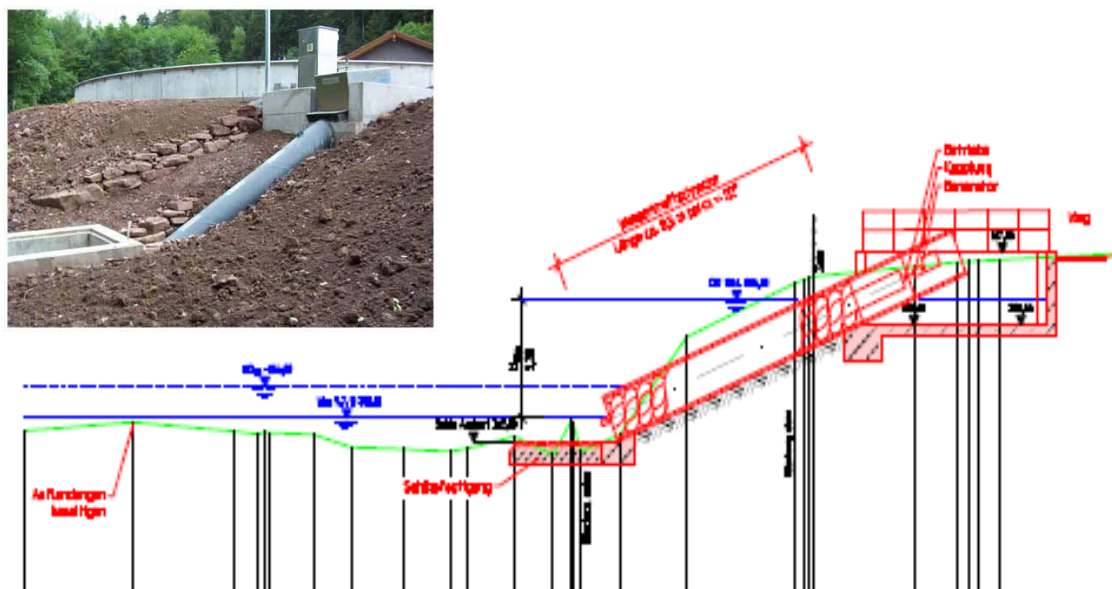


Abbildung 10: Wasserkraftschnecke Auslauf

Die Voruntersuchung ergab, dass ein Wasserrad oder eine Wasserkraftschnecke wirtschaftlich zu betreiben wäre (siehe Abbildung 9), eine Durchstromturbine wegen den höheren Investitionskosten jedoch nicht. Da sich bei der Ausschreibung höhere Kosten als die ursprünglich angesetzten 120.000 € ergaben, wurde vorerst auf eine Realisierung verzichtet. Der neue Amortisationszeitraum von > 40 Jahren erschien dabei als zu lang.

