



Forschungsprojekt

Feststellung des energetischen Zustandes
der Membrankläranlagen Konzen und Woffelsbach
zur Ermittlung energetischer Kennzahlen für Plattenmembranmodule
und Verifizierung dieser Kennzahlen
im Rahmen einer umfassenden Feinanalyse

Copyright © Pöyry GWK GmbH

Alle Rechte vorbehalten. Weder Teile des Berichts noch der Bericht im Ganzen dürfen ohne die ausdrückliche schriftliche Genehmigung von Pöyry GWK GmbH in irgendeiner Form vervielfältigt werden.

Forschungsprojekt

Feststellung des energetischen Zustandes der Membrankläranlagen Konzen und Woffelsbach zur Ermittlung energetischer Kennzahlen für Plattenmembranmodule und Verifizierung dieser Kennzahlen im Rahmen einer umfassenden Feinanalyse

Auftraggeber:

Wasserverband Eifel-Rur
Eisenbahnstraße 5
52353 Düren

Verfasser:

Pöyry GWK GmbH
Kruppstraße 82
45145 Essen
Tel. 0201 82054-0
Fax 0201 82054-22
environment.essen.de@poyry.com
www.environment.poyry.de

Essen, den 11.12.2009

Pöyry GWK GmbH

i.V. Mauer

i.A. Simsheuser

Inhalt

1	VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG	7
1.1	Veranlassung	7
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	7
2	AUSLEGUNG DER MODELLANLAGE UND ERMITTLUNG DES THEORETISCHEN ENERGIEBEDARFS	10
2.1	Grundlagen	10
2.2	Berechnung des Energiebedarfs	16
2.2.1	Crossflow-Gebläse	17
2.2.2	Belüftung der Belebung	20
2.2.3	Rezirkulation	23
2.2.4	Permeatpumpen	24
2.2.5	Rührwerke	25
2.2.6	Bestimmung des gesamten Energieverbrauchs der Membranstufe	26
2.2.7	Hebwerke	27
2.2.8	Betrachtung der mechanischen Vorreinigung	28
2.2.9	Schlammbehandlung und Infrastruktur	29
2.2.10	Betrachtung des gesamten Energieverbrauchs	30
3	DATENERHEBUNG	33
3.1	Elektrische Verbraucher	33
3.2	Wärmeverbraucher	37
4	IST-ZUSTAND KLÄRWERK KONZEN	37
4.1	Datengrundlage	37
4.2	Kläranlagenbeschreibung	38
4.2.1	Allgemeines	38
4.2.2	Festlegung der Bezugsgröße	39
4.2.3	Beschreibung der Verfahrenstechnik	41
4.2.4	Überblick	45
4.3	Energieverbrauch und Energiekosten	46
4.4	Energieverbrauchermatrix	48
5	BEWERTUNG DES IST-ZUSTANDES KONZEN	54
6	MAßNAHMEN KONZEN	62
6.1	Bereits umgesetzte Maßnahmen	63
6.1.1	Betrieb des Sangfanggebläses auf kleiner Polstufe	63
6.2	Sofortmaßnahmen	64
6.3	Kurzfristige Maßnahmen	64
6.3.1	Austausch der Riemenscheibe am Sandfanggebläse – K1	64
6.3.2	Anpassung der Steuerung der Crossflow-Gebläse – K2	65

6.3.3	Erhöhung der Flussrate – K3	68
6.4	Abhängige Maßnahmen	70
6.4.1	Gesamtübersicht über die vorgeschlagenen Maßnahmen	70
7	RESULTATE IM ÜBERBLICK	71
7.1	Energiebilanz	71
7.2	Energiebezugskosten	72
7.3	Wirtschaftlichkeit	73
8	ZUSAMMENFASSUNG	74
9	IST-ZUSTAND KLÄRWERK WOFFELSBACH	77
9.1	Datengrundlage	77
9.2	Kläranlagenbeschreibung	77
9.2.1	Allgemeines	77
9.2.2	Festlegung der Bezugsgröße	79
9.2.3	Beschreibung der Verfahrenstechnik	81
9.2.4	Überblick	84
9.3	Energieverbrauch und Energiekosten	85
9.4	Energieverbrauchermatrix	87
10	BEWERTUNG IST- ZUSTAND WOFFELSBACH	94
11	MAßNAHMEN WOFFELSBACH	102
11.1	Bereits durchgeführte Maßnahmen	102
11.1.1	Außerbetriebnahme eines Rührwerks	102
11.2	Sofortmaßnahmen	102
11.3	Kurzfristige Maßnahmen	102
11.3.1	Anpassung der Steuerung der Membranfiltration – K1	102
11.3.2	Anpassung der Anwahl der Becken innerhalb einer Straße –K2	107
11.4	Abhängige Maßnahmen	108
11.4.1	Austausch des Rührwerks der Belebung - A1	108
11.5	Gesamtübersicht der vorgeschlagenen Maßnahmen	109
12	RESULTATE IM ÜBERBLICK	110
12.1	Energiebilanz	110
12.2	Energiebezugskosten	110
12.3	Wirtschaftlichkeit	112
13	ZUSAMMENFASSUNG	113
14	WEITERE MÖGLICHE EINSARPOTENZIALE FÜR BEIDE KLÄRANLAGEN	116

14.1	Permeatabzug unter Ausnutzung des Gravity-Flow	116
14.2	Erhöhung der Flussrate abhängig von der Abwassertemperatur	116
14.3	Verminderung des TS - Gehaltes bei steigender Temperatur	117
15	ZUSAMMENFASSUNG UND VERGLEICH MIT HOHLFASERMODULEN	119
16	VERZEICHNIS DER KURZZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	120
17	LITERATURVERZEICHNIS	123
18	TABELLEN- UND BILDVERZEICHNIS	125
18.1	Tabellenverzeichnis	125
18.2	Abbildungsverzeichnis	127

1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG

1.1 Veranlassung

Der Wasserverband Eifel-Rur beabsichtigt, im Rahmen eines vom Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) geförderten Forschungsvorhabens, die Klärwerke Konzen und Woffelsbach bezüglich ihres Strom- und Wärmebedarfs zu bilanzieren sowie eine Studie zur Energieoptimierung (energetische Feinanalyse) durchzuführen. Das Ingenieurbüro Pöyry GKW GmbH, Essen, wurde mit Schreiben vom 09.05.2008 mit diesen Aufgaben beauftragt.

Die Durchführung der Datenerhebung und die Untersuchungen zur energetischen Optimierung sollen gemäß der Vorgehensweise des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ des MUNLV durchgeführt werden. Die theoretische Herleitung von energiespezifischen Kennzahlen für Plattenmembranmodule erfolgt ebenfalls auf der Grundlage des Handbuchs. Durch weitere Literaturangaben und detaillierte Berechnungen werden diese Kennzahlen ermittelt und anschließend verifiziert.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zielsetzung

Ziel war es, für Membranbelebungsanlagen, speziell für Anlagen mit Plattenmodulen, Bewertungskriterien und spezifische Kennzahlen zu entwickeln. Diese sollten dann direkt am Beispiel der Klärwerke Konzen und Woffelsbach verifiziert werden.

Die zu entwickelnden Beurteilungskriterien sollten sich dabei an den entsprechenden Kennwerten des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV) für konventionelle Kläranlagen orientieren, um auf diese Weise eine Vergleichbarkeit von Membrankläranlagen und konventionellen Anlagen zu ermöglichen.

Insbesondere die Ergebnisse hinsichtlich der Herleitung theoretischer Idealwerte des Energiebedarfs für die Membranstufe wurden sorgfältig aufbereitet und am Beispiel der Membrankläranlagen Konzen und Woffelsbach verifiziert, sodass diese in Zukunft auch bei der energetischen Betrachtung anderer Kläranlagen mit Plattenmodulen als Basiswerte herangezogen werden können.

Es galt zu berücksichtigen, dass derzeit insbesondere die aus dem hohen Energiebedarf resultierenden hohen Betriebskosten einer weiteren Verbreitung der Membrantechnologie in Deutschland entgegenstehen. Im Zuge des Vorhabens sollten daher übertragbare Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs von Membrankläranlagen erarbeitet werden.

Analog zur Vorgehensweise für kommunale Kläranlagen wurden mögliche, betriebswirtschaftlich rentable Maßnahmen in Sofort-, Kurzfristige und Abhängige Maßnahmen (S, K, A) unterteilt und anhand einer Gegenüberstellung der jeweiligen Investitionskosten und der Energiekosteneinsparung bewertet. Die Untersuchung bietet dem Betreiber

somit eine Entscheidungsgrundlage für die Erstellung einer weitsichtigen Realisierungs- und Finanzplanung.

Die energetische Untersuchung betrachtet detailliert die gesamte energetische Situation der Klärwerke Konzen und Woffelsbach und beschränkt sich nicht nur auf die Anlagenteile der Membranbelebung.

Folgende Ziele bzw. Ergebnisse sollten erreicht werden:

- Zusammenstellung des gesamten Energieverbrauchs aller Verbraucher und der zugehörigen Energiekosten
- Ermittlung von Kennzahlen und Berechnung des theoretischen Energiebedarfs
- Bewertung der tatsächlichen energetischen Situation des Klärwerks
- Aufzeigen von möglichen Sofortmaßnahmen
- Auflisten kurzfristiger und abhängiger Energiesparmaßnahmen einschl. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Investitionskosten, Energiekosteneinsparung)
- Empfehlung der weiteren Vorgehensweise (Dringlichkeit, Ausführungsplanung)

Nachfolgend wird die Vorgehensweise beschrieben:

Datenerhebung Strom/Wärme

Bei den Analysen wurden zunächst der Strom- und Wärmeverbrauch erhoben und nach definierten Anlagenbereichen bilanziert. Um die Analysen durchführen zu können, wurden für alle Anlagenteile bzw. elektrischen Verbraucher die Leistungsaufnahmen bzw. der Stromverbrauch durch örtliches Messen bzw. durch Ablesen von Typenschildern ermittelt. Zusätzlich wurden die seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellten Informationen, wie Stromrechnungen, Verbrauchsmittelrechnungen, Monatsberichte und Planunterlagen des Klärwerks, ausgewertet.

Kennzahlenermittlung allgemein und Membranstufe

Im Anschluss an die ausführliche Datenaufnahme und Aufteilung des Energiebedarfs auf die einzelnen Verfahrensstufen erfolgte bei der Vorgehensweise gemäß dem Handbuch des MUNLV zur Beurteilung des energetischen Ist-Zustandes zunächst ein Vergleich mit den im Handbuch dargestellten Kennzahlen. Dabei wird normalerweise zwischen Richt- und Idealwerten unterschieden. Die Richtwerte sind das Ergebnis einer statistischen Auswertung bestehender Feinanalysen und stellen Werte dar, die unter realen Bedingungen tatsächlich erreicht werden können. Die Idealwerte dagegen entstammen theoretischen Betrachtungen an einer Modellanlage und können lediglich unter optimalen Voraussetzungen erreicht werden. Allerdings sind im Handbuch noch keine Werte für Membranbelebungsanlagen genannt, sodass diese für die membranspezifischen Anlagenteile und Verfahrensstufen noch zu ermitteln waren.

Da die bisherige Anzahl von Membrankläranlagen für eine statistische Ableitung von Richtwerten nicht ausreicht, wurden zunächst, analog zu dem im Handbuch „Energie in

Kläranlagen“ beschriebenen Vorgehen bei konventionellen Kläranlagen, theoretische Idealwerte für eine Membrankläranlage mit den eingesetzten Plattenmodulen vom Typ Kubota EK400 ermittelt. Hierfür wurde, gedanklich unabhängig von äußeren Einflüssen (Topographie etc.), eine optimale Membrankläranlage konstruiert und deren Energiebedarf errechnet. Für die Beurteilung der einzutragenden Energie wurde auf eigene Erfahrungen vom Wasserverband Eifel-Rur und Pöyry GWK mit Membrankläranlagen, Herstellerangaben und Fachveröffentlichungen zurückgegriffen. Dabei sind insbesondere die ausführlichen Erfahrungen, die der Wasserband Eifel-Rur seit Inbetriebnahme der Klärwerke Konzen und Woffelsbach sammeln konnte, hervorzuheben. Hieraus ergeben sich nach derzeitigem Stand gute Chancen, den Energiebedarf der Module noch unter die Herstellerangaben abzusenken.

Die Werte der Membranstufe wurden dabei entsprechend den membranspezifischen Anlagenteilen separat aufgenommen und spezifiziert. Die Kennzahlen (und auch die Auswertung der aufgenommenen Daten des Ist-Zustandes für diesen Bereich) gliedern sich in die folgenden Untergruppen:

- Permeatabzug einschl. Relaxation
- Crossflow-Belüftung
- Rezirkulation
- Reinigung.

Um zumindest eine Abschätzung von Richtwerten zu ermöglichen, wurden in der Folge zunächst die Richtwerte für konventionelle Kläranlagen um die Werte für das System Biologie (Belebung und Nachklärung) verringert, um diese im Anschluss um die für Membrankläranlagen spezifischen Werte für das System Membranbelebung (Belebung und Membranstufe inkl. Crossflow-Belüftung und Reinigung) zu ergänzen.

Die Kennwertermittlung wurde dabei systematisch durchgeführt und sorgfältig dokumentiert. Es erfolgte dabei eine Darlegung aller energetisch relevanten Funktionsprinzipien der eingesetzten Membranmodule. Somit können die ermittelten Werte künftig als Grundlage für die energetische Optimierung weiterer Anlagen dienen. Im Anschluss an die Herleitung konnte die Energieoptimierung gemäß der im Handbuch beschriebenen Vorgehensweise fortgesetzt werden.

Ermittlung eventueller Mängel vor Ort

Auf Basis des Kennzahlenvergleichs wurde eine Analyse für die Kläranlagen Konzen und Woffelsbach durchgeführt und mögliche Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs entwickelt. Bei den Anlagenbegehungen wurden die Erfahrungen des Betriebspersonals abgefragt und bei den Analysen berücksichtigt. Die Durchführbarkeit einzelner Maßnahmen wurde aus technischer Sicht mit dem Betriebspersonal abgestimmt.

2 AUSLEGUNG DER MODELLANLAGE UND ERMITTLUNG DES THEORETISCHEN ENERGIEBEDARFS

Da für Membranbelebungsanlagen im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ bislang keine energetischen Vergleichswerte genannt sind, war es zur energetischen Beurteilung der Kläranlage Konzen und Woffelsbach zunächst erforderlich, theoretische Vergleichswerte zu erarbeiten. Zu diesem Zweck wurde zum einen die verfügbare Literatur mit Angaben zum Energiebedarf verschiedener realer Membranbelebungsanlagen ausgewertet. Zum anderen wurde, in Anlehnung an die Vorgehensweise im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MUNLV, 1999], eine energetisch optimale Membranbelebungsanlage – eine sogenannte Modellanlage – konzipiert.

Bei der Auslegung, der Bemessung und der Ermittlung des theoretischen Energiebedarfs der idealen Modellanlage wurde eng nach dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ vorgegangen. Dort wurde eine konventionelle Modellanlage mit ähnlicher Auslegungsgröße berechnet und dargestellt. Um eine optimale Vergleichbarkeit zur konventionellen Modellanlage im Handbuch zu ermöglichen, wurden die dortigen spezifischen Ansätze (diese werden im Folgenden erläutert) für einwohnerspezifische Wassermengen und Schmutzfrachten übernommen. Analog zum Handbuch wird die Modellanlage auf eine Ausbaugröße von 10.000 EW bemessen. Für die Berechnung des Energieverbrauches wird anschließend ein kleinerer Wert gewählt, in diesem Falle 7.000 EW, der die tatsächlich angeschlossenen Einwohner abbildet. Diese Größenordnung bietet im Anschluss einen direkten Vergleich mit den Klärwerken Konzen und Woffelsbach.

Neue Modellansätze wurden für die membranspezifischen Anlagenteile (Crossflow-Gebläse, Permeatpumpen etc.) entwickelt. Diese wurden mit bereits vorhandenen Fachbeiträgen zum Thema Energiebedarf von Membranbelebungsanlagen [bspw. Krause, 2005; Verrecht et al. 2008] abgeglichen. Für alle nicht spezifischen Anlagenteile wurden die Ansätze des Handbuches nach einer Plausibilitätsprüfung übernommen.

2.1 Grundlagen

Wassermengen

Im Handbuch werden mehrere Modellanlagen unterschiedlicher Ausbaugrößen vorgestellt. Um einen Abgleich zwischen Anlagen derselben Größenordnung zu ermöglichen, werden die Grundlagenansätze der auf 14.000 EW ausgelegten konventionellen Modellanlage übernommen, die die angesetzten 10.000 EW am besten darstellt. Die daraus folgenden Angaben für den spezifischen Schmutz- und Fremdwasseranfall (s. Tabelle 2.1) wurden nach Vorgaben des Handbuches übertragen und angepasst, ebenso der errechnete maximale Mischwasserabfluss:

$$Q_M = 2 \cdot Q_s + Q_f \text{ [l/s].}$$

Da das Klärwerk Konzen sehr hohe Fremdwassermengen hat, wird zu Vergleichszwecken die Modellanlage im Mischwasserfall geprüft. Dieser ist energetisch betrachtet deutlich günstiger, da durch längere Filtrationszeiten im Membranbecken auch mehr Sauerstoff für die Belebungsbecken angerechnet werden kann.

Im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ wird im Jahresmittel, zusätzlich zu Schmutz- und Fremdwasser, ein Regenwasseranfall von 70 l/(EW·d) angesetzt. Insgesamt ergibt sich somit ein Mischwasserzufluss im Jahresmittel von 257,5 l/(EW·d). Die von Krause [2005] erstellte Modellanlage ist auf einen spezifischen Wasserzufluss von 200 l/(EW·d) ausgelegt. Für die Bemessung der Modellanlage ist aber der Trockenwetterzufluss maßgebend. Die grundlegenden Daten und Wassermengen sind in Tabelle 2-1 dargestellt:

Tabelle 2-1: Wassermengen für die Bemessung der Modellanlage

<u>Einwohnerwerte</u>		Bemessung
Einwohnerwerte angeschlossen an KA	EW	10.000 [EW]
<u>Wassermengen</u>		
Schmutzwasseranfall	qs	125 [l/(EWd)]
Fremdwasseranfall	qf	62,5 [l/(EWd)]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	Q _{S,aM}	1.250 [m ³ /d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	Q _{F,aM}	625 [m ³ /d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	Q _{S,aM}	14,47 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	Q _{F,aM}	7,23 [l/s]
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q _{T,aM}	21,70 [l/s]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q _{T,d,aM}	1.875 [m ³ /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	Q _{T,2h,max}	41,96 [l/s]
maximaler Mischwasserabfluss	Q _M	76,68 [l/s]
<u>Schmutzfrachten im Zulauf zur Kläranlage</u>		
einwohnerspezifische BSB ₅ -Fracht	B _{BSB,spez}	60 [g/(EWd)]
einwohnerspezifische CSB-Fracht	B _{CSB,spez}	120 [g/(EWd)]
einwohnerspezifische TS-Fracht	B _{TS,spez}	70 [g/(EWd)]
einwohnerspezifische TKN-Fracht	B _{TKN,spez}	11 [g/(EWd)]
einwohnerspezifische P-Fracht	B _{P,spez}	1,8 [g/(EWd)]
BSB ₅ -Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,BSB,Z}	600 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,CSB,Z}	1.200 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,TS,Z}	700 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,TKN,Z}	110 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,P,Z}	18 [kg/d]

Im Vergleich zu den Ist-Werten der Kläranlage Konzen (Tabelle 4-1) zeigt sich, dass der tägliche Wasseranfall bei Trockenwetter der Modellanlage deutlich niedriger ist, als der tatsächliche Wert. Auch der tägliche Mischwasseranfall ist in der Modellanlage geringer. Dies sieht man an den hohen Niederschlagsmengen und den Zuflüssen durch Fremdwasser in Konzen. So ergibt sich in Konzen ein Jahresmittel für Mischwasserabfluss von 5.826 m³/d im Vergleich zu 2.575 m³/d, die sich für die Modellanlage ergeben.