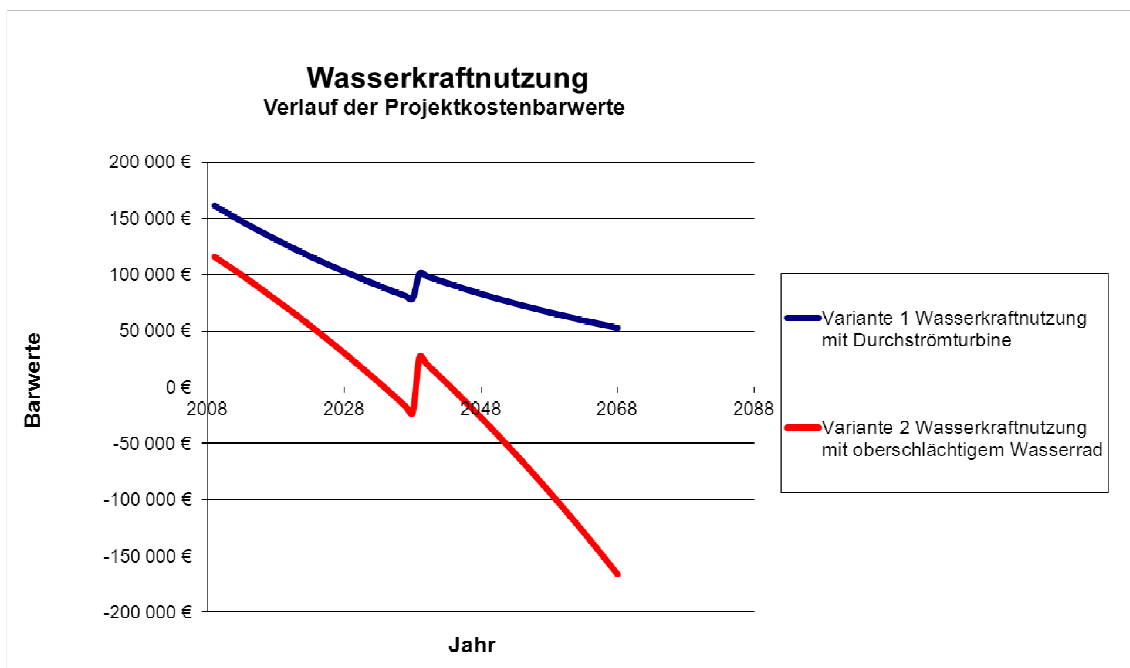


Abbildung 9: Wasserkraftnutzung Kläranlage L

Die Kläranlage S (Ausbaugröße 43.500 EW) ist eine Tropfkörperanlage mit vorgeschalteter anoxischer Belebung. Wie aus Abbildung 11 ersichtlich, sind die Hauptstromverbraucher neben den Tropfkörperpumpen die Rührwerke der anoxischen Zone (DN-Becken).

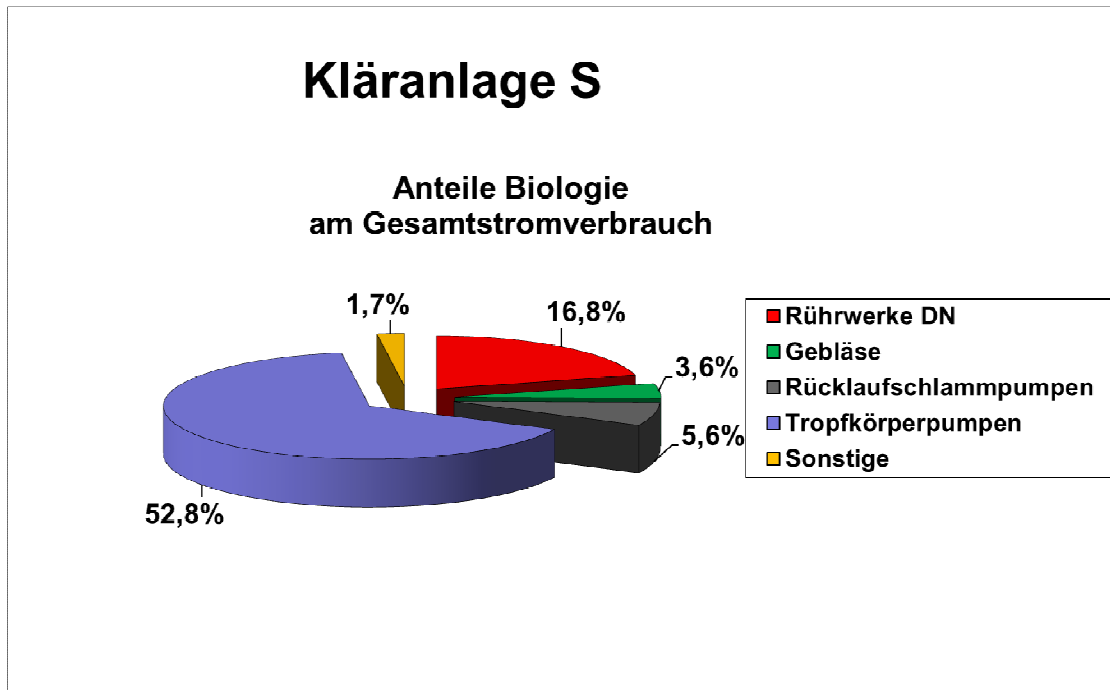


Abbildung 11: Kläranlage S Anteile Biologie am Gesamtstromverbrauch

Wird die Oberfläche des Beckens mit den an 24 h am Tag laufenden Rührwerken betrachtet, wird deutlich, dass durch Wirbel und Tromben ein nicht unerheblicher Teil der eingebrachten Energie nicht für die Strömung genutzt wird (siehe Abbildung 12). Die eingesetzten schnelllaufenden Rührwerke (siehe Abbildung 13) sind bekannt für ihren ineffizienten Energieeinsatz im Dauerbetrieb.



Abbildung 12: Oberfläche DN-Becken



Abbildung 13: Rührwerk DN-Becken

Der Hintergrund, warum dieser Rührwerkstyp hier eingesetzt wurde, wird ersichtlich, wenn man sich den Schnitt des DN-Beckens mit einer Wassertiefe von nur 1,9 m betrachtet (siehe Abbildung 14). Zum Zeitpunkt des Einbaus dieser Rührwerke waren langsam laufende Rührwerke für diese geringen Wassertiefen nicht verfügbar.

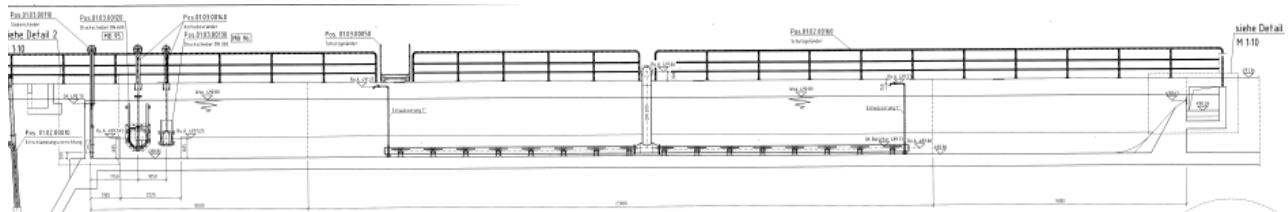


Abbildung 14: Schnitt DN-Becken

Tabelle 6: Kläranlage S Wirtschaftlichkeit Ersatz Rührwerke

Zusammenfassung	V0		V1.1		V1.2	V2.1	V2.2
	vorh. Rührwerke		neue Rührwerke				
			Fabrikat 1 ohne Leitwände	Fabrikat 1 mit Leitwände und Eckenausrundung	Fabrikat 2 ohne Leitwände	Fabrikat 2 nur mit Leitwände	
Anzahl Rührwerke			2	2	3	2	
Investitionskosten		---	30 000 €	110 000 €	50 000 €	90 000 €	
jährlicher Stromverbrauch	kWh/a	170 820	58 867	46 253	74 425	37 423	
Strompreis 0,21 €/kWh							
jährliche Stromkosten		35 872 €	12 362 €	9 713 €	15 629 €	7 859 €	
Jahreskosten mit Zinssatz 3% "konstante" Energiepreise		35 872 €	14 480 €	17 478 €	19 159 €	14 212 €	
Energiepreissteigerungen von 3%		45 581 €	17 825 €			16 339 €	
Reduzierung der CO2-Emission	to/a	---	72,8	81,0	62,7	86,7	

Wie Tabelle 6 zeigt, kann durch einen einfachen Ersatz der schnelllaufenden Rührwerke durch langsam laufende Rührwerke mit Propellerdurchmessern zwischen 1,2 – 1,4 m mehr als die Hälfte des jährlichen Stromverbrauchs eingespart werden (siehe Tabelle 6). Werden mit dem Einbau von Leitwänden und Eckausrundungen noch weitere Maßnahmen zur Strömungsführung und damit der Reduzierung des Energiebedarfs getroffen, kann der Energieeinsatz nochmal um ca. 40 % gesenkt werden.