Auf die Auswirkungen für den Energieverbrauch wird in späteren Kapiteln eingegangen.

Frachten und Konzentrationen

Die Werte der einwohnerspezifischen Frachten wurden gemäß den Vorgaben des ATV-DVWK-Arbeitsblattes 131 [ATV-DVWK, 2000] verwendet. Für die maßgebenden Schmutz- und Nährstoffparameter, außer dem aus energetischer Sicht untergeordneten Phosphor, decken sich diese mit den Ansätzen des Handbuchs.

Nach Errechnung der Frachten konnten über die tägliche Trockenwetterwassermenge die bemessungsrelevanten Konzentrationen errechnet werden (siehe folgende Tabelle). Für die Anteile von Ammonium-N und organisch N am TKN wurde ein für kommunale Kläranlagen typisches Verhältnis von 7,5/3,5 angesetzt.

Tabelle 2-2: Bemessungskonzentrationen und zugehörige Frachten

<u>Einwohnerwerte</u>		Bemessung
Einwohnerwerte angeschlossen an KA	EW	10.000 [EW]
<u>Wassermengen</u>		
Schmutzwasseranfall	qs	125 [l/(EWd)]
Fremdwasseranfall	qf	62,5 [l/(EWd)]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	Q _{S,aM}	1.250 [m ³ /d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	Q _{F,aM}	625 [m ³ /d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	Q _{S,aM}	14,47 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	Q _{F,aM}	7,23 [l/s]
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q _{T,aM}	21,70 [l/s]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q _{T,d,aM}	1.875 [m ³ /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	Q _{T,2h,max}	41,96 [l/s]
maximaler Mischwasserabfluss	Q _M	76,68 [l/s]
<u>Schmutzfrachten im Zulauf zur Kläranlage</u>		
einwohnerspezifische BSB ₅ -Fracht	B _{BSB,spez}	60 [g/(EWd)]
einwohnerspezifische CSB-Fracht	B _{CSB,spez}	120 [g/(EWd)]
einwohnerspezifische TS-Fracht	B _{TS,spez}	70 [g/(EWd)]
einwohnerspezifische TKN-Fracht	B _{TKN,spez}	11 [g/(EWd)]
einwohnerspezifische P-Fracht	B _{P,spez}	1,8 [g/(EWd)]
BSB ₅ -Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,BSB,Z}	600 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,CSB,Z}	1.200 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,TS,Z}	700 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,TKN,Z}	110 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur KA	B _{d,P,Z}	18 [kg/d]
<u>Konzentrationen im Zulauf zur Belebung</u>		
BSB ₅ -Konzentration im Zulauf zur Belebung	C _{BSB,ZB}	320,0 [mg/l]
CSB-Konzentration im Zulauf zur Belebung	C _{CSB,ZB}	640,0 [mg/l]
TS-Konzentration im Zulauf zur Belebung	X _{TS,ZB}	373,3 [mg/l]
TKN-Konzentration im Zulauf zur Belebung	C _{TKN,ZB}	58,7 [mg/l]
NH ₄ -N-Konzentration im Zulauf zur Belebung	S _{NH₄,ZB}	40,0 [mg/l]
org. N-Konzentration im Zulauf zur Belebung	S _{orgN,ZB}	18,7 [mg/l]
P-Konzentration im Zulauf zur Belebung	C _{P,ZB}	9,6 [mg/l]

Die Kläranlage Konzen dient als Grundlage für die Erstellung der Modellanlage. Im weiteren Verlauf werden somit alle ermittelten Werte auf die Ist-Werte in Konzen bezogen. Die Kläranlage Woffelsbach wird im späteren Verlauf mit der Modellanlage verglichen. Die gewählten Auslegungsfrachten liegen im Bereich zwischen den auf der

Kläranlage Konzen gemessenen Mittelwerten und den 85 %-Quantilen. Diese sind in Tabelle 2-3 dargestellt:

Tabelle 2-3: Mittelwerte und 85 %-Quantile der Tagesfrachten der KA Konzen

		CSB	N _{ges}	NH ₄ -N	P _{ges}
Probenzahl	[-]	323	323	323	322
Mittelwert der Tagesfrachten	[kg/d]	1.175	105	48	17
85 %-Quantil der Tagesfrachten	[kg/d]	1.433	135	59	24

Bemessung der biologischen Stufe

Wie auch im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ und nach Empfehlung des Handbuchs „Abwasserreinigung mit Membrantechnik“ [MUNLV, 2003], wurde das Volumen des Belebungsbeckens mittels Hochschulgruppenansatz berechnet [Böhnke et al., 1989; Dohmann et al., 1993]. Der TS-Gehalt im Ablauf der Belebung wurde nach Literaturangaben [MUNLV, 2003] zu 10 g/l gewählt. Die Berechnungen zur Auslegung der Belebung beziehen sich auf eine Temperatur von 12 °C. Die vollständigen Berechnungstabellen zum Hochschulgruppenansatz inkl. aller Berechnungsparameter befinden sich in der Anlage 1. Als wesentlicher Unterschied zum Handbuch erfolgte die Auslegung der MBR-Modellanlage als Belebungsanlage mit aerober Stabilisierung und damit auf ein Schlammalter $t_{TS} = 25$ d, da bislang nahezu alle Membranbelebungsanlagen in dieser Form konzipiert sind.

Tabelle 2-4: Ergebnisse der Bemessung des erforderlichen Belebungsvolumens nach HSG

<u>Berechnung der Beckenvolumina</u>		
zu nitrifizierende Stickstoffkonzentration	N _{n,m}	49,36 [mg/l]
Hilfsgröße P	P	315,75 [g/m ³]
Raumbeschickung	q _R	1,114 [m ³ /(m ³ ·d)]
erforderliches Gesamtvolumen der Belebung	V	1.683,9 [m ³]
erforderliches aerobes Volumen der Belebung	V _N	1.049 [m ³]
erforderliches anoxisches Volumen der Belebung	V _D	635 [m ³]

Das Belebungsbecken teilt sich in eine Denitrifikations- und eine Nitrifikationszone auf. Analog zur Kläranlage Konzen wird dann anschließend die Membranfiltration in einem separaten Becken angeordnet. Belebung und Membranfiltration werden also räumlich getrennt betrachtet. Eine Anrechnung des in der Membranfiltration vorhandenen Nitrifikationsvolumens erfolgt nicht.

$$V_{BB} = 1.684 \text{ m}^3$$

$$V_N = 1.049 \text{ m}^3$$

$$V_{DN} = 635 \text{ m}^3$$

Im Anschluss an die Berechnungen der biologischen Reinigung über den Hochschulgruppenansatz wurde die Membranfiltration dimensioniert.

Membrankassetten

Das Klärwerk Konzen ist mit Membranmodulen vom Hersteller Kubota ausgerüstet. Um die Modellanlage mit der Kläranlage Konzen vergleichen zu können, wurden für die Berechnung Plattenmodule vom Typ Kubota EK 400 gewählt. Ein wichtiger Faktor zur Auslegung der Membrananlage ist der Fluss, mit dem die Anlage betrieben wird. Dabei wird zwischen Brutto- und Netto-Fluss unterschieden. Der Netto-Fluss ist kleiner und berücksichtigt Pausenzeiten bzw. Rückspülzeiten. Der Brutto-Fluss stellt den Fluss während der Filtrationsdauer dar. Der Netto-Fluss wurde zur Auslegung und zur Vergleichbarkeit mit der Kläranlage Konzen nach Angaben des Wasserverbands Eifel-Rur zu 22,5 l/(m²·h) gewählt. Er liegt damit unterhalb des Auslegungswertes von 25 l/(m²·h), der im Handbuch „Membrantechnik für die Abwasserreinigung“ genannt wird. Für den tatsächlichen Betrieb und die Ermittlung des Energiebedarfs der Modellanlage wird an späterer Stelle allerdings ein Brutto-Fluss von 32,0 l/(m²·h) angesetzt. Dieser ist in Konzen während der Filtrationsphasen bei höhenstandsgeregeltem Abzug vorhanden. Mit den nach dem Handbuch berechneten Wassermengen und dem gewählten Fluss kann nun die Membrananlage bemessen werden.

Gewählt: Netto-Flux: $v_{F, netto} = 22,5 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h)}$

Dadurch lässt sich die erforderliche Membranfläche wie folgt ermitteln:

$$\begin{aligned} A_M &= Q_M \cdot 3.600 / v_{F, netto} \\ &= 74,38 \cdot 3.600 / 22,5 = 11.900 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

Mit Hilfe von Modulinformationen zum Kubota EK 400, sogenannte Facts Sheets, die vom Hersteller zur Verfügung gestellt wurden, ist es nun möglich, die Anzahl der erforderlichen Membrankassetten zu bestimmen:

Gewählt: 40 Kubota-Doppeldeckermodule EK 400 mit 400 Platten pro Modul

Transmembrandruck:	ΔP_{TM}	=	50 – 200 (400)	mbar
Trenngrenze:		=	0,4	μm
Membranfläche je Modul	A_{Mod}	=	320	m ²
Membranfläche gesamt:	A_M	=	12.800	m ²
Luftbedarf pro Kasette:		=	165-240	Nm ³ /h

Die 40 Module wurden gewählt, da sie sowohl die geforderte Membranfläche decken als auch symmetrisch und ähnlich der Kläranlage Konzen in die Modellanlage eingebracht werden können. Gewählt wurden insgesamt 8 Straßen. In jeder Straße befinden sich somit 5 Doppeldeckermodule.

Die Beckengröße der Membranbelegung ergibt sich aus der Anzahl und den Abmessungen der benötigten Module. Für die gewählten 40 Module, angeordnet in 8 Straßen mit je 5 Modulen, ergibt sich ein gewähltes Beckenvolumen von:

$$V_{\text{MBR}} = 6,5 \cdot 4,25 \cdot 4,5 \cdot 8 = 955 \text{ m}^3.$$

Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt:

Tabelle 2-5: Dimensionierung der Membranfiltration

<u>Wassermengen</u>		
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{\text{T,d,aM}}$	1.875 [m ³ /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{\text{T,2h,max}}$	41,96 [l/s]
maximaler Mischwasserabfluss nach Ausgleichsbecken	Q_{M}	76,68 [l/s]
<u>Eingabedaten</u>		
Bemessungsfluss bei 10 °C (netto)	$V_{\text{F,netto}}$	22,5 [l/(m ² ·h)]
Zuschlag für Reinigung etc. (für Brutto-Fläche)	F	1,00 [-]
Packungsdichte Module im eingebauten Zustand	V_{Pack}	12 [m ² /m ³]
spez. Luftbedarf Crossflow	$Q_{\text{L,CF,s}}$	0,75 [Nm ³ /(m ² ·h)]
<u>Rezirkulation und TS-Gehalt</u>		
TS-Gehalt Belegung	TS_{R}	10,00 [g/l]
Rezirkulationsverhältnis	RZ	6 [-]
TS-Gehalt Membranbecken	TS_{MBR}	11,67 [g/l]
<u>Bemessung Membran</u>		
erforderliche Membranfläche	A_{M}	12.269 [m ²]
erforderliches Volumen Membrantank	V_{M}	995 [m ³]
Luftbedarf Crossflow	$Q_{\text{L,CF}}$	9.201 [Nm ³ /h]

2.2 Berechnung des Energiebedarfs

Zur Bestimmung des gesamten Energiebedarfs der Membranstufe werden die einzelnen Hauptverbraucher genauer betrachtet. Entgegen der bisherigen Anlagenbemessung mit 10.000 EW (Auslegungsgröße), wird die Modellanlage analog zum Handbuch für die Energiebetrachtung nur mit 7.000 EW ausgelegt (angeschlossene Einwohner). Wie zuvor erwähnt, wird zur Berechnung des Energieverbrauchs der Fluss auf 32,0 l/(m²·h) gesetzt, da dieser energetisch günstig ist und eine kurze Laufzeit der Crossflow-Gebläse bewirkt.

Tabelle 2-6: Wassermengen für 7.000 angeschlossene Einwohner

<u>Einwohnerwerte</u>		Bemessung
Einwohnerwerte angeschlossen an KA	EW	7.000 [EW]
<u>Wassermengen</u>		
Schmutzwasseranfall	q_s	125 [l/(EW·d)]
Fremdwasseranfall	q_f	62,5 [l/(EW·d)]
Niederschlagswasser	q_r	70,0 [l/(EW·d)]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	875 [m ³ /d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	438 [m ³ /d]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,M}$	490 [m ³ /d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	10,13 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	5,06 [l/s]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,M}$	5,67 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,aM}$	20,86 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	1.803 [m ³ /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	29,37 [l/s]
maximaler Mischwasserabfluss	Q_M	53,67 [l/s]

2.2.1 Crossflow-Gebläse

Die Belüftung der Membranmodule reduziert die Deckschichtbildung auf den Membranplatten. Die Crossflow-Belüftung beseitigt durch Scherwirkung kleinste Partikel und vermindert so ein Verblocken der Platten. Energetisch betrachtet, bilden die Gebläse zur Crossflow-Belüftung den größten Teil des Energieverbrauches.

Zur wirksamen Abreinigung der Deckschicht der Membrane wird der Filtrationsprozess nach 9 Minuten für 1 Minute unterbrochen (Relaxation). Während dieser Minute werden die Permeatpumpen abgeschaltet und der Saugdruck fällt ab. Die Membranoberfläche entspannt sich und die Oberfläche kann durch die weiter andauernde Belüftung besser gereinigt werden. Die Anforderung und das Abschalten der verschiedenen Membranstraßen erfolgt in Abhängigkeit der Zulaufmenge. Ist eine Straße angefordert, erfolgt die Regelung des Permeatabzugs in Abhängigkeit des Höhenstandes im jeweiligen Becken. Es wird bis zum Erreichen eines definierten minimalen Wasserstandes filtriert, danach wird pausiert, bis bei Erreichen eines definierten maximalen Wasserspiegels der Filtrationszyklus erneut beginnt. Unmittelbar vor dem Starten des Filtrationszyklusses erfolgt noch eine kurze Vorbelüftung von etwa einer Minute zur Abreinigung der Membranoberfläche, bevor die Filtration einsetzt. Ziel der Verfahrensgebung ist es, während der Filtrationszyklen mit einem möglichst hohen Fluss zu filtrieren, um die Laufzeit der Crossflow-Gebläse zu minimieren.

Im Folgenden wird der Energieverbrauch der Crossflow-Gebläse ermittelt. Zu beachten ist, dass durch den Eintrag der Luft mittels Crossflow-Belüftung ein gewisser Anteil der

erforderlichen Sauerstoffmenge für die Belebung gedeckt wird. Auf diesen Aspekt wird im weiteren Verlauf genauer eingegangen.

Nach Auskunft des Herstellers Kubota [Instruction Manual for Submerged Membrane Unit, 2004] beträgt der Luftbedarf für EK 400 unabhängig vom Fluss:

$$Q_{L,M} = 168 - 240 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Bezogen auf die Oberfläche des Doppeldeckermoduls beträgt die spezifische Luftmenge dann:

$$Q_{L,M, \text{spez}} = 240 / 320 = 0,75 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2).$$

Dieser Wert lässt sich auch durch eine Veröffentlichung in der Fachzeitschrift Water Research [Verrecht et al., 2008] bestimmen und vergleichen:

$$Q_{L, \text{Verrecht}} = \text{SAD}_M \cdot A_M [\text{m}^3/\text{h}].$$

Wobei SAD_M die spezifische benötigte Luftmenge, bezogen auf die Membranfläche, ist. Hierzu wird ein Wertebereich von 0,75 bis 1,2 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ vorgegeben. Für einen Wert von 0,75 ergibt sich demnach:

$$Q_{L, \text{Verrecht}} = 0,75 \cdot 320 = 240,0 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Durch die gute Übereinstimmung mit dem berechneten Wert nach Verrecht, wird ein Luftertrag von 240 m^3/h als Grundlage gewählt, auch wenn aus energetischer Sicht auch ein geringerer Eintrag von 168 m^3/h genügen würde. In seiner Veröffentlichung rät Verrecht zusätzlich, die Intensität der Crossflow-Belüftung in Abhängigkeit des Flusses zu regulieren. So soll bei geringen Zuflüssen durch eine geringere Intensität der Crossflow-Belüftung Energie gespart werden. Dies stellt durchaus eine Option zur Energieeinsparung dar. Unter Berücksichtigung der Herstellervorgaben für die meisten Membranmodule, die konkrete Luftmengen für einen gewährleistungsgemäßen Betrieb vorgeben, scheint eine solche Regelung aber nicht zweckmäßig, da ansonsten bei bestehenden Anlagen ggf. Gewährleistungsansprüche verloren gehen können. Hier ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden. Für die energetisch optimale Membrananlage wird daher, wie oben erläutert, das Konzept verfolgt, durch möglichst hohe Flüsse bei der vorgegebenen Belüftungsintensität die Filtrationsdauer und damit die Laufzeit der Crossflow-Gebläse zu minimieren.

Für die weitere Berechnung wird daher der gegebene Herstellerwert von 240 m^3/h angesetzt. Der Luftbedarf der Crossflow-Gebläse einer Straße kann somit ermittelt werden:

$$\begin{aligned} Q_{L, \text{CF, str}} &= Q_{L,M} \cdot 5 \\ &= 240 \cdot 5 = 1.200 \text{ m}^3/\text{h}. \end{aligned}$$

Die Formel zur Berechnung der Gebläseleistung lautet nach dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MUNLV, 1999] wie folgt:

$$P = (Q_{L, \text{CF, str}} \cdot \Delta p) / (\eta_G \cdot 367).$$

Der Wirkungsgrad η_G wird nach Handbuchangaben zu 60 % gewählt. Die Einblastiefe, und somit das Δp , ergibt sich aus den Angaben der Unterlagen des Kubota EK 400 Moduls [Instruction Manual for Submerged Membrane Unit, 2004]. Mindestens 30 cm über den Modulen müssen mit Wasser bedeckt sein. Aus der Höhe der Module von etwa 3,50 m ergibt sich die Einblastiefe in etwa zu:

$$\Delta p = 4,00 \text{ m.}$$

Die Gebläseleistung einer Straße lässt sich demnach zu

$$P_{CF, str} = (1.200 \cdot 4,00) / (0,6 \cdot 367) = 21,80 \text{ kW}$$

bestimmen. Für die Belüftung der Membrane wurde für jede Straße ein Gebläse gewählt. Der Gesamtenergieverbrauch der Crossflow-Gebläse beträgt somit:

$$\begin{aligned} P_{CF} &= P_{CF, str} \cdot 8 \\ &= 21,80 \cdot 8 = 174,4 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Die Filtrationsdauer ist für die Energiebilanz der Membranbelegung von großer Bedeutung. Um das Permeat filtrieren zu können, müssen die Membranen belüftet werden. Bei der Ermittlung der Gebläselaufzeit ist die Vorbelüftungszeit (ca. 1 Minute) zu berücksichtigen. Welchen Einfluss diese hat, ist maßgeblich von der mittleren Filtrationsdauer abhängig, die aber theoretisch nicht zu ermitteln ist. Eine Auswertung der Betriebsdaten der KA Konzen zeigte für einen Tag mit mittlerer hydraulischer Belastung eine durchschnittliche Dauer der Filtrationsintervalle in jeder Straße von ca. 9 min. Diese wird auch für die weiteren Betrachtungen angesetzt.

Wie im Folgenden noch gezeigt wird, ergeben sich für die energetischen Betrachtungen der Membranstufe wesentliche Unterschiede bei Trocken- und bei Regenwetter, da bei Regenwetter theoretisch der gesamte Sauerstoffbedarf der Belegung aus den Crossflow-Gebläsen gedeckt wird. Generalisierte Aussagen zu den hydraulischen Belastungssituationen verschiedener bestehender MBR-Anlagen sind nur bedingt machbar. Die im Folgenden ermittelten Energiebedarfswerte beziehen sich, aufgrund des hohen Fremdwasseranfalls im Klärwerk Konzen, daher immer auf das Jahresmittel bei Mischwasserzufluss. Im Trockenwetterfall werden sich höhere spez. Energieverbräuche einstellen als bei Regenwetter.

Die tägliche Laufzeit der Crossflow-Gebläse lässt sich unter den genannten Voraussetzungen anhand der Wassermenge und des Flusses wie folgt bestimmen:

$$\begin{aligned} t_{G,CF} &= Q_{M,d,AM} / (A_M \cdot v_{F,brutto} / 1.000) (9 + 1) / 9 \\ t_{G,CF} &= 1.803 / (12.800 \cdot 32,0 / 1.000) 10 / 9 = 4,89 \text{ h/d.} \end{aligned}$$

Durch die errechnete gesamte Gebläseleistung und die Gebläselaufzeit eines Tages ist es nun möglich den Jahresenergieverbrauch der Crossflow-Gebläse zu berechnen:

$$\begin{aligned} E_{a,CF} &= P_{CF} \cdot t_{G,CF} \cdot 365 \\ &= 174,4 \cdot 4,89 \cdot 365 = 311.278 \text{ kWh/a.} \end{aligned}$$

Bezogen auf die Jahreswassermenge bei Mischwasser ergibt sich der spezifische Energieverbrauch zu:

$$\begin{aligned} E_{\text{spez,CF}} &= E_{\text{a,CF}} / (Q_{\text{M,d,AM}} \cdot 365) \\ &= 311.278 / (1.803 \cdot 365) = 0,47 \text{ kWh/m}^3. \end{aligned}$$

2.2.2 Belüftung der Belebung

Der erforderliche Sauerstoffbedarf des Belebungsbeckens wird zum Teil bereits durch die Crossflow-Belüftung der Membranmodule gedeckt. Es muss also nicht mehr die gesamte Sauerstoffmenge durch die Belebungsgebläse gestellt werden, sondern die erforderliche Gesamtsauerstoffmenge abzüglich des anrechenbaren Sauerstoffs der Crossflow-Gebläse.

Die von den 8 Crossflow-Gebläsen eingetragene Luftmenge eines Tages wird in Abhängigkeit der Gebläselaufzeit bestimmt zu:

$$Q_{\text{L,d}} = Q_{\text{L,CF}} \cdot t_{\text{G}} = 9.600 \cdot 4,89 = 46.944 \text{ m}^3/\text{d}.$$

Mit Literaturangaben [Verrecht et al., 2008] und herstellerepezifischen Angaben von Kubota lässt sich der Sauerstoffeintrag der Crossflow-Belüftung für eine Temperatur von 20 °C bestimmen.

$$m_{\text{O}} = \rho_{\text{Luft}} \cdot \text{OTE} \cdot \alpha \cdot (\% \text{ O}_2 \text{ in Luft} / 100)$$

Dabei stellt der OTE (oxygen transfer efficiency) den Sauerstoffeintrag in % pro Meter dar. Der α -Wert wird von Kubota bei einer Einblastiefe von 4 m zu 0,5 angegeben. Setzt man alle bekannten Werte ein, so erhält man:

$$m_{\text{O}} = 1.204 \cdot 0,015 \cdot 0,5 \cdot (23,135 / 100) = 2,09 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}).$$

Laut Literaturangaben [Krause, 2005] beträgt der gemessene Sauerstoffeintrag der Crossflow-Belüftung eines MBR unter Betriebsbedingungen 3,5 g/(m³·m) (für eine Temperatur von 20 °C). Dieser Wert dient als Vergleich, bezieht sich aber auf eine Modellanlage mit Hohlfasermembranen. Für Plattenmodule gibt es bisher keinen Vergleichswert.

In der verwendeten Literaturquelle [Verrecht et al., 2008] wird dieser Wert zum Sauerstoffeintrag ebenfalls berechnet, ohne herstellerepezifische Werte zu verwenden. Mit den dort angegebenen Werten ergibt sich:

$$\begin{aligned} m_{\text{O}} &= \rho_{\text{Luft}} \cdot 0,025 \cdot \alpha \cdot 0,95 \cdot 1,024^T \cdot (\% \text{ O}_2 \text{ in Luft} / 100) \\ &= 1.204 \cdot 0,025 \cdot 0,43 \cdot 0,95 \cdot 1,024^{20} \cdot (23,135 / 100) \\ &= 4,81 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}). \end{aligned}$$

α wird hier in Abhängigkeit vom TS-Gehalt bestimmt. Für einen TS Gehalt von 10 g/l erhält man nach gegebener Formel [Verrecht et al., 2008]:

$$\alpha = e^{(-0,084 \cdot TS)} = e^{(-0,084 \cdot 10)} = 0,43.$$

Die drei Werte zum Sauerstoffeintrag gleichen sich zwar nicht, liegen aber in etwa in einer Größenordnung, sodass der berechnete Wert von 2,09 g/(m³·m) für die weitere Berechnung verwendet werden kann.

Die Sauerstoffmenge der Crossflow-Belüftung eines Tages lässt sich anschließend berechnen zu:

$$\begin{aligned} \alpha OC_{CF} &= \alpha OC_{L,h} \cdot h \cdot Q_{L,d} / 1.000 \\ &= 2,09 \cdot 4 \cdot 46.944 / 1.000 = 392,4 \text{ kgO}_2/\text{d}. \end{aligned}$$

Die mittlere täglich erforderliche Sauerstoffzufuhr für eine Temperatur von 20 °C wurde nach ATV-DVWK A 131 berechnet zu (detaillierte Tabelle siehe Anlage 1):

$$\alpha OC_d = 855,70 \text{ kgO}_2/\text{d}.$$

Betrachtet man nun den im Mittel stündlich benötigten Sauerstoff, so erhält man:

$$\alpha OC_h = 855,70 / 24 = 35,65 \text{ kgO}_2/\text{h}.$$

Anhand der Filtrationsdauer von 4,89 Stunden am Tag und der Sauerstoffmenge der Crossflow-Belüftung lässt sich auch der stündliche Eintrag bestimmen:

$$\begin{aligned} \alpha OC_{CF,h} &= \alpha OC_{CF} / t_{G,CF} \\ &= 392,4 / 4,89 = 80,26 \text{ kgO}_2/\text{h}. \end{aligned}$$

Es wird also durch die Crossflow-Belüftung pro Stunde mehr Sauerstoff eingetragen als eigentlich benötigt wird. Die überschüssige Menge Sauerstoff geht somit verloren und kann nicht angerechnet werden.

Die tatsächlich anrechenbare Sauerstoffmenge ist somit:

$$\alpha OC_{CF,d} = 35,65 \cdot 4,89 = 174,3 \text{ kgO}_2/\text{d}.$$

In das Belebungsbecken muss nun noch folgende Sauerstoffmenge eingetragen werden:

$$\begin{aligned} \alpha OC_{BB} &= \alpha OC_d - \alpha OC_{CF,d} \\ &= 855,70 - 174,3 = 681,4 \text{ kgO}_2/\text{d}. \end{aligned}$$

Dieser Wert ergibt sich bei der Betrachtung nur unter der Voraussetzung, dass alle Membranbecken in Betrieb sind. Bei einer vorhandenen Regelung wie in Konzen oder Woffelsbach und der Tatsache, dass häufig nur einzelne Becken in Betrieb sind, kann mehr Crossflow-Sauerstoff für die Belebungsanlage angerechnet werden. Da dieser Vorgang aber schwierig in einer Rechnung darzustellen ist, wird für die Modellanlage der oben genannte Ansatz verwendet.

Im Handbuch "Biologische und weitergehende Abwasserreinigung" [ATV, 1997] ist ein Wert OP zum Sauerstofftrag gegeben. Dieser bezieht sich allerdings auf die Sauer-

stoffmenge in Reinwasser. Um mit Hilfe dieses Wertes den Energieverbrauch der Belebungsgebläse berechnen zu können, muss zunächst die Sauerstoffmenge in Bezug auf Reinwasser umgerechnet werden. Diese Umrechnung geschieht mittels des Grenzflächenfaktors α_{BB} .

Der Grenzflächenfaktor beträgt nach Angaben der ATV DVWK A 131 und dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MUNLV, 1999] 0,69. In Anbetracht des hohen TS-Gehaltes wird dieser Wert mittels eines Diagramms [MUNLV, 2003] abgemindert.

$$\alpha_{BB} = 0,65$$

Die auf Abwasser bezogene Sauerstoffmenge ergibt sich somit zu:

$$OC_R = \alpha OC_{BB} / \alpha_{BB} = 681,4 / 0,65 = 1.048,26 \text{ kgO}_2/\text{d.}$$

Im Handbuch „Biologische und weitergehende Abwasserreinigung“ [ATV, 1997] wird dieser Sauerstofftrag für Plattenbelüfter bestimmt zu:

$$OP = 3,90 \text{ kg/kWh.}$$

Mittels dieser Angabe ist der spezifische Energieverbrauch der Belebungsgebläse bestimmbar.

$$\begin{aligned} E_{a, BB} &= OC_R / OP \cdot 365 \\ &= 1.048,26 / 3,90 \cdot 365 = 98.106,4 \text{ kWh/a} \end{aligned}$$

$$E_{\text{spez}, BB} = 98.106,4 / (1.803 \cdot 365) = 0,15 \text{ kWh/m}^3.$$

Zur Überprüfung kann die im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MUNLV, 1999] angegebene Formel zur Berechnung des Energieverbrauchs der Gebläse verwendet werden:

$$E_{\text{spez}, BB^*} = (Q_L \cdot \Delta p) / (\eta_G \cdot 367).$$

Dabei wird die Eintauchtiefe Δp zu 4,5 m gewählt und der Wirkungsgrad η_G nach dem Handbuch zu 60 % gewählt. Die eingetragene Luftmenge Q_L muss zunächst noch bestimmt werden. Die benötigte Sauerstoffmenge beträgt 1.048,26 kgO₂/d. Durch eine feinblasige Belüftung (Herstellerangaben Messner Plattenbelüfter) können etwa 18,0 g/(m³·m) Sauerstoff eingetragen werden. Dieser Wert deckt sich mit dem im ATV-Handbuch „Biologische und weitergehende Abwasserreinigung“ [ATV, 2000] gegebenen Wertebereich von 17 – 22 g/(Nm³·m). Es ergibt sich somit eine Luftmenge von:

$$Q_L = OC_R / (\Delta p \cdot 18,0 / 1.000) = 12.941 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$E_{\text{spez}, BB^*} = (12.941 \cdot 4,5) / (0,6 \cdot 367) = 264 \text{ kWh/d} = 96.360 \text{ kWh/a.}$$

Der ermittelte Kontrollwert hat die gleiche Größenordnung wie der berechnete Verbrauch der Gebläse in der Modellanlage und verifiziert damit die vorhandene Rechnung.

2.2.3 Rezirkulation

Durch die räumlich getrennte Betrachtung des Belebungsbeckens und der Membranfiltration, müssen an dieser Stelle zwei Arten der Rezirkulation betrachtet werden. Zum einen die interne Rezirkulation innerhalb des Belebungsbeckens, zum anderen die Rezirkulation aus der Membranfiltration zurück in die Belebung.

Die Auslegung der Rezirkulationspumpen erfolgt in Abhängigkeit der Mischwassermenge.

Interne Rezirkulation

Die Rezirkulation innerhalb des Belebungsbeckens berechnet sich über die Jahresmischwassermenge. Die Förderhöhe beträgt laut Betriebsanweisung aus Konzen 0,2 m:

$$Q_a = 1.803 \cdot 365 = 657.913,0 \text{ m}^3/\text{a}$$

$$h_{\text{int}} = 0,2 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\eta_G = 50 \%$$

Die interne Rückföhrtrate kann aus der Berechnung nach Hochschulgruppenansatz (Anlage 1) entnommen werden. Diese ergibt sich zu 3,4. Nach Literaturwerten [weitergehende Abwasserreinigung, 1995] wird ein Wertebereich von 0,5 - 4 als Rückföhrtrate angegeben. Für die Berechnung der Modellanlage wird an dieser Stelle der Literaturwert verwendet.

$$RZ = 4$$

$$Q_{a,RZ} = Q_a \cdot RZ = 657.913 \cdot 4 = 2.631.652 \text{ m}^3/\text{a}$$

$$\begin{aligned} Q_{RZ} &= Q_{a,RZ} / (365 \cdot 24 \cdot 3.600) \\ &= 2.631.652 / (365 \cdot 24 \cdot 3.600) \\ &= 0,08 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Daraus lässt sich die benötigte Leistung berechnen zu

$$\begin{aligned} P_{RZ,int} &= (h_{\text{int}} \cdot Q_{RZ} \cdot g) / \eta_G \\ &= (0,2 \cdot 0,08 \cdot 9,81) / 0,5 = 0,33 \text{ kW} \end{aligned}$$

und anschließend umwandeln in die benötigte Energie

$$E_{a,RZ,int} = 8.760 \cdot 0,33 = 2.869 \text{ kWh/a}$$

$$E_{\text{spez},RZ,int} = 2.869 / 657.913 = 0,004 \text{ kWh/m}^3$$

Rezirkulation aus MBR

Zur Begrenzung des TS-Gradienten innerhalb der Anlage und um unnötig hohe TS-Gehalte im Membranbelebungsbecken zu vermeiden, wird ein für Membranbelebungsanlagen übliches Rezirkulationsverhältnis von 6 der energetischen Beurteilung zu Grunde gelegt. Die Berechnung der Pumpenleistung verläuft analog und die Wassermengen bleiben gleich. Die Förderhöhe wird nun an dieser Stelle anders gewählt. Ähnlich des Klärwerks Konzen wird die Höhe zu 1,30 m gewählt und damit die spezifische Energie berechnet.

$$E_{\text{spez,RZ,ext}} = 0,043 \text{ kWh/m}^3$$

Der gesamte Energieverbrauch setzt sich nun aus interner und externer Rezirkulation zusammen:

$$E_{\text{spez,RZ}} = 0,004 \text{ kWh/m}^3 + 0,043 \text{ kWh/m}^3 = 0,046 \text{ kWh/m}^3.$$

2.2.4 Permeatpumpen

Bei Betrachtung des Energieverbrauchs der Pumpen muss beachtet werden, dass die Pumpen während des Filtrationsprozesses für eine gewisse Zeitspanne abgeschaltet werden, damit sich die Membranoberfläche entspannen kann. Dadurch lässt sich durch die weiterhin vorhandene Crossflow-Belüftung die Oberfläche leichter reinigen. Laut Angaben vom Klärwerk Konzen wird der Filtrationsprozess alle 9 Minuten für eine Minute unterbrochen.

Um die Leistung und anschließend die Energieaufnahme der Permeatpumpen bestimmen zu können, wird zuerst das Verhältnis von Brutto- zu Netto-Fluss genauer betrachtet. Eine Filtrationsphase der Membranstufe wird gemäß Herstellerangaben zu 9 Minuten gewählt, die Relaxationsphase zu 1 Minute.

Ermittlung des Brutto-/Netto-Verhältnisses:

Der Netto-Fluss ist mit $v_{F,\text{brutto}} = 32 \text{ l/(m}^2\text{h)}$ gegeben.

$$v_{F,\text{brutto}} = 32 \text{ l/(m}^2\text{h)} = 0,533 \text{ l/(m}^2\text{min)}$$

$$t_F = 9 \text{ min}$$

$$t_{RX} = 1 \text{ min}$$

Zur Berechnung des Brutto-/Netto-Verhältnisses wird folgende Formel verwendet:

$$v_{F,\text{brutto}}/v_{F,\text{netto}} = (t_{RX} + t_F)/t_F$$

Bei gegebenem Brutto-Fluss lässt sich die Formel umstellen nach

$$v_{F,\text{netto}} = (v_{F,\text{brutto}} \cdot t_F)/(t_{RX} + t_F)$$

$$v_{F,\text{netto}} = (0,533 \cdot 9) / (9 + 1)$$

$$= 0,48 \text{ l}/(\text{m}^2\text{min})$$

$$V_{F,\text{netto}} = 28,80 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h}).$$

Das Verhältnis Brutto-/Netto Fluss beträgt somit:

$$V_{F,\text{brutto}} / V_{F,\text{netto}} = 32,0/28,8 = 0,9$$

Filtrieren:

Für die Berechnung des Energieverbrauchs der Permeatpumpen wird die Formel zur Leistungsberechnung aus Kapitel 2.2.1 verwendet.

Der Saugdruck der Permeatpumpen beträgt auf der Kläranlage Konzen ca.

$$\Delta p_s = 0,2 \text{ bar} = 2,0 \text{ m}.$$

Dieser Wert wird auch für die Modellanlage verwendet. Auch auf den vorhandenen Datenblättern des Herstellers Kubota wird der Druck zu max. 20 kPa angegeben, was bis zu max. 20 mbar entspricht. Unterhalb dieses Maximalwertes befindet sich auch der gewählte Saugdruck.

Der Gesamtwirkungsgrad wird hier zu 60 % gewählt. Durch diese Angaben lassen sich nun die erforderliche Leistung und die Energie des Abpumpvorganges bestimmen:

$$P_{PP} = (\Delta p_s \cdot Q_{M,d,aM} \cdot g) / \eta_G$$

$$P_{PP} = (2 \cdot 0,02 \cdot 9,81) / 0,6 = 0,65 \text{ kW}$$

$$E_{a,PP} = 8.760 \cdot P_{PP} = 8.760 \cdot 0,65 = 5.694,0 \text{ kWh/a}$$

$$E_{\text{spez,PP}} = 5.694,0 / 657.913 = 0,009 \text{ kWh/m}^3.$$

2.2.5 **Rührwerke**

Die Auslegung der Rührwerke erfolgt in Abhängigkeit des Beckenvolumens. Innerhalb der belüfteten Zone ist keine Umwälzung durch Rührwerke nötig. Das Volumen der unbelüfteten Denitrifikationszone ergibt sich nach Berechnung mit Hochschulgruppenansatz zu:

$$V_D = 635 \text{ m}^3.$$

Im Handbuch "Energie in Kläranlagen" [MUNLV, 1999] wird für den Energiebedarf der Rührwerke ein Wert zwischen 1,5 und 2 Watt pro m³ Volumen bei optimalen Beckenabmessungen angegeben. Inzwischen wird dieser Wert laut verschiedenen Herstellern auch unterschritten (ca. 1,2 W/m³). Da auf der Kläranlage Konzen die Rührwerke lediglich ein Sedimentieren des Belebtschlammes vermeiden sollen, und nicht für eine vollständige Durchmischung eines Beckens zuständig sind, darf hier der kleinere Wert von 1,5 Watt pro m³ angenommen werden.