Die gemessene Stromaufnahme der vorhandenen Rührwerke mit einer nominellen Wellenleistung von 5,5 kW ist dabei um ca. 20 % höher als der errechnete Stromverbrauch des Herstellers. Dies, wie auch die sehr unterschiedlichen Leistungs- und Verbrauchsangaben der Rührwerkshersteller zeigen, dass eine exakte Berechnung des erforderlichen Schubs und des Stromverbrauchs bisher nicht möglich sind und die Auslegung vor allem auf Erfahrungswerten beruht.

Ob die Leitwände wirtschaftlich sind, hängt anscheinend vom Rührwerkshersteller ab. Da eine sichere Entscheidung aufgrund dieser Planungsdaten nicht möglich war, werden die Rührwerke zurzeit ausgeschrieben, mit der Aufforderung an die Hersteller, einen garantierten Verbrauchswert abzugeben. Anhand dieser Verbrauchswerte und der daraus sich ergebenden Wirtschaftlichkeit wird dann über den Rührwerkstyp und die Anzahl entschieden.

Die Analyse der Tropfkörperbeschickung ergab, dass diese ganzjährig fast mit der gleichen Wassermenge zwischen 350 – 400 l/s betreiben wurde. Während sich über das Jahr im Mittel aus Trockenwetter und Regenwetter ein Rücklaufverhältnis von 1 ergab, steigt dies bei Trockenwetter bis zu 8 an. Da damit keine verfahrenstechnischen Vorteile verbunden sind, kann bei einer Reduzierung auf ein maximales Rücklaufverhältnis von 3 bis zu 100.000 kWh Strom eingespart werden. Die Realisierung ist durch eine einfache Umprogrammierung der Steuerung möglich.

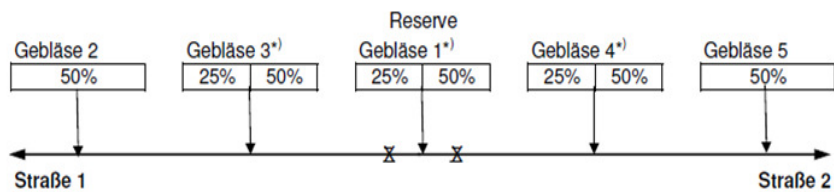


Abbildung 15: Tropfkörperpumpen Kläranlage S

Während die vom Ingenieurbüro zu erstellende Ausschreibung für die Rührwerke erfolgt ist, hinkt die Umsetzung der Steuerungsänderung noch hinterher. Grund ist die fehlende Zeit des für die Programmierung zuständigen Mitarbeiters des Entwässerungsbetriebs. Dies zeigt, dass manchmal die internen, einfachen Maßnahmen die schwierigsten sind.

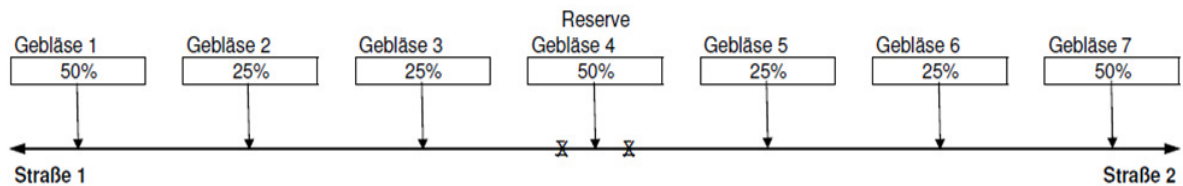
Dass sich auch bei einer relativ einfachen Ersatzbeschaffung bei Betrachtung energetischer Gesichtspunkte Änderungen ergeben können, zeigt das Beispiel Gebläseerneuerung auf der Kläranlage H (Ausbaugröße 80.000 EW). Während ursprünglich daran gedacht war, die in Abbildung 16 als Variante 1 beschriebene seitherige Anordnung 1 : 1 zu ersetzen, kam der Vorschlag eines Gebläseherstellers, die polumschaltbaren Gebläse durch zwei kleine Gebläse zu ersetzen (in Abbildung 16 als Variante 2 alternativ dargestellt).