Es ist davon auszugehen, dass bei geometrisch optimaler Beckengestaltung in den Denitrifikations- und Nitrifikationszonen ein Energieeintrag $< 2 \text{ W/m}^3$ ausreichend ist

$$E_{d,RW} = V_{BB} \cdot 1,5 = 635 \cdot 1,5 = 952 \text{ W/d.}$$

Auf ein ganzes Jahr hochgerechnet ergibt sich somit ein Wert von:

$$E_{a,RW} = E_{d,RW} \cdot 365 = 952 \cdot 8.760 / 1000 = 8.340 \text{ kWh/a.}$$

Der spezifische Energieverbrauch der Rührwerke errechnet sich zu:

$$\begin{aligned} E_{\text{spez,RW}} &= E_{a,RW} / Q_{M,d,AM} \\ &= 8.340 / (1.803 \cdot 365) \\ &= 0,000013 \text{ kWh/m}^3. \end{aligned}$$

2.2.6 Bestimmung des gesamten Energieverbrauchs der Membranstufe

Der gesamte Energieverbrauch der Belebung und der Membranfiltration der Modellanlage ergibt sich aus der Summe der Energiewerte der einzelnen Verbraucher. Für Überschussschlamm und Reinigung werden hier keine Zuschläge berücksichtigt, da auch der gemessene prozentuale Anteil auf der Kläranlage Konzen gleich Null ist.

$$\begin{aligned} E_{\text{ges}} &= E_{\text{spez,CF}} + E_{\text{spez,BB}} + E_{\text{spez,PP}} + E_{\text{spez,RZ,int}} + E_{\text{spez,RZ,ext}} + E_{\text{spez,RW}} \\ &= 0,47 + 0,15 + 0,008 + 0,004 + 0,043 + 0,000012 \\ &= 0,68 \text{ kWh/m}^3 \end{aligned}$$

Vergleich der berechneten Werte mit bekannten Werten anderer Kläranlagen

Um die nun ermittelten Idealwerte der erstellten Modellanlage hinsichtlich ihrer Plausibilität einschätzen und verifizieren zu können, werden die ermittelten Daten denen anderer Membranbelebungsanlagen gegenübergestellt. Neben den bekannten Daten des Klärwerks Konzen wurden durch Literaturrecherche zusätzlich unterschiedliche Kläranlagen ausgewählt. So wurde bereits in einer Dissertation der TU Darmstadt eine ähnlich aufgebaute Modellanlage, allerdings mit Hohlfasermodule, entwickelt [Krause, 2005]. Des Weiteren waren Daten der Kläranlage Markranstädt und Mittelwerte in einem DWA-Arbeitsbericht [DWA, 2005] zu finden. Aufgrund der nicht immer gleichen Datengrundlage werden in manchen Fällen in der Modellanlage einzeln betrachtete Verfahrensschritte energetisch zusammengefasst, z. B. Permeat- und Rezirkulationspumpen. Abbildung 2-1 stellt die einzelnen Ergebnisse einander gegenüber:

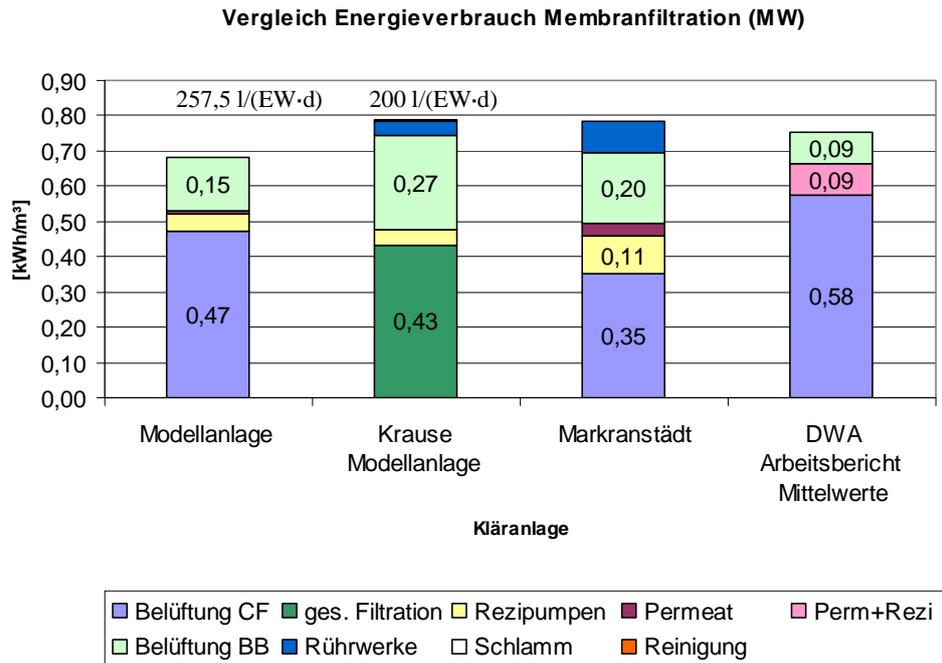


Abbildung 2-1: Vergleich der Energieverbräuche unterschiedlicher Modellanlagen

Die theoretisch ermittelten Werte für die Modellanlage liegen deutlich unter den von Krause [2005] ermittelten Werten. Dies liegt an den unterschiedlichen zu Grunde liegenden Wassermengen. Nach dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ ergibt sich für die Modellanlage eine Wassermenge von 257,5 l/(EW·d) und Krause hat für seine Anlage 200 l/(EW·d) als Grundlage angesetzt. Die ermittelten Werte sind allerdings unter normalem Betrieb und oft nicht idealen Gegebenheiten nicht einzuhalten. Alle realen Betriebswerte liegen darüber. Die ermittelten Werte sind daher im Sinne des Handbuches „Energie in Kläranlagen“ als Ideal- und nicht als Richtwerte zu verstehen. Richtwerte sind aufgrund der geringen Anzahl von Membrankläranlagen statistisch nicht ermittelbar.

2.2.7

Hebwerke

Das ankommende Abwasser muss zunächst häufig aus topografischen Gründen angehoben werden. Für Abwasserhebwerke im Zulauf der Kläranlage wird im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MUNLV, 1999] bereits eine Aussage zum Energieverbrauch getroffen. Für eine dort angenommene Förderhöhe von 3 m ergibt sich:

$$E_{\text{spez,H}} = 13,9 \text{ Wh/m}^3.$$

Zum Vergleich berechnen wir den Energieverbrauch des Hebwerks nach gegebener Formel [Krause, 2005].

Die allgemeine Gleichung zur Ermittlung des Leistungsbedarfs von Pumpen lautet

$$P = (\rho \cdot g \cdot Q \cdot h) / \eta,$$

wobei die Wasserdichte zu $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$ und die Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ bekannt sind. Als Wassermenge betrachten wir die gegebene Jahreswassermenge

$$Q_a = 657.913 \text{ m}^3/\text{a.}$$

Die Förderhöhe wird an dieser Stelle nach Angaben im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MUNLV, 1999] zu 3 m gewählt:

$$h = 3 \text{ m.}$$

Der Gesamtwirkungsgrad des Hebewerkes wird zu 70 % angesetzt. Somit ergibt sich für den Energieverbrauch des Hebewerkes:

$$\begin{aligned} P &= (1.000 \cdot 9,81 \cdot 657.913 \cdot 3) / 0,7 \text{ J} \\ &= 7.683,48 \text{ kWh/a.} \end{aligned}$$

Dies bezogen auf die Wassermenge ergibt:

$$E_{\text{spez,H}} = 11,68 \text{ Wh/m}^3.$$

Für die weitere Rechnung verwenden wir aber den etwas höheren und energetisch ungünstigeren Wert des Handbuches

Im Folgenden ist dargestellt, wie sich der Energiebedarf einer ideal gedachten mechanischen Vorreinigung zusammensetzt. Im Vergleich dazu werden anschließend die Werte vom Klärwerk Konzen und die Werte von Krause verglichen.

2.2.8 Betrachtung der mechanischen Vorreinigung

Zur Elimination gröberer Bestandteile wird der Abwasserstrom zunächst mechanisch behandelt. Absetzbare Stoffe werden hier entfernt. Bei einer konventionellen Kläranlage geschieht dies meist zunächst durch die Hintereinanderschaltung von Rechen und Sandfang mit nachfolgendem Vorklärbecken. Bei einer Kläranlage mit Membranfiltration muss das Wasser möglichst frei von Feststoffen sein, damit die Funktionstüchtigkeit der Membrane gewährleistet wird. Befinden sich zu viele grobe Bestandteile im Abwasser, so kommt es zu Verblockungen und Verzopfungen der Membranen. Die Filtrationsleistung wird deutlich verringert. Im Gegensatz zu Hohlfasermodulen, die nach Rechen, Sand- und Fettfang noch eine zusätzliche Feinsiebung mit einer Spaltweite $< 1 \text{ mm}$ benötigen, brauchen Plattenmodule laut „Membrantechnik für die Abwasserreinigung“ [MUNLV, 2003] keine weitere Siebung. Erfahrungen haben gezeigt, dass Plattenmodule weniger anfällig für Verzopfungen sind und demnach eine konventionelle Vorbehandlung mit einem 3 mm Rechen ausreichend ist.

Rechen und Sandfang

Für Rechen und Sandfang finden sich im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MUNLV, 1999] bereits errechnete spezifische Energieverbräuche. Diese können übernommen und in die Mengenermittlung mit einbezogen werden.

Für eine Rechenanlage inklusive Räumern, Rechenguttransport, -entwässerung und -wäsche wird im Handbuch ein Wertebereich von 0,5 bis 1,5 Wh/m³ angegeben. Eine Feinsiebung ist bei dem Betrieb von Plattenmembranen nach Hersteller-Angaben nicht erforderlich. Aufgrund der geringen Spaltweite, die durch den Wegfall der Feinsiebung verwendet wird, wählen wir an dieser Stelle den höheren Wert:

$$E_{\text{spez,R}} = 1,5 \text{ Wh/m}^3.$$

Ein belüfteter Sandfang inklusive Gebläse, Räumern, Entnahmepumpe und Wäsche verbraucht laut Handbuch:

$$E_{\text{spez,SF}} = 5,5 \text{ Wh/m}^3.$$

2.2.9 Schlammbehandlung und Infrastruktur

Auch die Verfahrensstufen Schlammbehandlung und Infrastruktur tragen zum gesamten Energieverbrauch der Kläranlage bei. Zwar ist ihr Anteil im Vergleich zur Membranstufe relativ gering, dennoch werden sie in die Endsumme mit einbezogen. Da diese Stufen auch in einer konventionellen Anlage vorhanden sind, kann hier wieder nach dem Handbuch "Energie in Kläranlagen" vorgegangen werden.

In den entsprechenden Kapiteln finden sich Angaben zur Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs. Diese wurden für die Modellanlage übertragen und angewendet.

Schlammbehandlung

Für eine vorhandene statische Voreindickung wird laut Handbuch kein Energieverbrauch angerechnet.

$$E_{\text{spez,SV}} = 0,0 \text{ kWh/m}^3$$

In Konzen wird der Schlamm nach der statischen Eindickung abgefahren und anderorts weiterbehandelt. Der Energieverbrauch für Schlammmentwässerung mittels Zentrifuge wird im Folgenden bestimmt. Er wird nicht in die Energiebilanz mit einbezogen und dient nur zu Informationszwecken.

Für Hochleistungsentwässerungszentrifugen erster und zweiter Generation werden auf den Zulauf bezogene schlammspezifische Stromverbräuche zwischen 1,98 und 1,19 kWh/m³ angegeben. Für die ideale Modellanlage wählen wir das energetisch sparsamste Aggregat und erhalten damit:

$$E_{\text{spez,Sch}} = 1,19 \text{ kWh/m}^3.$$

Diese Angabe bezieht sich nicht auf die Wassermenge, sondern die vorhandene Schlammmenge. Nach Literaturangaben [Imhoff, 1999] kann mit einem TS-Gehalt von 50 g/(E·d) nun die anfallende Schlammmenge der Modellanlage berechnet werden:

$$\ddot{U}_S = 50 \cdot 7.000/1.000 = 350 \text{ kg/d.}$$

Um diese Schlammmenge nun auf die Jahreswassermenge zu beziehen und somit auch in den spezifischen Gesamtenergiebedarf aufnehmen zu können, wird die Schlammmenge in einen Volumenstrom umgerechnet.

Nach IMHOFF [1999] besitzt der Schlamm im Zulauf zur Zentrifuge einen Trockenrückstand von 2,5 %:

$$TR = 2,5 \%$$

Als Volumenstrom betrachtet ergibt sich demnach:

$$\begin{aligned} Q_S &= \ddot{U}_S / TR \\ &= 350 / (2,5/100) = 14.000 \text{ l/d} \\ &= 14 \text{ m}^3/\text{d}. \end{aligned}$$

Mit dem laut Handbuch gegebenen Energiebedarf der Hochleistungsentwässerungszentrifuge ergibt dies umgerechnet auf ein Jahr:

$$\begin{aligned} E_{Sch} &= E_{spez,Sch} \cdot Q_S \cdot 365 \\ &= 1,19 \cdot 14 \cdot 365 = 6.080,90 \text{ kWh/a}. \end{aligned}$$

Folglich lässt sich nun auch der Energiebedarf, bezogen auf die Jahreswassermenge, bestimmen, um ihn mit den anderen Energieangaben vergleichen zu können.

$$\begin{aligned} E_{spez,SS} &= E_{Sch} / (1.803 \cdot 365) \\ &= 6.080,90 / (1.803 \cdot 365) = 0,0092 \text{ kWh/m}^3 \end{aligned}$$

Infrastruktur

Der Energiebedarf für die Infrastruktur der konventionellen Modellanlage, die in ihrer Größenordnung auch mit der MBR-Modellanlage vergleichbar ist, wird im Handbuch "Energie in Kläranlagen" [MUNLV, 1999] zu 1,3 kWh/(EW·a) bestimmt. In diesem Wert sind die Energieverbräuche für Licht, Werkstatt, Labor, Trink- und Brauchwasserversorgung, Heizung, Lüftung und Abluftbehandlung enthalten. Dies entspricht somit einem spezifischen Energieverbrauch von:

$$E_{spez,Inf} = 0,014 \text{ kWh/m}^3.$$

2.2.10 Betrachtung des gesamten Energieverbrauchs

Nachdem nun alle relevanten Verbraucher energetisch betrachtet und berechnet wurden, lässt sich der gesamte Energiebedarf der Modellanlage bestimmen. Dies geschieht durch Aufsummierung der einzelnen Verfahrensstufen. Das Ergebnis dieser Betrachtung liefert das folgende Diagramm. Als Vergleich dient die Modellanlage von Krause. Dieser bezieht sich jedoch auf Hohlfasermodule der Firma Zenon und hat andere Wassermengen in der Berechnung zu Grunde gelegt.

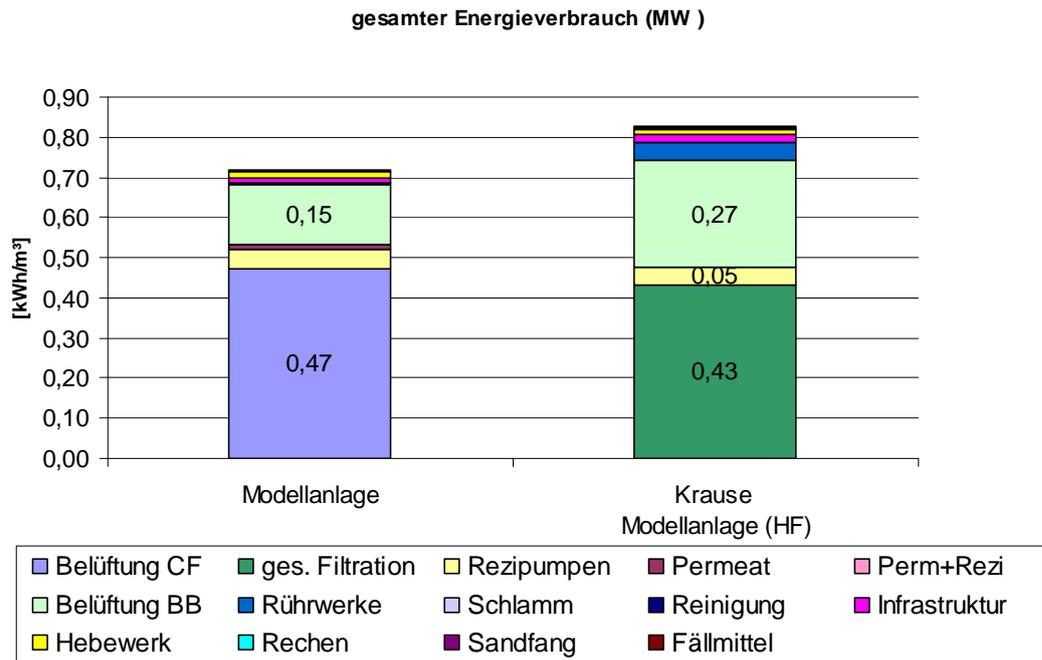


Abbildung 2-2: Gegenüberstellung Gesamtverbrauch Modellanlage und Modellanlage Krause.

Neben dem spezifischen Energieverbrauch in Abhängigkeit der Wassermenge interessiert auch der Verbrauch der angeschlossenen Einwohner. Umgerechnet ergibt sich somit für die Modellanlage ein Wert von insgesamt 67,28 kWh/(EW·a). Die einzelnen Verbraucher sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 2-7: Energieverbrauch der Modellanlage bezogen auf die Einwohner

Verbraucher	Modellanlage berechnet kWh/(EW a)
Belüftung CF	44,47
Rezipumpen	3,52
Permeat	0,81
Belüftung BB	14,02
Rührwerke	1,19
Schlamm	0,00
Reinigung	0,00
Infrastruktur	1,30
Hebewerk	1,31
Rechen	0,14
Sandfang	0,52
Fällmittel	0,00
Summe:	67,28

Der Energieverbrauch der Modellanlage wurde neben der Mischwasserbetrachtung auch für den Trockenwetterfall bestimmt. Wie erwartet hat dies besonderen Einfluss auf den Energieverbrauch der Belebungsgebläse. Da durch weniger zufließendes Wasser die Filtrationszeit und damit die Laufzeit der Crossflow-Gebläse abnimmt, wird auch weni-

ger Sauerstoff in die Belebung übertragen. Somit erhöht sich die Laufzeit der Belebungsgebläse zum Eintrag der erforderlichen Luftmenge. Die restlichen Verbraucher der Modellanlage weisen durch die geringere Wassermenge nur wenige Änderungen im Energieverbrauch auf.

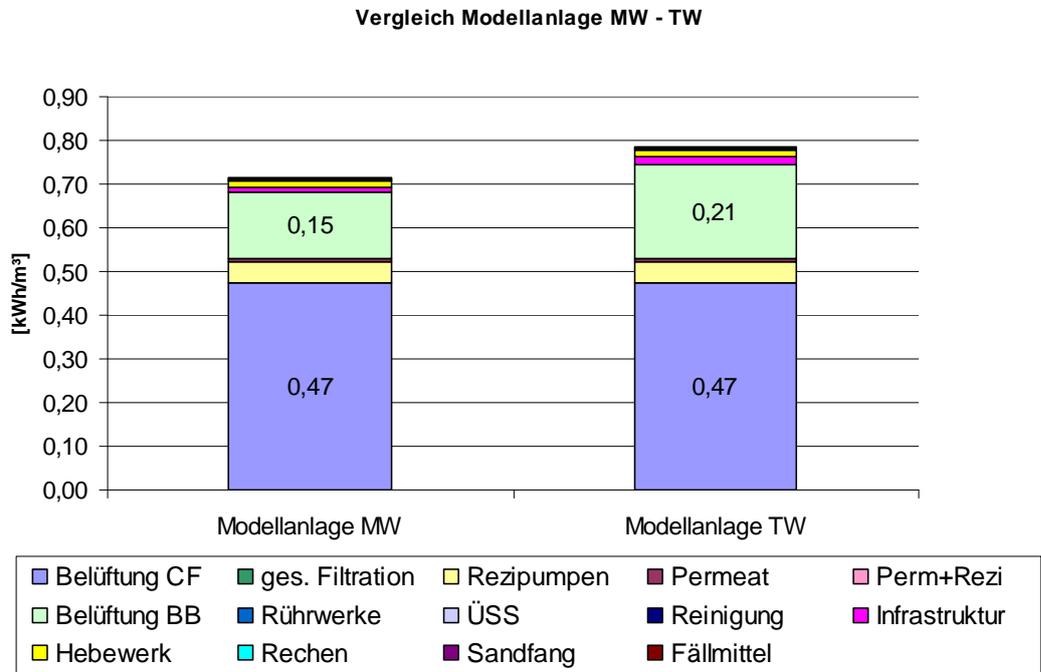


Abbildung 2-3: Vergleich Modellanlage TW-MW

Die Flussrate, mit der eine Membrankläranlage betrieben wird, hat besonderen Einfluss auf den Energiebedarf der gesamten Anlage. Für die Modellanlage wurde idealerweise eine hohe Flussrate von 32 l/(m²·h) gewählt. Durch geringere Flussraten erhöht sich die Laufzeit der Crossflow-Gebläse und der Energieverbrauch dieser Verfahrensstufe steigt, wie in Abbildung 2-4 sichtbar, erheblich an.

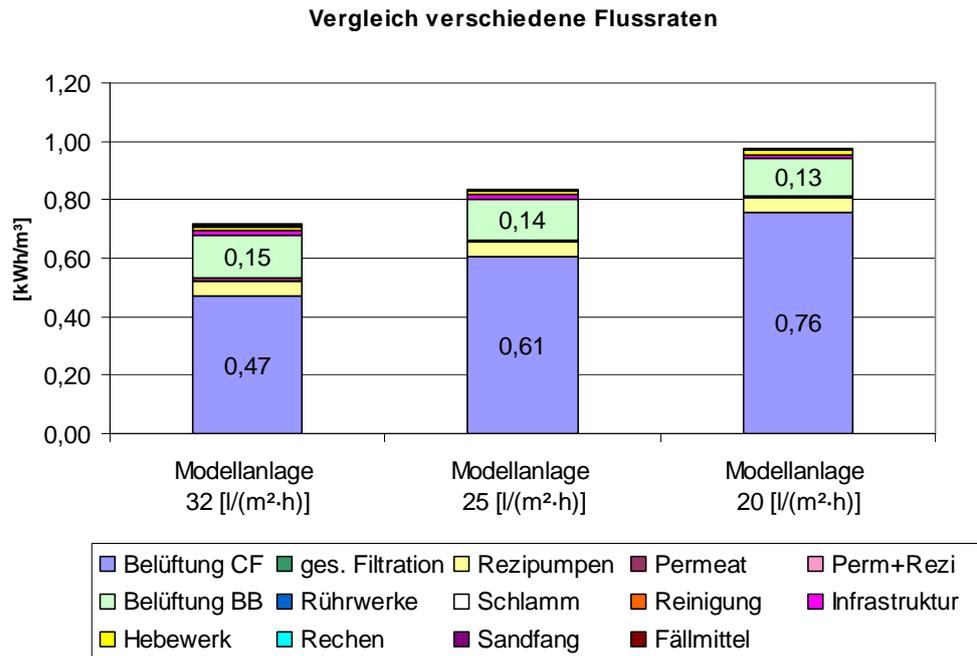


Abbildung 2-4: Vergleich des Energieverbrauchs der Modellanlage bei verschiedenen Flussraten

Im Gegenzug verringert sich der Energiebedarf der Gebläse in der Belebung, da mehr grobblasiger Sauerstoff aus der Membranfiltration eingetragen wird. Diese Einsparung ist im Vergleich zu dem zusätzlichen Verbrauch für die Crossflow-Gebläse nur gering. Mit sinkender Flussrate nimmt somit der Energieverbrauch deutlich zu. Dieser Zusammenhang ist für den tatsächlichen Betrieb einer Membrankläranlage und eine mögliche Energieeinsparung besonders interessant.

3 DATENERHEBUNG

3.1 Elektrische Verbraucher

Konzen

Die Kläranlage Konzen weist laut EVU-Abrechnungen einen Elektrizitätsbezug von **1.663.309 kWh/a** auf. Durch das Messprogramm vor Ort, die Daten aus dem Prozessleitsystem und die zugehörigen Berechnungen wurde ein Energiebedarf von 1.499.084 kWh/a für die Kläranlage ermittelt. Die Differenz zwischen Energiebezug und der berechneten Summe liegt bei -164.225 kWh/a und somit bei -9,9 % des Gesamtstrombedarfs.

Woffelsbach

Die Kläranlage Woffelsbach weist laut EVU-Abrechnungen einen Elektrizitätsbezug von **638.407 kWh/a** auf. Das vorgelagerte Pumpwerk Rurberg wird über einen eigenen

Stromanschluss versorgt, der zugehörige Strombezug wird mit 91.966 kWh ausgewiesen. Aus dem Pumpwerk Rurberg wird noch ein zusätzliches Pumpwerk (Grimmischall, ca. 11.000 kWh bzw. 11,9 %) versorgt, welches nicht in die Bilanzierung einbezogen wird. Durch das Messprogramm vor Ort, die Daten aus dem Prozessleitsystem und die zugehörigen Berechnungen wurde ein Energiebedarf von 672.655 kWh/a für die Kläranlage inkl. des Pumpwerks Rurberg ermittelt. Die Differenz zwischen Energiebezug und der berechneten Summe liegt insgesamt bei -46.718 kWh/a und somit bei -6,49 % des Gesamtstrombedarfs. In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise zur Aufnahme und Ermittlung des Energiebedarfs der einzelnen Aggregate bzw. Aggregatgruppen näher erläutert.

Vorgehensweise:

Zur Ermittlung des Energieverbrauchs werden die Aggregate in einer einheitlichen Verbraucherliste, in der die Motordaten, die durchgeführten Messungen und die Laufzeiten innerhalb des Betrachtungszeitraumes aufgeführt werden, zusammengefasst. Nachstehende Abbildung zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der unter Anlage 4 und 9 einzusehenden Verbraucherliste.

Nr.	Kennung	Aggregatangaben	Hersteller	Verteilung	Verbrauch gemäß MUNLV				Daten aus Berechnungszeitraum 01.05.2007 - 30.04.2008				Leistungsberechnung				Berechnung der elektrischen Arbeit	Berechnung der elektrischen Arbeit	Anmerkungen	
					Nennleistung	cos phi	Strom	Spannung	Altri- leistungs- wert	Summe Betriebs- stunden	Tagesmittel Betriebs- stunden	Strom aus Messungen	Strom aus PLS	durchschnittliche Leistungsaufnahme errechnet aus Tagesleistung	Leistungsaufnahme errechnet aus Messungen	max. gebende Leistungsaufnahme				Leistungsaufnahme und Betriebsstunden
Verbraucher																		113.983,28		
E.2	B.1 RW1	Rührwerk 1 Biologie Straße 1	KSB	MH	3,2	0,71	0,2	400	D	0	0,00	7,40		3,17	3,64	3,64	-	0,00	Analyse C250/20UMG	
E.2	B.1 RW2	Rührwerk 2 Biologie Straße 1	KSB	MH	3,2	0,71	0,2	400	D	0	0,00	7,40		3,17	3,64	3,64	-	0,00	Analyse C250/20UMG	
E.4	B.1 P. 1 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 1 Biologie Straße 1	KSB	MH	4,8	0,78	11	400	FU	1308	11,87	4,38	0,95	4,16	2,93	2,93	33,04	10.090,36	Analyse P500-301/46UMG1	
E.4	B.1 P. 2 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 2 Biologie Straße 1	KSB	MH	4,8	0,78	11	400	FU	1308	11,48	4,30	0,95	4,16	2,76	2,76	31,72	11.578,44	42% = 5,85k (Motorstrom) + 3,5k (Netzstrom) Reizumpumpeleistung -> 14-Gehalt im Membranbecken 0-50%	
E.4	B.1 P. 3 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 3 Biologie Straße 1	KSB	MH	4,8	0,78	11	400	FU	1308	11,48	4,10	0,97	4,16	2,70	2,70	30,97	11.304,51	Reizumpumpeleistung -> 14-Gehalt im Membranbecken 0-50%	
E.4	B.1 P. 4 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 4 Biologie Straße 1	KSB	MH	4,8	0,78	11	400	FU	1308	2,99	4,30	0,95	4,16	2,83	2,83	6,47	3.001,71	Analyse P500-301/46UMG1	
E.3	B.1 P. 4 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 4 Biologie Straße 1	KSB	MH	2,4	0,81	0,5	400	D	1000	0,94			2,28	-	2,28	12,85	4.889,76	Analyse P500-301/46UMG1	
E.2	B.2 RW1	Rührwerk 1 Biologie Straße 2	KSB	MH	3,2	0,71	0,2	400	D	0	0,00	7,40		3,17	3,64	3,64	-	0,00	Analyse C250/20UMG	
E.2	B.2 RW2	Rührwerk 2 Biologie Straße 2	KSB	MH	3,2	0,71	0,2	400	D	0	0,00	7,40		3,17	3,64	3,64	-	0,00	Analyse C250/20UMG	
E.4	B.2 P. 1 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 1 Biologie Straße 2	KSB	MH	4,8	0,78	11	400	FU	1376	10,41	4,30	0,96	4,16	2,83	2,83	28,48	10.752,81	Analyse P500-301/46UMG1	
E.4	B.2 P. 2 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 2 Biologie Straße 2	KSB	MH	4,8	0,78	11	400	FU	1340	11,20	4,30	0,95	4,16	2,76	2,76	31,38	11.447,52	42% = 5,85k (Motorstrom) + 3,6k (Netzstrom) Reizumpumpeleistung -> 14-Gehalt im Membranbecken 0-50%	
E.4	B.2 P. 3 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 3 Biologie Straße 2	KSB	MH	4,8	0,78	11	400	FU	1340	11,20	4,30	0,96	4,16	2,83	2,83	31,65	11.628,97	Reizumpumpeleistung -> 14-Gehalt im Membranbecken 0-50%	
E.4	B.2 P. 4 R2	Rezirkulationspumpe Membranbecken 4 Biologie Straße 2	KSB	MH	4,8	0,78	11	400	FU	1340	11,20	4,30	0,96	4,16	2,86	2,86	33,47	12.218,00		

Abbildung 3-1: Beispielhafte Darstellung der Verbraucherliste

Im Einzelnen werden aus den zur Verfügung gestellten Informationen folgende Daten zur Aufstellung der Verbraucherlisten benutzt:

- Nennleistung P_N
- $\cos \phi$
- Nennstrom I_N
- Spannung
- Antriebsart (direkt, polumschaltbar- oder FU-geregelt).

Bei den Motordaten wird die an der Welle zur Verfügung stehende Leistung bei Nennbetrieb als Nennleistung P_N angegeben. Der angegebene Strom I_N bezieht sich auf die Stromaufnahme des Motors bei Nennbetrieb. Für die Energieverbrauchsermittlung ist die aufgenommene Leistung auf Basis des Motorstromes und des Leistungsfaktors entscheidend. Aus dem Verhältnis der aufgenommenen und abgegebenen Leistungen bei Nennbetrieb kann der Wirkungsgrad des Motors berechnet werden, der in der Regel nicht auf den Typenschildern angegeben wird.

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ wurde anhand von Literaturwerten (ROT gekennzeichnet) oder aus den zur Verfügung gestellten Verbraucherlisten der Fa. bn-automation festgelegt. Mit Hilfe dieses Faktors kann aus einer Strommessung I_{MESS} ein Leistungsbezug P_{MESS} gemäß der Formel:

$$P_{\text{MESS}} = U \cdot I_{\text{MESS}} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} \quad \text{Gleichung 3.1}$$

berechnet werden. Dabei wird die Spannung U mit 400 V festgelegt. Das Ergebnis dieser Berechnungen wird in der Spalte „Leistungsaufnahme errechnet aus Messungen“ aufgelistet. Die in der Verbraucherliste „Ist-Zustand“ GRÜN gekennzeichneten Messwerte wurden durch Leistungsmessungen und durch einen Vergleich mit Daten aus den Frequenzumrichtern hergeleitet.

Zusätzlich wird, anhand von Erfahrungswerten, ein durchschnittlicher Leistungsbezug gemäß

$$P_{\emptyset} = U \cdot I_{\text{N}} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} \cdot \eta \quad \text{Gleichung 3.2}$$

ermittelt. Dieser Wert wird für weitere Berechnungen benutzt, wenn keine Messung oder Berechnung des betreffenden Aggregates möglich ist. Dazu werden die Nennangaben des jeweiligen Aggregates benutzt. Der Faktor η ($= 0,7$) stellt dabei den stochastischen Mittelwert der prozentualen Auslastung in Bezug auf den Nennbetrieb des Aggregates dar. Dieser Mittelwert wurde auf Basis des mittlerweile sehr umfangreichen Datenmaterials, aus bereits auf anderen Kläranlagen durchgeführten Energieanalysen, zu 70 % der Nennlast festgelegt. Das Ergebnis dieses 70 %-Mittelwertes wird in der Spalte „durchschnittliche Leistungsaufnahme errechnet aus Typenschild“ aufgelistet.

In der Spalte „maßgebende Leistungsaufnahme“ wird abschließend die ermittelte Leistung P_{MESS} oder, falls diese nicht ermittelt werden kann, die Durchschnittsleistung P_{\emptyset} für weitere Berechnungen verwendet.

In den Anlagen 4 und 9 sind die vollständigen Verbraucherlisten der Kläranlagen Konzen und Woffelsbach zusammengestellt. Hier wurden hauptsächlich die Verbraucher, die eine Leistungsaufnahme größer 0,5 kW aufweisen, berücksichtigt. In den Bemerkungen/Zusatzangaben sind prozess- bzw. apparatetechnische Zusatzinformationen aufgeführt, die eine Beurteilung der Aggregate erleichtern sollen. Auch werden hier Angaben gemacht, wo und in welchem Umfang Annahmen getroffen werden mussten.

Ermittlung der Betriebsstunden:

Auf der Kläranlage werden die Betriebsstunden der meisten Aggregate über die Automatisierung in das Prozessleitsystem übertragen (ROSA gekennzeichnet). Für Aggregate, deren Betriebsstunden nicht protokolliert werden, mussten die Laufzeiten in enger Abstimmung mit dem Betriebspersonal, teilweise auf Basis von bekannten Durchflussmengen, abgeschätzt werden. Diese abgeschätzten Betriebsstunden (ebenso wie andere Schätzwerte) sind in der Verbraucherliste „Ist-Zustand“ ROT dargestellt. Mit den Betriebsstunden und der Leistungsaufnahme (P_{MESS} oder P_{\emptyset}) wird der tägliche und jährliche Energiebedarf der Verbraucher berechnet.

Je nach Betriebsweise des Aggregates und in Abhängigkeit der vorliegenden Datenbasis wurden unterschiedliche Vorgehensweisen angewandt, die nachfolgend erläutert werden.

Beschreibung des Messprogramms:

Zur Erfassung des elektrischen Verbrauches der Aggregate wurden seitens ITS manuelle Strom- und Leistungsmessungen unter Mitwirkung des Betriebspersonals durchgeführt. Die manuellen Messungen hatten zum Ziel, die Leistungsangaben der Aggregat hersteller im Betrieb zu überprüfen, da die Aggregate im Normalfall nicht mit der Nennleistung betrieben werden. Zu diesem Zweck wurden die Aggregate mittels Zangenamperemeter oder Leistungsmessgerät (Strom-, Spannungs- und $\cos \varphi$ -Messung) unter betrieblichen Bedingungen manuell nachgemessen.

Ermittlung der Daten für direkt angetriebene Aggregate mit festem Betriebspunkt:

Der Leistungsbezug von unregelmäßigen Aggregaten mit einem festen Betriebspunkt, wie zum Beispiel Rührwerken, kann mit einer einmaligen Messung genau ermittelt werden. Auch Tauchmotorpumpen mit einer festen Förderhöhe werden auf diese Art berechnet.

Ermittlung der Daten für frequenzgeregelte Aggregate (und Aggregate mit instationärem Betriebspunkt):

Bei frequenzgeregelten Aggregaten ist die Leistungsermittlung anhand eines Betriebspunktes nicht zulässig, da der Leistungsbezug stark von der Frequenz, mit der das Aggregat angesteuert wird, abhängt. Aus diesem Grund ist die Leistungsermittlung für mehrere Frequenzen vorzunehmen und der Gesamtverbrauch aus diesen Leistungswerten und den jeweils zugehörigen Laufzeiten zu ermitteln, soweit diese separat aufgezeichnet werden. Alternativ kann ein Durchschnittsbezug über einen charakteristischen Zeitraum aufgezeichnet und für den gesamten Betrachtungszeitraum hochgerechnet werden.

Die Auswertung der Leistungsaufnahme der Aggregate

- Zwischenpumpwerk
- Rezirkulationspumpen
- Gebläse
- Permeatpumpen

wurde anhand der Daten der eingesetzten Frequenzumrichter durchgeführt. Zur Prüfung dieser Verbrauchsdaten wurden Vergleichsmessungen bei verschiedenen Frequenzen durchgeführt. Dabei wurde die aufgenommene Energie am Messgerät mit der Änderung an den Anzeigen der Frequenzumrichter verglichen. Auf Basis der Vergleichsdaten kann der im Frequenzumrichter ermittelte Verbrauch, durch Berücksichtigung eines Korrekturfaktors, für die Berechnung des Energieverbrauchs der jeweiligen Aggregate benutzt werden.

Für die vorgenannten Aggregate werden die Motorströme im Prozessleitsystem protokolliert. Die protokollierten Daten werden im 1-Stunden-Raster abgelegt.

Die Energieaufnahme wird in der Verbraucherliste über einen durchschnittlichen Strombezug (GRÜN) und die protokollierte Laufzeit dargestellt.

3.2 Wärmeverbraucher

Da auf den Kläranlagen Konzen und Woffelsbach eine aerobe Schlammstabilisierung stattfindet, steht zur Bereitstellung der benötigten Wärmeenergie kein Faulgas zur Verfügung. Der Wärmebedarf wird komplett über eine Wärmepumpe mit elektrischer Zusatzheizung und dezentralen Elektroheizungen gedeckt.

Aufgrund der fehlenden Schlammbehandlung beschränkt sich der Wärmebedarf auf die Beheizung verschiedener Gebäude und die Warmwasseraufbereitung. Dabei werden die Betriebsgebäude über die Wärmepumpe mit der Abwärme aus der Gebläsehalle geheizt. In Woffelsbach werden die Membranhalle und die Umkleide über elektrische Heizungen versorgt.

4 IST-ZUSTAND KLÄRWERK KONZEN

4.1 Datengrundlage

Der Erhebung des aktuellen Zustandes des Klärwerks Konzen kommt im Rahmen der Energieanalyse eine zentrale Bedeutung zu. So sind die Ergebnisse der Auswertung immer nur so zuverlässig wie die Datengrundlage, auf der diese basieren.

Im Einzelnen wurde u. a. auf folgendes Datenmaterial zurückgegriffen:

- Betriebsdatenauszüge aus dem PLS der KA Konzen
- Steuerungsbeschreibung der KA Konzen
- Aufstellung des täglichen Stromverbrauchs für die Jahre 2006 und 2007
- Monatliche Aufstellungen über Beseitigung/Verwertung des Rechen- und Sandfanggutes für das Jahr 2007
- Monatliche Aufstellungen über die Nassschlammabgabe an andere Kläranlagen für das Jahr 2007
- Monatsleistungspreisregelung mit dem EVU
- Auswertung der Betriebseinstellung der Membrankammer 1.1 für den Zeitraum Januar 2007 bis November 2007
- Bedienungsanleitung der KA Konzen
- Störfallkonzept der KA Konzen

- Angaben des Betriebspersonals zu den Messungen auf dem Klärwerk
- Angaben des Betriebspersonals zur Betriebsführung der KA

Der Betrachtungszeitraum für die Energieanalyse ist der 01.05.2007 bis 30.04.2008.

4.2 Kläranlagenbeschreibung

4.2.1 Allgemeines

Die vom WVER betriebene Membrankläranlage Konzen wurde 1975 als Entlastung zu der bestehenden Kläranlage Monschau errichtet und in Betrieb genommen. Hier fließen die Abwässer aus den Ortschaften Imgenbroich, Mützenich und Konzen zusammen. 1998 übernahm der WVER den Betrieb und die Unterhaltung dieser Anlage. Aufgrund von verschärften Einleitungsbedingungen für die Kläranlage Monschau, die jedoch nur unter erheblichem Sanierungsaufwand hätte ertüchtigt werden können, wurde deren Anschlussgröße reduziert und ein neues Konzept für die Kläranlage Konzen entwickelt. Das Konzept sah den Umbau und die Erweiterung der Kläranlage als Membrananlage vor. Die Kläranlage wurde 2005 in Betrieb genommen. Die Ausbaugröße beträgt 9.700 EW. Das gereinigte Abwasser wird in den Feuerbach geleitet.

Die Kläranlage ist in der aktuellen Ausbaustufe auf einen maximalen Mischwasserzufluss $Q_{\max} = 153 \text{ l/s}$ ausgelegt.