Variante 1: Seitherige Anordnung



*) Gebläse 1, 3 u. 4 polumschaltbar

Variante 2: Alternative



alle Gebläse mit Festdrehzahl

Erläuterungen: 25% Die Prozentzahlen geben die Gebläseleistung bezogen auf die maximal erforderliche Luftzufuhr für eine Straße an.
 X Zuordnung der Reservegebläse zu Straße 1 oder 2 über entsprechende Schieberstellungen.

Abbildung 16: Gebläsekonfiguration Kläranlage H

Die sonst häufig gewählte Variante der Steuerung der Gebläse über ein FU war einerseits vom Betrieb nicht gewünscht wegen der zusätzlichen Störquelle und ist energetisch wegen der Verluste des Frequenzumformers ungünstiger. Die wirtschaftliche Bewertung in der Planungsphase (Tabelle 7) ergab, dass die Variante 2 trotz der höheren Investitionskosten aufgrund der etwas geringeren Energiekosten über die Nutzungsdauer von 15 Jahren wirtschaftlicher ist.

Tabelle 7: Wirtschaftlichkeit Gebläse Erneuerung Kläranlage H

	Variante 1	Variante 2
Anzahl Gebläse	5 Gebläse davon 3 mit polumschaltbaren Motoren	7 Gebläse alle Gebläse mit Festdrehzahl
Investitionskosten	130 000 €	150 000 €
jährliche Stromkosten	59 275 €	57 411 €
Nutzungsdauer	15 Jahre	
Projektkostenbarwert	868 432 €	851 786 €

Die Ermittlung des Stromverbrauchs erfolgte dabei über eine ermittelte mittlere Betriebsdauer für jedes Gebläse. Das Ergebnis überraschte uns, da sich die Wirkungsgrade der Gebläse um nur wenige Prozentpunkte unterschieden.

Auch bei der Angebotswertung wurde die Wirtschaftlichkeit über die Nutzungsdauer von 15 Jahren geprüft. Das Nebenangebot, auf das dann vergeben wurde, zeichnete sich dadurch aus, dass die Aufteilung der Gebläseleistung etwas gegenüber den ursprünglich vorgesehenen 50%, 25%, 25% verschoben war (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Kläranlage H Wirtschaftlichkeit Angebote Gebläse

	Fabrikat 1	Fabrikat 2 Nebenangebot	Fabrikat 2 Hauptangebot
Anzahl Gebläse	7 Gebläse	7 Gebläse	7 Gebläse
Wirtschaftlichkeit			
Investitionskosten	114 406 €	130 589 €	137 196 €
jährliche Stromkosten	58 028 €	55 545 €	56 356 €
Nutzungsdauer	15 Jahre		
Projektkostenbarwert	823 342 €	809 252 €	825 255 €
Jahreskosten	68 969 €	67 788 €	69 129 €

Dadurch konnten Gebläse eingesetzt werden, die an ihrem optimalen Betriebspunkt liefen. Die garantierten Stromverbrauchswerte wurden gemessen und konnten eingehalten werden. Hier zeigt sich, dass auch relativ kleine Unterschiede im Energieverbrauch über die Nutzungsdauer Mehrkosten bei den Investitionen rechtfertigen.

Literatur- und Quellennachweis

- [1] Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz – NawaS,
Zentrum für Innovative AbWassertechnologien an der TU Kaiserslautern, Schlussbericht
6. Dezember 2011