Der mittlere Tageszufluss bei Trockenwetter betrug im betrachteten Zeitraum von Mai 2007 bis April 2008 $4.577 \text{ m}^3/\text{d}$. Die Gesamtwassermenge in diesem Zeitraum betrug $2.132.388 \text{ m}^3$. Eine anschauliche Darstellung des Jahresgangs der täglichen Abwassermengen zur Anlage ist nachfolgend in Abbildung 4-1 gegeben. Es ist erkennbar, dass der Zulauf einen recht hohen Fremdwasseranteil enthält.

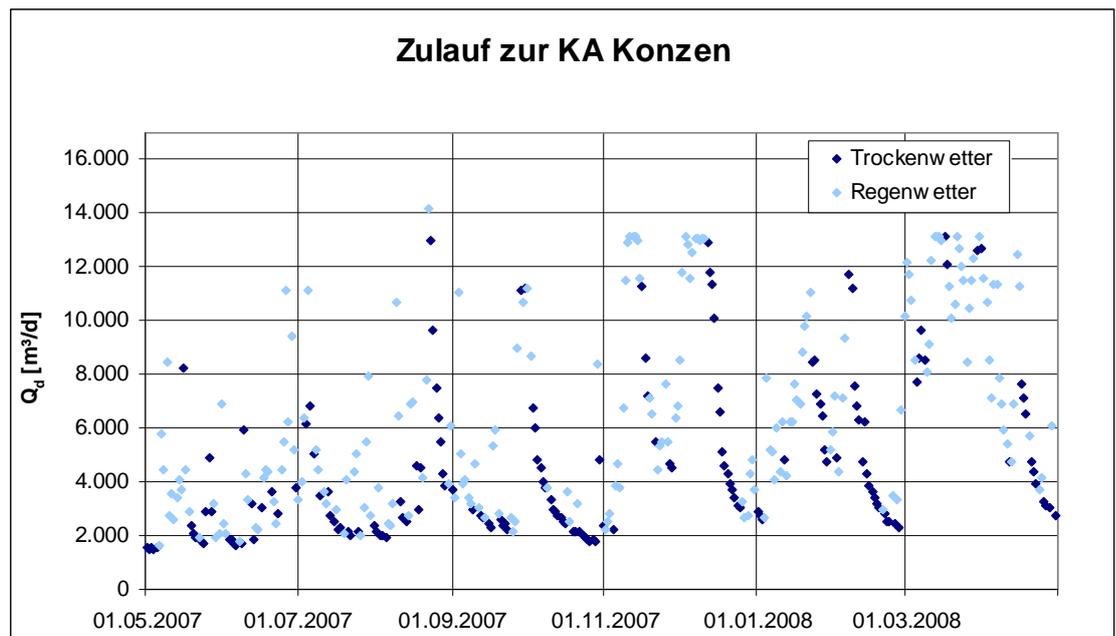


Abbildung 4-1: Jahresgang der täglichen Abwassermenge im Zulauf der KA

Die folgenden Tabellen zeigen die wichtigsten Eckdaten der Kläranlage:

Tabelle 4-1: Allgemeine Kenndaten der Kläranlage Konzen

Kläranlage Konzen		
Einwohnerwerte (Auslegungswert)	9.700	[EW]
Größenklasse nach AbwV	3	[-]
Mittlerer Abfluss bei Trockenwetter (Ø 05/2007 bis 04/2008)	4.577	[m ³ /d]
Mittlerer Abfluss bei Trockenwetter (Ø 05/2007 bis 04/2008)	53	[l/s]
Täglicher Trockenwetterabfluss (Auslegungswert)	68	[l/s]
Maximaler Mischwasserabfluss (Auslegungswert)	153	[l/s]

Tabelle 4-2: Überwachungs- und Ablaufwerte der Kläranlage Konzen

	CSB [mg/l]	BSB₅ [mg/l]	NH₄-N [mg/l]	P_{ges} [mg/l]
Überwachungswerte	50	15	3	0,2
Erklärte Werte	50	-	3	0,2
Ablaufkonzentrationen (85 %-Quantil, 24 h Mischproben)	9,6	-	0,2	0,1

4.2.2 Festlegung der Bezugsgröße

Gemäß dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ erfolgt die Festlegung der Bezugsgröße auf Basis der mittleren Schmutzfrachten im Zulauf der Kläranlage (ohne Rückbelastung) und den üblichen einwohner-spezifischen Schmutzfrachten gemäß ATV-DVWK A 131.

Für die Festlegung der mittleren Jahresbelastung standen die Betriebsberichte und Daten aus dem Prozessleitsystem für die Jahre 2007 und 2008 zur Verfügung. Gemäß dem Handbuch stellt bei der Berechnung der mittleren Jahresbelastung, ausgedrückt in Einwohnergleichwerten, der biologische Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen (BSB₅) die maßgebende Größe dar. Für diesen Parameter liegen allerdings keine Daten vor, daher erfolgt eine Auswertung auf Basis der CSB- und N_{ges}- Frachten im Zulauf zur Kläranlage. Der Parameter P wird nicht mit berücksichtigt, da dieser für den Energiebedarf der Kläranlage eine untergeordnete Rolle spielt.

Zur Überprüfung der Plausibilität der über diese Frachten ermittelten Anlagenbelastung erfolgten ein Quervergleich mit den übrigen im Zulauf gemessenen mittleren Schmutzfrachten und auch eine Berechnung der 85 %-Quantile der Zulauffrachten. Letztere kann zum Vergleich mit den Auslegungswerten der Kläranlage verwendet werden.

Betriebsdatenauswertung Mai 2007 bis April 2008

Zur Ermittlung der durchschnittlichen jährlichen Kläranlagenbelastung lagen die im Jahr 2007 gemessenen CSB und N_{ges} -Konzentrationen inklusive der internen Rückbelastung aus der Schlammendickung des Zulaufes vor.

Durch Multiplikation der gemessenen Konzentrationen mit den zugehörigen Wassermengen wurden die entsprechenden Zulauffrachten errechnet und deren Mittelwerte bzw. 85 %-Quantile gebildet. Für die anschließende Umrechnung der Frachten in Einwohnergleichwerte wurden die Standardwerte des ATV-DVWK-Arbeitsblattes 131 herangezogen. Es ergeben sich hiernach folgende Einwohnergleichwerte (Tabelle 4-3; Ausreißer bereinigt):

Tabelle 4-3: Einwohnerwerte über die Parameter CSB, N_{ges} , NH_4-N und P

Ermittlung der Einwohnerwerte		CSB	N_{ges}	NH_4-N	P
Probenzahl	[-]	316	308	316	311
Mittelwert der Tagesfrachten	[kg/d]	928	95	46	15
85 %-Quantil der Tagesfrachten	[kg/d]	1.399	126	57	22
Standardwerte nach ATV	[g/(EW·d)]	120	11	7	1,8
Einwohnerwerte aus MW	[EW]	7.733	8.618	6.610	8.395
Einwohnerwerte aus 85%-Q.	[EW]	11.662	11.484	8.175	12.341

Es zeigen sich Abweichungen zwischen den ermittelten Einwohnerwerten nach den einzelnen Parametern. Aus den CSB-Frachten ergibt sich mit 7.733 EW eine Belastung, die über der tatsächlichen Belastung von 6.200 EW liegt, ebenso aus den N_{ges} -Frachten mit 8.618 EW. Der Größenunterschied ergibt sich aus der internen Rückbelastung der Kläranlage. Diese konnte allerdings nicht mehr durch separate Messprogramme erfasst und eliminiert werden. Um realistischere Werte bei der Bestimmung der Einwohner zu erhalten, werden nun anstelle der Tagesfrachten die Schlammengen als Berechnungsgrundlage gewählt.

Durch Betrachtung der abgezogenen Schlammengen im Schlamm Speicher der Kläranlage und des zugehörigen TR-Gehaltes, lassen sich ebenfalls die Einwohnergleichwerte bestimmen. Nach IMHOFF [1999] beträgt der Feststoffanfall für aerob stabilisierten, eingedickten, gemischten Schlamm 50 g/(EW·d). Im Mittel ergeben sich somit etwa 6.127 angeschlossene Einwohner.

Tabelle 4-4: Einwohnerwerte über den Schlammanfall

Ermittlung der Einwohnerwerte		Schlammanfall
Probenzahl	[-]	366
Mittelwert der Tagesfrachten	[m ³ /d]	7
TR Silo Mittelwert	[%]	4,46
Menge nach Mittelwert	[kg]	306,4
Standardwerte nach Imhoff	[g/(EW·d)]	50
Einwohnerwerte aus MW	[EW]	6.127

Dieser berechnete Wert von 6.127 EW entspricht auch den Angaben über die tatsächliche Anlagenbelastung von 6.200 natürlichen Einwohnern innerhalb des Einzugsgebietes. Für alle folgenden Berechnungen und Untersuchungen bildet dieser ermittelte Wert die Grundlage.

4.2.3 Beschreibung der Verfahrenstechnik

Zulauf

Der Membrankläranlage fließen die Abwässer aus den Orten Konzen, Mützenich und Imgenbroich zu. Sie werden in einem Trennbauwerk unmittelbar vor der Kläranlage gesammelt. Das Trennbauwerk drosselt im Mischwasserfall über MID die Wassermenge auf $Q_{\max} = 153$ l/s und leitet diese durch ein Ausgleichsbecken der mechanischen Vorreinigung zu. Das Becken dient als Pufferbecken bei kurzfristigen Zulaufspitzen und hat ein Volumen von 450 m³. In das Ausgleichsbecken werden außerdem die Prozesswässer (Ablauf Siebgutwaschpressen, Trübwasser) und der Ablauf des Betriebsgebäudes geleitet. Auch die Entleerung der Stauraumkanäle und des RÜB (s. nächster Abschnitt) erfolgt in das Ausgleichsbecken. Im Anschluss an das Ausgleichsbecken erfolgt erneut über MID und Regelschieber eine Drosselung auf 153 l/s.

Mischwasserbehandlung

Bei Wassermengen $> Q_{\max}$ wird über einen Regelschieber in einen Stauraumkanal abgeschlagen und von dort aus das Wasser im Freigefälle dem RÜB zugeführt. Im Falle eines Überlaufs des RÜB gelangt das Abwasser in einen zweiten Stauraumkanal, der wiederum in einen Retentionsbodenfilter entlastet. Der Abschlag in den Retentionsbodenfilter erfolgt nur bei Vollfüllung des RÜB. Sinkt der Wasserspiegel im RÜB wieder ab, bleibt der Stauraumkanal 2 gefüllt und wird in Abhängigkeit des Wasserspiegels im RÜB über eine Pumpe in das RÜB entleert.

Die Entleerung des RÜB erfolgt über zwei trocken aufgestellte Pumpen in das Ausgleichsbecken. Das Becken ist zusätzlich mit Rührwerken ausgestattet. Die Reinigung soll über eine Spülklappe im Zulauf erfolgen, diese funktioniert aber nicht.

Mechanische Vorreinigung

Das Wasser fließt zunächst dem zweistraßig angelegten Filterstufenrechen mit 3 mm Spaltweite zu. Dieser wird höhenstandsdifferenzgesteuert mit Zeitüberlagerung geräumt. Ein Aggregat dient als 100 %ige Redundanz und die komplette Wassermenge von 153 l/s kann jeweils von einem Rechen allein abgearbeitet werden. Das Redundanzaggregat kann bei Bedarf ausgeschaltet werden und springt im Störfall wieder an.

Die zurückgehaltenen Stoffe werden direkt über einen Querförderer in die Rechengutwaschpresse gefördert. Das gewaschene und gepresste Rechengut wird über ein Friktionrohr in bereitgestellte Container abgeworfen. Waschwasser und Ablaufwasser werden im Freigefälle wieder ins Gerinne vor der Rechenhalle geführt.

Sandfang

Im Anschluss an das Rechengebäude fließt das Wasser dem einstraßigen, belüfteten Langsandfang mit seitlichem Fettfang zu. Im Fettfang zurückgehaltene Fette werden manuell geräumt und im Sammelschacht des Fettfangs gestapelt. Von dort aus können die Fette und Schwimmstoffe über einen Saugwagen bei Bedarf abgezogen werden. Die Sandentsorgung erfolgt über eine Sandförderschnecke am Boden des Sandfangs und einer in der Trichterspitze angeordneten Sandpumpe. Von dort wird der Sandklassierer im Rechengebäude mit den abgesetzten Stoffen beschickt. Überschüssiges Wasser fließt im Freigefälle wieder dem Rechenzulauf zu. Der Sand wird mittels Förderschnecke in einen Container abgeworfen.

Zur Belüftung des Sandfangs steht ein polumschaltbares Gebläse zur Verfügung. Die Vorwahl der Stufe erfolgt in Abhängigkeit der hydraulischen Belastung und der Lufteintrag kann in drei Stufen über Klappen angedrosselt werden. Der Sandfang verfügt über einen Notumlauf.

Zwischenhebewerk

Der Ablauf des Sandfangs mündet in das Zwischenhebewerk, das mit insgesamt vier FU-geregelten Tauchmotorpumpen (max. 55 l/s Fördervolumen) ausgerüstet ist, wobei eine Pumpe als Reserve dient. Die Regelung erfolgt höhenstandsabhängig über zwei redundante Drucksonden im Pumpenschacht. Das vorgereinigte Rohabwasser wird von hier aus über eine Druckrohrleitung in den Zulauf der Siebstufe gefördert. Das Unterwasser des Pumpwerks mündet in die Notumgehungsleitung des Sandfangs.

Feinsiebung

Nachdem das Wasser auf das Niveau der Siebung gehoben wurde, fließt es über eine Verteilerwanne der zweistraßigen Siebanlage zu. Diese besteht aus je vier Filterstufenrechen mit einer Spaltweite von 0,5 mm. Auch hier besteht eine 100 %-ige Redundanz, da vier Aggregate zum Filtrieren der maximalen Abwassermenge von 153 l/s ausreichend wären. Im Falle eines Rückstaus kann über zwei Trichter auch ein Notumlauf aktiviert werden, um das Wasser direkt der Belebung zuzuführen.

Die zurückgehaltenen Stoffe werden über zwei Querförderer den zwei tiefer liegenden, geschlossenen Siebgutwaschpressen zugeführt. Nach dem Waschen und Pressen wird

das Siebgut über eine Absackanlage in zwei Container abgeworfen. Die Siebgrütmung erfolgt, abhängig vom Höhenstand, in der Zulaufrinne.

Die Anlage bietet zudem auch die Möglichkeit den Schlamm der Belebung zu sieben und stellt damit die einzige Möglichkeit dar, das Abwasser der Belebungsstraßen miteinander zu vermischen.

Biologische Reinigung

Nach der Feinsiebung fließt das Wasser im Freigefälle in einen Zulaufverteiler vor den beiden Belebungsbecken. Über dieses Verteilerbauwerk kann der Zulauf zu den seitlich angeordneten Belebungsbecken über Steckschütze geregelt werden. Beide Belebungsstraßen sind als Schlaufenreaktoren ausgebildet d. h., dass das Abwasser mittels eingebauter Trennwände durch das gesamte Becken geleitet wird. Rezirkulationspumpen am Ende des Beckens sollen in Abhängigkeit des O₂-Gehaltes für eine interne Rezirkulation zum Beckenanfang sorgen. Die Pumpen sind zurzeit jedoch nicht funktionstüchtig.

Das Belebungsbecken ist vollflächig mit Belüftungsplatten ausgerüstet, die über drei Wälzkolbengebläse in der Maschinenhalle mit Luft beschickt werden. Zwei der Gebläse sind in Betrieb, eines ist redundant. Die Aggregate verfügen über FUs und werden in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration im Becken geregelt. Die Becken sind in zwei absperrbare Belüftungszonen eingeteilt. Beide Becken können somit in belüftete und unbelüftete Zonen unterteilt werden. Je Zone stehen zwei Rührwerke zur Verfügung, die aber im Betrachtungszeitraum nicht betrieben wurden. Zur Schaumreduzierung existiert mittig beider Belebungsbecken eine Dosiermöglichkeit für Entschäumer. Vom Ende der Schlaufenreaktoren wird das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch pro Straße über Rezirkulationspumpen in die Membranbecken gefördert.

P-Elimination

Zur P-Elimination wird Natriumaluminat eingesetzt. Die Fällmittelstation befindet sich neben dem Schlammstapelbehälter und dosiert über zwei Pumpen entweder in den Zulaufbereich des Sandfangs oder in den Zulauf der Belebung.

Membranfiltration

Die Membranfiltration ist in acht Membranbecken mit jeweils neun Plattenmembranmodulen vom Typ Kubota EK400 und zwei Permeatabzugspumpen aufgeteilt. Jedem Membranbecken ist eine Rezirkulationspumpe zugeordnet, die das Abwasser aus den Belebungsbecken in die Membranfiltration fördert. Vom Ende der Membranbecken fließt das Abwasser-Schlamm-Gemisch über eine Überfallkante in die entlang der Becken angeordnete Rücklauf Rinne und zurück in die zweite Schlaufe der Bioreaktoren.

In Abhängigkeit der hydraulischen Zulaufbelastung wird die Anzahl der zu betreibenden Membrankammern gewählt. Diese können dann mit Minimal- und Maximalflüssen von 21,5 l/(m²·h) und 32 l/(m²·h) filtrieren. Im aktuellen Zustand wird allerdings nur noch mit einem Brutto-Fluss von 32 l/(m²·h) filtriert. Der Permeatabzug erfolgt über zwei Permeatabzugspumpen pro Becken. Diese fördern das gereinigte Wasser in einen Permeatsammelbehälter. Von dort gelangt das Wasser im Freigefälle in den Feuerbach bzw. wird als Brauch- und Betriebswasser genutzt.

Zur Bereitstellung der Crossflow-Belüftung während der Filtration und während der Zwangspausen (9 Minuten Filtration, 1 Minute Pause) stehen acht direkt angesteuerte Drehkolbengebläse zur Verfügung. Jedes Gebläse ist einer Membrankammer zugeordnet.

Die Membrananlage ist so ausgelegt, dass Q_{\max} auch bei Ausfall oder Außerbetriebnahme eines Beckens behandelt werden kann.

Um die Leistungsfähigkeit der Membrananlage zu gewährleisten, wird diese halbjährlich chemisch gereinigt. Die zu reinigenden Module werden dafür in einen Reinigungstank gehoben und das entsprechende Membranbecken währenddessen außer Betrieb genommen. Die Reinigungslösung wird anschließend über eine Ringleitung in die Plattenmembrane geleitet und muss für eine Dauer von ca. 2 Stunden einwirken. Nach Ablauf der Einwirkzeit wird die durchgeflossene Reinigungslösung in Altreinigerbehältern gelagert, die gereinigten Module wieder in das Membranbecken gesetzt und dieses wieder in Betrieb genommen.

Überschussschlammabzug

Der in der biologischen Reinigung anfallende Überschussschlamm wird über zwei Überschussschlammumpfen aus dem Belebungsbecken abgezogen. Durch manuelle Schieber besteht die Möglichkeit, aus den einzelnen Membranbecken Schlamm abzu ziehen. Anschließend fördert eine Druckrohrleitung den Schlamm wahlweise in den Schlammstapelbehälter oder zur Siebung, damit eine Schlammsiebung im Bypass erfolgen kann. Ebenso besteht die Möglichkeit den Schlamm zum Prozesswasserbecken abzuführen.

Schlammstapelung

Der Schlammstapelbehälter ist mit einem Rührwerk, einem höhenverstellbaren, manuellen Trübwasserabzug und einer Rohrleitung zur Schlammabnahme und Abfuhr ausgerüstet. Die abgezogene Schlammmenge wird über ein MID erfasst. Im Moment werden laut Betriebspersonal etwa einmal die Woche ca. 75 m³ Schlamm mittels Tankwagen zur weiteren Behandlung abtransportiert. Das Trübwasser wird in den Prozess- bzw. Schmutzwasserbehälter geleitet und von dort in das Ausgleichsbecken gepumpt.

Prozesswasserbehälter

Der Prozesswasserschacht befindet sich zwischen dem RÜB und dem Schlammstapelbehälter. Hier werden Oberflächenwässer aus der Straße und das Trübwasser aus der Schlammeindickung gesammelt. Über zwei direkt gesteuerte Tauchmotorpumpen wird das Wasser dem Ausgleichsbecken und somit wieder der Kläranlage zugeführt.

Abluftbehandlung

Aus der Rechen- und der Siebhalle sowie dem Chemikalienraum wird die Abluft lediglich über Ventilatoren abgezogen und an die Atmosphäre abgegeben. Es findet keine weitere Behandlung statt.

Heizung

Im Keller der Belebung befindet sich die Wärmepumpenanlage, die aus der Abluftwärme der Gebläse (Belebung und Crossflow) die Betriebswärme erzeugt.

Betriebswasser

Am Permeatsammelbehälter ist die Betriebswasserstation zur Versorgung des Brauch- und Betriebswassernetzes installiert.

4.2.4 Überblick

In Tabelle 4-5 sind die allgemeinen Objektdaten der Kläranlage Konzen zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Objektdaten der Kläranlage Konzen

Objektdaten		
Objekt Standort / Adresse	Kläranlage Konzen am Feuerbach	
Baujahr	1975	
Ausbau / Erweiterung realisiert	2003, 2006	Neubau der Kläranlage
geplante Energiespar- maßnahmen		Betrieb des MBR
Kontaktpersonen Kläranlage	Herr Haas	Tel: 02473 - 96032921

In der nachfolgenden Tabelle 4-6 sind die wichtigsten Anlagendaten zusammengestellt. Neben den Daten zu Betrachtungszeitraum, Einwohnerwerten und Verfahrensart sind dort auch Angaben zu Schlammanfall und Energieverbrauch aufgeführt. Diese Angaben bilden die Grundlage für die weitere Energieanalyse.

Anmerkung: Für die erforderliche Angabe der Höhendifferenz aller Pumpwerke wurde ein Wert von 8 m angegeben.

Auf welchen Grundlagen und Annahmen die weiteren Zahlenwerte basieren und wie sie errechnet wurden, wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels genauer erläutert.

Tabelle 4-6: Anlagendaten der Kläranlage Konzen

Anlagendaten		
Betriebsjahr	2007	
Einwohnerwert Ausbau (85%-Wert)	9.700	[EW]
BSB5 (aktuelle Frachtbelastung Zulauf KA)	134	[t/a]
Einwohnerwert aktuell Zulauf KA (60 g BSB5/EW*d)	6.127	[EW BSB]
Angeschlossene Einwohner	6.200	[Einw.]
C-Abbau (Schlammalter ca. 5 Tage)	Nein	
Nitrifikation (Schlammalter ca. 13 Tage)	Nein	
Nitrifikation (Schlammalter > 25 Tage)	Ja	
Filtration	Ja	
Hebwerke (Höhendifferenz aller Einlauf- und Zwischenhebwerke exkl. Filtration)	8	[m]
Abwasseranfall	2.132.388	[m ³ /a]
Rohschlammanfall	31.628	[m ³ /a]
Trockensubstanz im Rohschlamm	195	[t TR/a]
Organischer Anteil Schlammeintrag in Faulung	0	[t oTR/a]
Faulgasanfall gesamt [Normkubikmeter]	0	[Nm ³ /a]
Faulgasnutzung Kessel	0	[Nm ³ /a]
Faulgasnutzung BHKW	0	[Nm ³ /a]
Faulgasverkauf	0	[Nm ³ /a]
Abfackelung Faulgas	0	[Nm ³ /a]
Wärmeprod. intern genutzt (Kessel, BHKW)	0	[MWh/a]
Einkauf Wärme-Energie (z.B. Heizöl)	0	[MWh/a]
Endenergieverbrauch Wärme gesamt	0	[MWh/a]
Elektrizitätsproduktion intern (BHKW)	0	[MWh/a]
Einkauf Elektrizität (Netz EVU)	1.663	[MWh/a]
Elektrizitätsverbrauch Belebung	114	[MWh/a]
Endenergieverbrauch Elektrizität gesamt	1.663	[MWh/a]

Die Angabe der BSB5-Frachtbelastung im Zulauf erfolgt aus den zuvor durch Rückrechnung aus den Schlammengen ermittelten Einwohnerwerten (siehe 4.2.2) mit einer einwohnerspezifischen Belastung von 60 g/(EW·d).

4.3 Energieverbrauch und Energiekosten

Elektrische Energie:

Wie bereits erläutert, beträgt der Gesamtstrombezug der Kläranlage für den Zeitraum Mai 2007 bis April 2008 laut Rechnung des EVU 1.663.309 kWh für die Kläranlage. Den monatlichen Strombezug zeigt die Abbildung 4-2.

KA Konzen Energieverbrauch

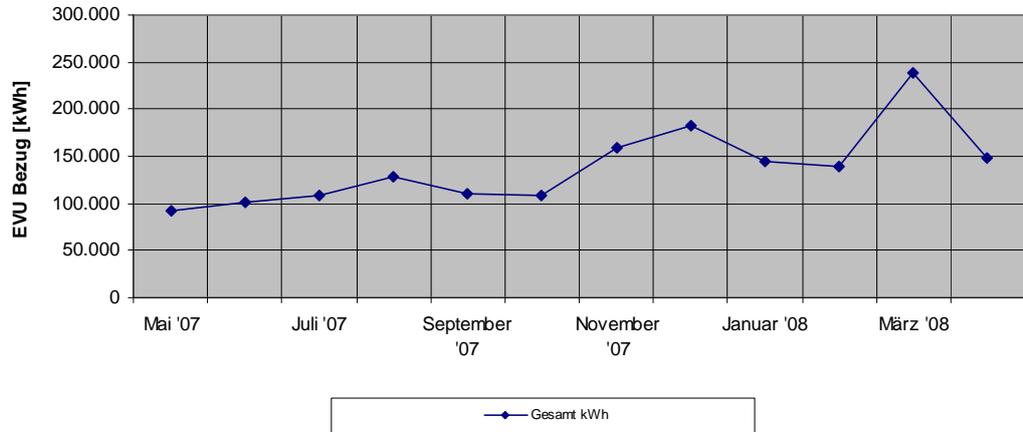


Abbildung 4-2: Monatlicher Strombezug der KA Konzen

Im Betrachtungszeitraum betragen die Kosten für die vom EVU bezogene Energie ca. 191.800 € für die Kläranlage. Daraus errechnet sich ein spezifischer Mischpreis von 11,5 Cent/kWh.

Thermische Energie

Die erforderliche Raumwärme wird über den Betrieb einer Wärmepumpe, einer Zusatzheizung der Wärmepumpe und einer elektrischen Heizung gedeckt. Der Verbrauch der Wärmepumpe betrug im Jahr 2007 10.000 kWh. Die Zusatzheizung der Wärmepumpe verbrauchte 13.200 kWh. Dieser Energieverbrauch und die entsprechenden Kosten wurden den Kosten für elektrische Energie zugeordnet.

Alle Daten über den Energiebezug und die daraus resultierenden Kosten sind in den nachfolgenden Tabellen noch einmal aufgeführt.

Tabelle 4-7: Energieverbrauch der KA Konzen von 2007 bis 2008

Energieverbrauch	Eigenproduktion	Einkauf	Gesamt
Elektrizität	0 MWh/a	1.663 MWh/a	1.663 MWh/a
Wärme	0 MWh/a	0 MWh/a	0 MWh/a
Endenergieverbrauch gesamt	0 MWh/a	1.663 MWh/a	1.663 MWh/a

Tabelle 4-8: Energieverbrauchskosten der KA Konzen von 2007 bis 2008

Energie- verbrauchskosten	effektive Ener- giepreise	Energie- verbrauchskosten	Anteil
Elektrizität (inkl. Leistung etc.)	11,5 Cent/kWh	191.800 €/a	100%
Wärme	0,0 Cent/kWh	0 €/a	0%
Endenergiekosten gesamt		191.800 €/a	100%

4.4 Energieverbrauchermatrix

Die Erfassung des Stromverbrauchs der Kläranlage Konzen wurde oben bereits erläutert. Im Betrachtungszeitraum Mai 2007 bis April 2008 wurden insgesamt **1.633.309 kWh** elektrische Energie vom EVU bezogen.

Zur Beurteilung des Ist-Zustandes und zum Lokalisieren von Einsparpotenzialen wurde zunächst untersucht, wie sich der Energiebedarf auf die einzelnen Verfahrensstufen und Verbrauchergruppen aufteilt. Die Aufteilung wird im Folgenden grafisch dargestellt und kommentiert. Der Rechengang und der Energieverbrauch jedes Verbrauchers sind der Anlage 4 zu entnehmen. Die Bewertung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate oder Aggregategruppen erfolgt im Kapitel 5.

Abbildung 4-3 zeigt in der Gesamtübersicht die Aufteilung der im Jahr 2007 - 2008 benötigten elektrischen Energie auf die einzelnen Verfahrensstufen. Erwartungsgemäß beansprucht die Membranstufe mit 78,2 % den größten Anteil des Elektrizitätsverbrauchs. Dies entspricht 1.172.244 kWh. Die Verfahrensgruppe mit dem zweitgrößten Energiebedarf sind die Hebewerke mit 7,7 % des Gesamtbedarfs. Die Hebewerke benötigen 115.417 kWh. Die biologische Reinigung benötigt mit 7,6 % ähnlich viel Energie wie die Hebewerke, dies entspricht 113.983 kWh. Die Verfahrensgruppe Infrastruktur ist der viertgrößte Verbraucher und benötigt mit 46.231 kWh im Jahr etwa 3,1 % der Gesamtenergie. Die mechanische Reinigungsstufe trägt mit 2,9 % bzw. 43.329 kWh zum Gesamtstromverbrauch bei. Der Strombedarf für die Ausgleichsbecken liegt bei 0,4 % und 5.816 kWh. In ähnlichen Größenordnungen liegt der Anteil der Fällmitteldosierung. Es fallen lediglich 1.587 kWh im Jahr an, was einem Anteil von 0,1 % entspricht.

Energieverbrauch IST

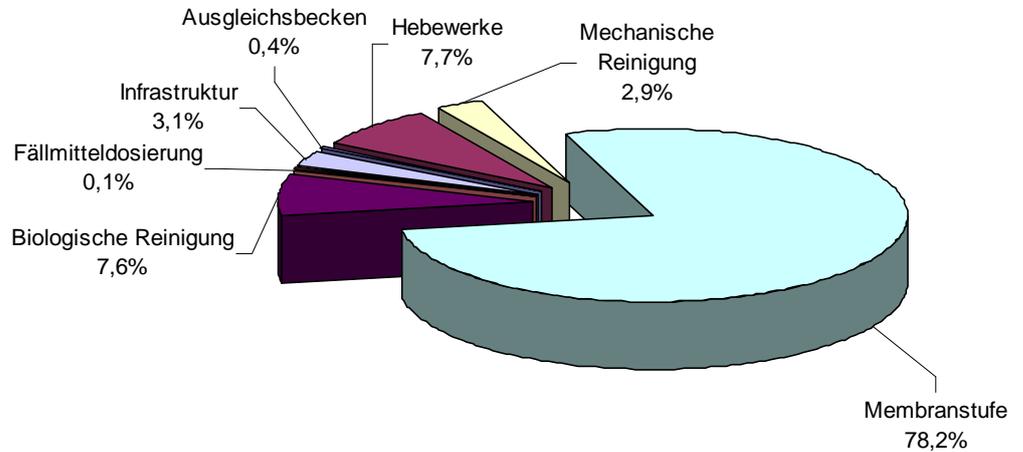


Abbildung 4-3: Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs im Ist-Zustand

Im Folgenden werden die einzelnen Verfahrensstufen hinsichtlich ihres Energieverbrauches genauer betrachtet und bewertet. So zeigt Abbildung 4-4 die Aufteilung des Stromverbrauchs für die mechanische Stufe inklusive der Hebewerke. Den größten Anteil des Elektrizitätsverbrauchs in dieser Gruppe benötigen die Hebewerke (Zwischenpumpwerk und Schmutzwasserpumpwerk) mit 72,7 % was 115.417 kWh im Jahr entspricht. Durch die Belüftung des Sandfangs werden 28.820 kWh bzw. 18,2 % verbraucht. Der Rechen (14.509 kWh) ist mit 9,1 % der kleinste Verbraucher.

Mechanische Stufe

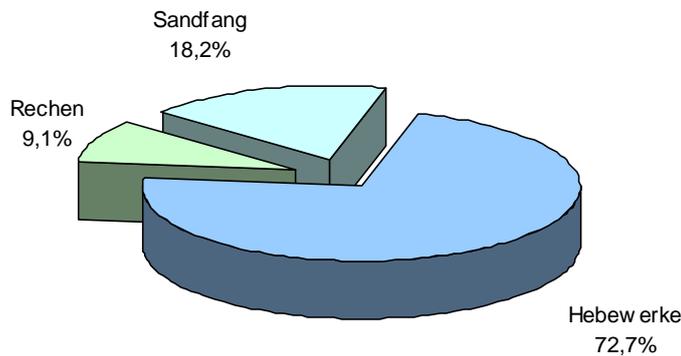


Abbildung 4-4: Verteilung des Strombedarfs der mechanischen Stufe inkl. Hebewerke

Für die biologische Verfahrensstufe sieht die Aufteilung des Stromverbrauchs folgendermaßen aus (Abbildung 4-5):

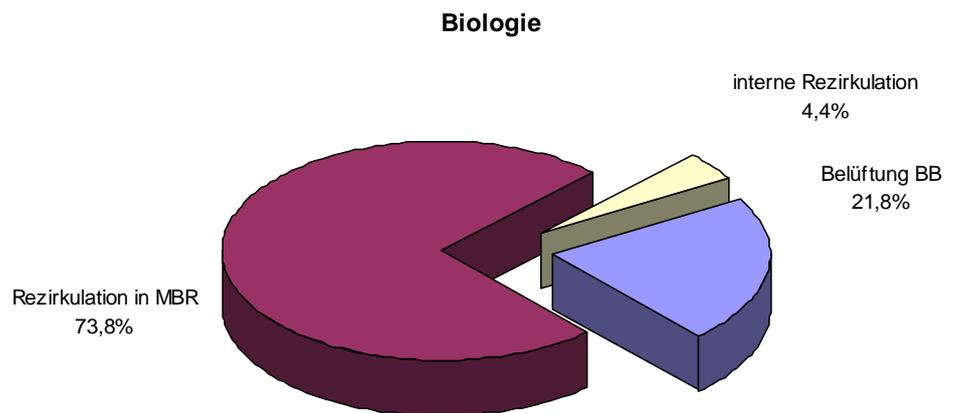


Abbildung 4-5: Verteilung des Strombedarfs der biologischen Stufe

Der größte Stromverbrauch entfällt auf die Rezirkulation der Belebungsbecken in die Membranbecken. Hier werden mit 84.077 kWh 73,8 % der elektrischen Energie dieser Verfahrensstufe benötigt. Dies entspricht 5,6 % des Gesamtstrombedarfs der Kläranlage. Einen ebenfalls bedeutenden Anteil am Stromverbrauch der Biologie hat die Belüftung der Belebungsbecken (21,8 %). Sie trägt mit 24.836 kWh und 1,7 % zum Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage bei. Der Stromverbrauch der Rezirkulation in der Biologie liegt bei 5.070 kWh bzw. 4,4 %. Diese ist momentan aber nicht in Betrieb.

Nach der biologischen Reinigung folgt die Membranstufe. Diese ist der Hauptverbraucher der Kläranlage Konzen. Mit 1.172.244 kWh verbraucht die Membranstufe mehr als drei Viertel der gesamten Energie der Kläranlage (78,2 %).

Membranfiltration

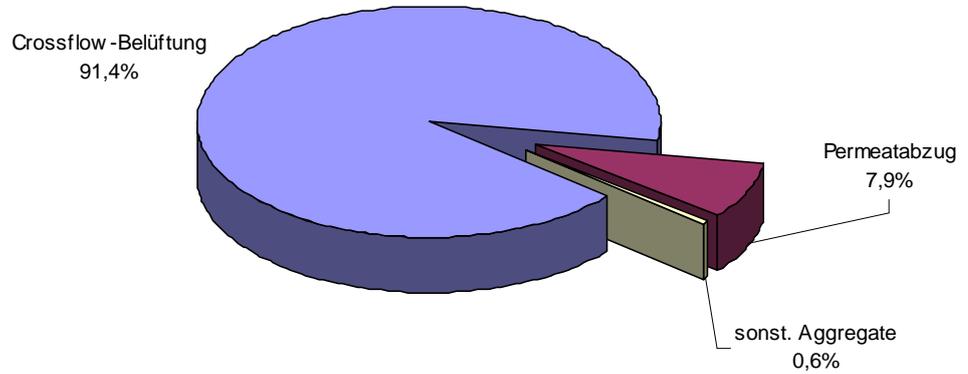


Abbildung 4-6: Verteilung des Strombedarfs der Membranstufe

Innerhalb dieser Stufe hat die Belüftung der Membranmodule mit 91,4 % den größten Anteil am Energieverbrauch, dies entspricht 1.071.825 kWh. Der Permeatabzug ist mit 7,9 % der nächstgrößere Verbraucher. Im Jahr verbrauchen die Permeatpumpen 93.089 kWh an elektrischer Energie. Unter den sonstigen Aggregaten sind Reinigung und Ansetzstation der Reinigungskemikalien zusammengefasst.

Abbildung 4-7 zeigt die Verteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbrauchergruppen, die der Infrastruktur zugeordnet werden. Diese machen einen Anteil von etwa 3,1 % des Gesamtbedarfs der Kläranlage an elektrischer Energie aus. Davon entfallen 61,3 % bzw. 28.342 kWh auf die Betriebsmittel und 19,1 % (8.833 kWh) auf das Betriebsgebäude. Der prozentuale Anteil der Betriebsmittel ist in Konzen relativ hoch, da darunter auch die Wärmepumpe für die Beheizung fällt. Die Stromversorgung des Bodenfilters verbraucht im Jahr rund 4.791 kWh, was 10,4 % der Energie für Infrastruktur entspricht. Die Abluftreinigung ist der kleinste Verbraucher der Infrastruktur und benötigt mit 4.265 kWh genau 9,2 % des Energieverbrauchs.

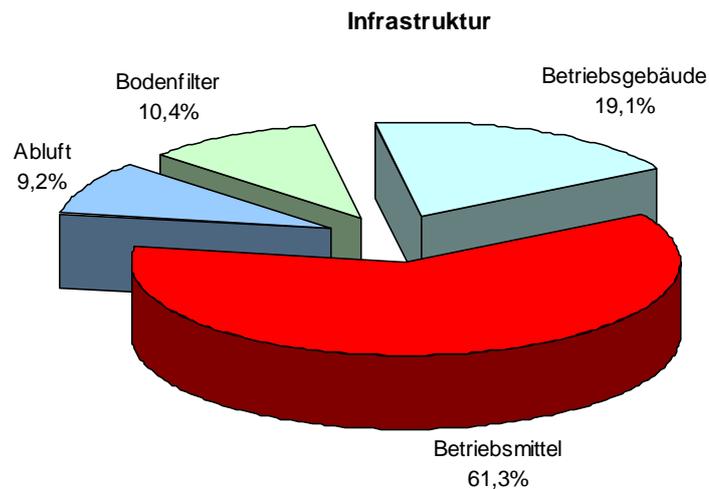


Abbildung 4-7: Verteilung des Strombedarfs der Aggregate der Infrastruktur

Da die Betriebsmittel mit 61,3 % einen recht großen Anteil am Strombedarf der Infrastruktur ausmachen, wird diese Aggregategruppe noch einmal genauer betrachtet (Abbildung 4-8).

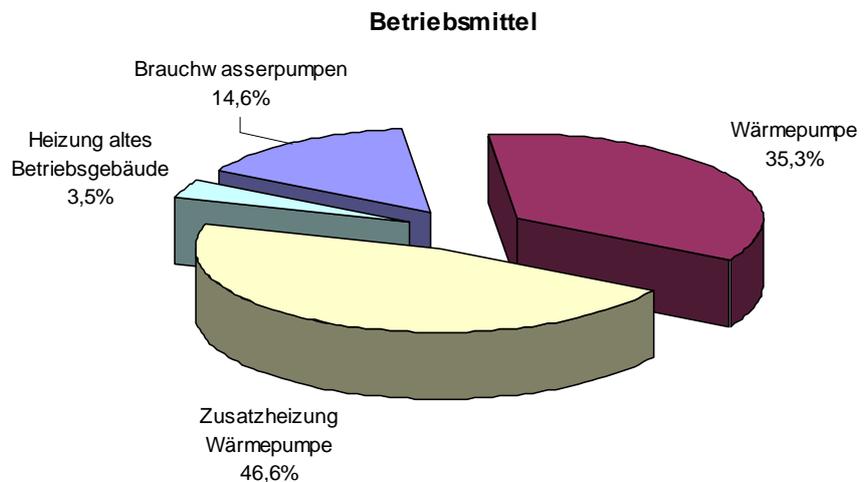


Abbildung 4-8: Verteilung des Strombedarfs der Betriebsmittel

Es fällt auf, dass die Zusatzheizung der Wärmepumpe bereits 46,6 % dieser Verfahrensgruppe ausmacht. Hier werden 13.200 kWh im Jahr verbraucht. Der Betrieb der Wärmepumpe benötigt zusätzlich ca. 10.000 kWh, was einem Anteil von 35,3 % entspricht. Die Brauchwasserpumpen verbrauchen 4.142 kWh und sind damit mit 14,6 % der drittgrößte Verbraucher dieser Gruppe. Der restliche Strombedarf entfällt auf die Heizung des alten Betriebsgebäudes (3,5 % bzw. 1.000 kWh).

Abschließend ist in Abbildung 4-9 die Verteilung des Strombedarfs auf die Hauptverbrauchergruppen, unabhängig von der Verfahrensstufe, dargestellt. Wie bereits zuvor erläutert, fällt der größte Teil des Strombedarfs auf die Belüftung der Membranbelegung

(71,5 %), die Hebewerke (7,7 %) und den Permeatabzug (6,2 %). Die Umwälzung im Belebungsbecken geht mit 5,6 % in die Bilanz der Kläranlage Konzen ein. Die anderen Hauptverbraucher haben verhältnismäßig geringe Anteile am Stromverbrauch. Die Infrastruktur und Belüftung der Belebung haben einen Anteil von 3,10 bzw. 1,7 %. Kleinere Verbrauchergruppen wurden unter „sonstige“ zusammengefasst. Sie benötigen lediglich 0,5 % des Strombedarfs der Kläranlage.

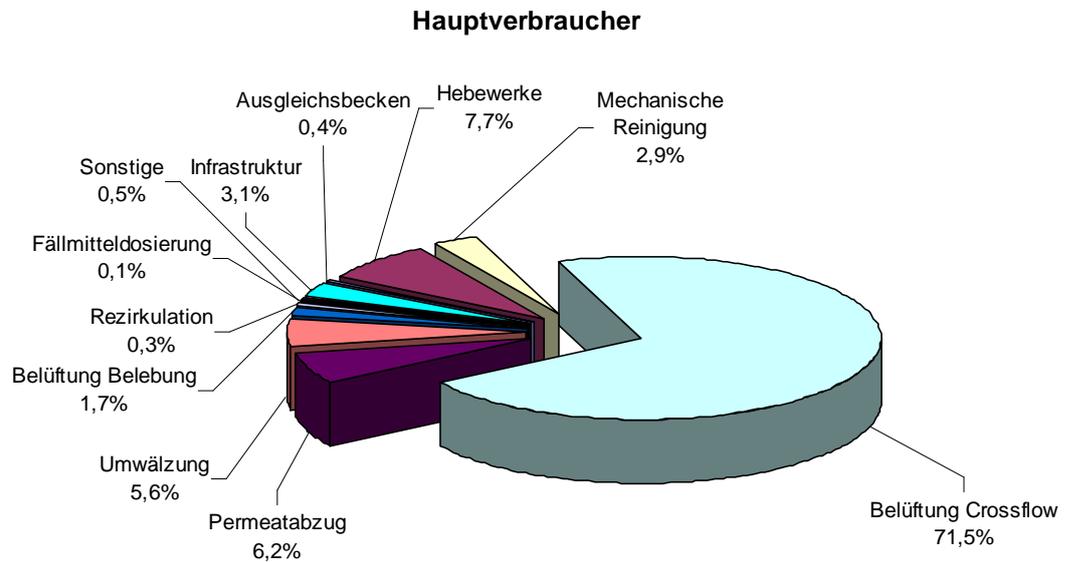


Abbildung 4-9: Verteilung des Strombedarfs auf die Hauptverbrauchergruppen

5 BEWERTUNG DES IST-ZUSTANDES KONZEN

Als Grundlage für die Bewertung des Ist-Zustandes der Kläranlage Konzen dienen die gemessenen Werte aus Energieverbrauch und Abwassermengen. Der Größenunterschied des Energieverbrauchs in Abhängigkeit von Trockenwetter- oder Mischwasserabfluss wird klar erkennbar. Die folgende Abbildung verdeutlicht dies in Abhängigkeit der tatsächlichen Verbrauchswerte des Klärwerks Konzen:

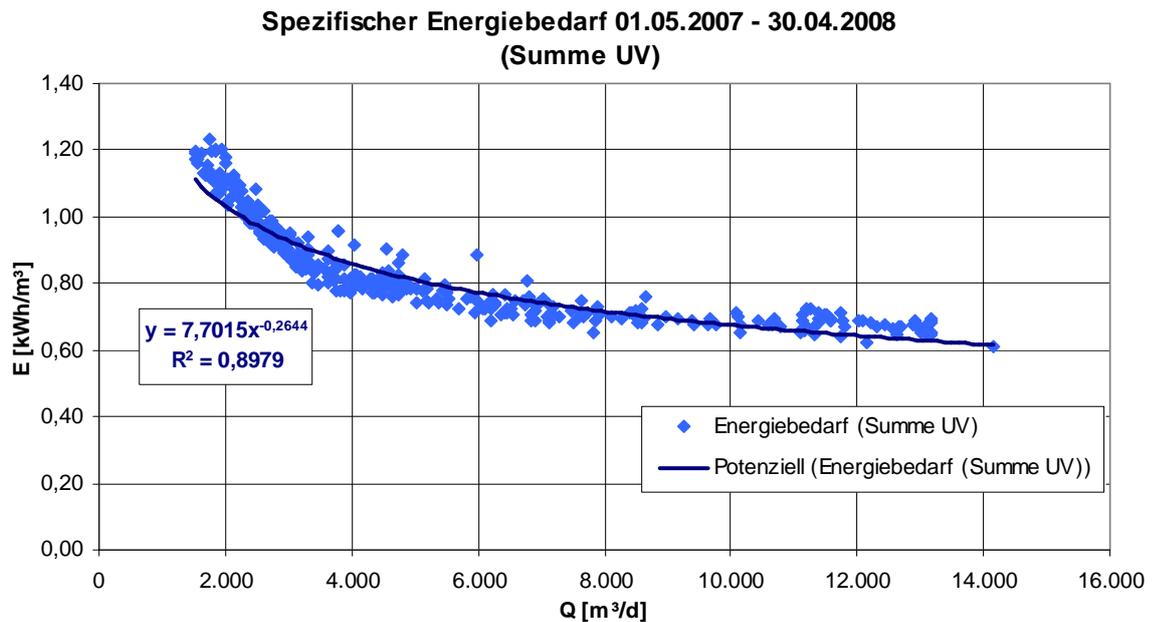


Abbildung 5-1: spezifischer Energiebedarf in Konzen

Es ist zu erkennen, dass bei Trockenwetterabflussmengen unter 3.000 m³/d spezifische Energieverbrauchswerte zwischen 0,9 und 1,2 kWh/m³ erreicht werden. Bei hohen Mischwasserabflüssen von über 10.000 m³/d werden spezifische Energieverbrauchswerte < 0,70 kWh/m³ erreicht. Der genannte mittlere spezifische Energieverbrauch von 0,70 kWh/m³ bezieht sich auf den Abfluss im Jahresmittel von gut 5.826 m³/d. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde daher auch der Energiebedarf der Modellanlage bei mittlerem Mischwasserabfluss betrachtet.

Zunächst erfolgt zur Beurteilung der membranspezifischen Anlagenteile eine Gegenüberstellung der mittels der Modellanlage theoretisch ermittelten Werte mit den Ist-Werten des Klärwerks Konzen. Da es sich bei dem auf dem Klärwerk Konzen gemessenen Wert um einen Wert handelt, der sich auf die Jahresabwassermenge inkl. Niederschlagswasser bezieht, wurde der entsprechende Wert der Modellanlage zum Vergleich herangezogen. Dies ist grafisch und tabellarisch in der folgenden Abbildung und der folgenden Tabelle dargestellt:

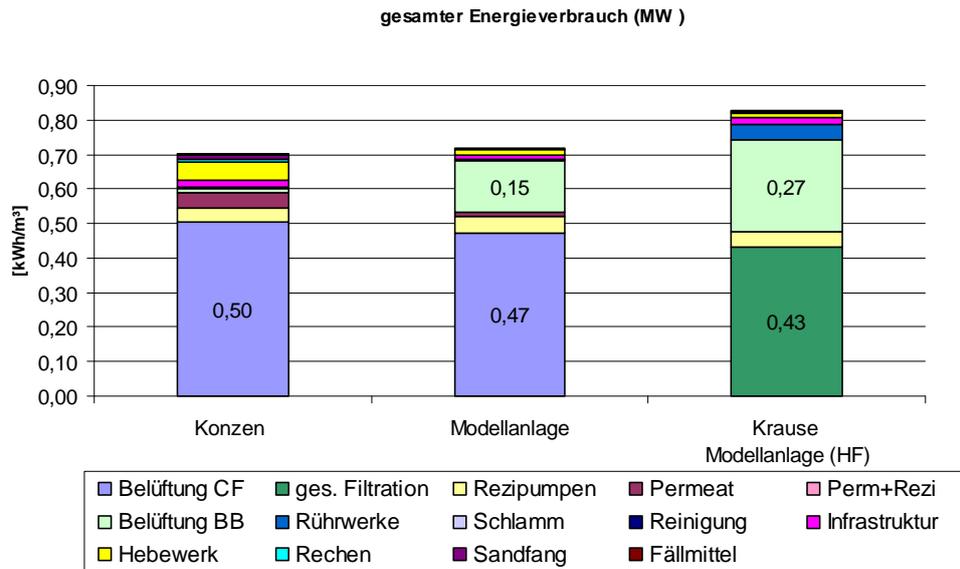


Abbildung 5-2: Gegenüberstellung Gesamtenergieverbrauch KA Konzen und verschiedene Modellanlagen

Erkennbar ist, dass die erstellte Modellanlage für die Membranstufe nah an den tatsächlich gemessenen Werten auf der Kläranlage Konzen liegt. Sie liegt sogar noch unterhalb der Modellanlage von Krause. Der Verbrauch der Crossflow-Belüftung ist etwas geringer (0,3 kWh/m³), dafür ist der Verbrauch der Belebungsbelüftung deutlich höher. Grund hierfür ist, dass die Belebungsgebläse auf dem Klärwerk Konzen sehr niedrige reale Betriebsstunden aufweisen. Der Verbrauch in Konzen liegt also deutlich unter dem Idealwert von 0,15 kWh/m³.

Tabelle 5-1: Vergleich des Energieverbrauchs der Membranstufe

Verbraucher	Konzen	Modellanlage	Krause Modellanlage (HF)
	[kWh/m ³]	[kWh/m ³]	[kWh/m ³]
Belüftung CF	0,50	0,47	0,00
ges. Filtration	0,00	0,00	0,43
Rezipumpen	0,04	0,05	0,05
Permeat	0,04	0,01	0,00
Perm+Rezi	0,00	0,00	0,00
Belüftung BB	0,01	0,15	0,27
Rührwerke	0,00	0,00	0,04
Schlamm	0,00	0,00	0,00
Reinigung	0,00	0,00	0,00
Infrastruktur	0,02	0,01	0,02
Hebewerk	0,05	0,01	0,01
Rechen	0,01	0,00	0,00
Sandfang	0,01	0,01	0,01
Fällmittel	0,00	0,00	0,00
Summe:	0,70	0,72	0,83

Insgesamt liegt die Kläranlage Konzen im Bereich der Membranfiltration sogar noch unterhalb der Vergleichswerte der idealen Modellanlage, lediglich die Permeatpumpen und die Crossflow-Belüftung weisen erhöhte Werte auf.

Der Gesamtenergieverbrauch der Modellanlage bei Mischwasserzufluss liegt bei 0,72 kWh/m³, der Verbrauch in Konzen knapp darunter, und zwar bei 0,70 kWh/m³.

Hierbei ist zu bemerken, dass die Wassermenge im Klärwerk Konzen deutlich höher liegt, als in der Modellanlage angenommen. Würde man die Wassermenge im Zulauf der Modellanlage erhöhen, so würde sich demnach ein geringerer Energieverbrauch der Belebungsgebläse einstellen. Diese würden dann durch die längeren Filtrationszeiten und den größeren Sauerstoffeintrag der Crossflow-Gebläse entlasten. Durch die erhöhten Wassermengen aus Niederschlag und Fremdwasser in Konzen ergibt sich ein relativ geringer spezifischer Energieverbrauch.

Ein Vergleich des Energieverbrauchs bezogen auf die angeschlossenen Einwohner zeigt deutliche Abweichungen zwischen Modellanlage und realen Werten in Konzen. Die Tabelle 5-2 stellt die Ergebnisse einander gegenüber:

Tabelle 5-2: Energieverbrauch bezogen auf Einwohner

Verbraucher	Modellanlage berechnet	Konzen gemessen
	[kWh/(EW·a)]	[kWh/(EW·a)]
Belüftung CF	44,47	174,93
Rezipumpen	3,52	14,55
Permeat	0,81	15,19
Belüftung BB	14,02	4,05
Rührwerke	1,19	0,00
Schlamm	0,00	0,08
Reinigung	0,00	1,20
Infrastruktur	1,30	7,55
Hebewerk	1,31	18,84
Rechen	0,14	2,37
Sandfang	0,52	4,70
Fällmittel	0,00	0,26
Summe:	67,28	243,72

Es ist erkennbar, dass der Verbrauch in Konzen, bezogen auf die angeschlossenen Einwohner, fast 4-mal so groß ist wie der Verbrauch der Modellanlage. Dieser Größenunterschied ist auf die unterschiedlichen Wassermengen zurückzuführen, die der Berechnung zu Grunde liegen (Modellanlage 911.770 m³/a, Konzen 2.132.388 m³/a). Demnach ist zwar im Vergleich der spezifische Energieverbrauch bezogen auf die Wassermenge recht ähnlich, betrachtet man jedoch die angeschlossenen Einwohner als Grundlage, so ergibt sich ein deutlicher Unterschied. Für die Bewertung des Ist-Zustandes werden die spezifischen Energieverbräuche bezogen auf die zufließende Wassermenge als Idealwerte herangezogen.

Die Bewertung des energetischen Ist-Zustandes der Kläranlage wird für die nicht-membranspezifischen Verfahrensstufen durch den Vergleich des Energieverbrauchs der einzelnen Verfahrensstufen mit den Hilfwerten des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ durchgeführt. Dabei wird der Stromverbrauch über die Zahl der an die Kläranlage angeschlossenen Einwohnerwerte auf einwohnerspezifische Werte umgerechnet, sodass sich entsprechende Vergleichszahlen ergeben. In Tabelle 5-3 ist der Energienachweis nach MUNLV für das Klärwerk Konzen zusammengefasst. Dabei ist anzumerken, dass sich der angegebene Richtwert auf konventionelle Kläranlagen ohne Membranfiltration bezieht.

Tabelle 5-3: Spezifischer Energieverbrauch und Vergleichswerte nach MUNLV für konventionelle Kläranlagen für das Klärwerk Konzen

Energienachweis	IST-Zustand	Richtwert	Idealwert
gesamter spez. Elektrizitätsverbrauch pro EW BSB	271 kWh/EW a	54 kWh/EW a	42 kWh/EW a
spez. Elektrizitätsverbrauch Belebung pro EW BSB	19 kWh/EW a	36 kWh/EW a	28 kWh/EW a
Grad der gesamten Faulgasnutzung	0 %	95 %	97 %
Grad der Faulgasumwandlung in Kraft/Elektrizität	0 %	25 %	26 %
spez. Faulgasproduktion pro kg oTR eingetragen	0 l/kg oTR	450 l/kg oTR	475 l/kg oTR
Eigenversorgungsgrad	Wärme	0 %	90 %
	Elektrizität	0 %	31 %
		95 %	97 %
		25 %	26 %
		450 l/kg oTR	475 l/kg oTR
		90 %	95 %
		31 %	41 %

Der spezifische Energieverbrauch liegt mit 271 kWh/(EW·a) für die Gesamtanlage aufgrund des hohen Energiebedarfs der Membranfiltration sehr hoch. Dies ist in den Richt- und Idealwerten nicht berücksichtigt. Betrachtet man allein die Belebung, liegt diese in ihrem spezifischen Energieverbrauch mit 19 kWh/(EW·a) sehr günstig. Der Richtwert liegt bei Kläranlagen dieser Größenordnung bei 36 kWh/(EW·a) und der Idealwert bei 28 kWh/(EW·a). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Aggregate der Membranfiltration der Verfahrensgruppe der Nachklärung zugeordnet wurden, also auch die Crossflow-Gebläse. Diese tragen jedoch auch einen Teil zur Deckung des Sauerstoffbedarfs der Belebung bei und müssten anteilig der Belebung zugeordnet werden. Die Betrachtung nach MUNLV ist für die Gesamtanlage an dieser Stelle also wenig sinnvoll und sollte sich auf die einzelnen nicht membranspezifischen Verfahrensschritte beschränken.

Entsprechend detaillierte Tabellen finden sich in der Anlagen 5 und 6. Dabei werden der Stromverbrauch der Abwasserreinigung auf die angeschlossenen Einwohnerwerte und der Stromverbrauch der Schlammbehandlung auf das Volumen des behandelten Schlammes bezogen. Die Software des MUNLV rechnet dabei standardmäßig mit der auf S. **Fehler! Textmarke nicht definiert.** angegebenen Schlammmenge (in diesem Fall der Überschussschlamm aus der Belebung/Membranfiltration).

In der nachfolgenden Tabelle 5-4 sind die Verfahrensstufen mit den genauen Werten aufgelistet, deren spezifischer Energieverbrauch wesentlich von den Hilfswerten des MUNLV abweicht. Hierbei wurden die auf Verfahrensgruppen bezogenen Vergleichswerte als Mittelwerte der, dem Handbuch beiliegenden Software des MUNLV zu entnehmenden, Hilfswerte angesetzt. Die vollständige Tabelle mit allen spezifischen Energieverbräuchen findet sich in Anlage 3.

Tabelle 5-4: Verfahrensstufen mit erhöhtem Energiebedarf nach MUNLV

Pos.	Verfahren	Verbrauch [kWh/EW]	Hilfswert [kWh/EW]		Abweichung auf Ø des Hilfs- wertes bezogen [%]
			von	bis	
1.1	Regenüberlaufbecken	0,95	0,2	0,6	138%
3.1	Rechen	2,37	0,1	0,2	1480%
4.1	Langsandfang	4,70	0,50	1,00	527%
15.1	Licht, Labor, Werkstatt	1,44	0,18	0,36	433%
16.2	Brauchwasser	0,68	0,26	0,52	74%
16.4	Heizung	3,95	0,37	0,74	612%
17.2	Lüftungsanlagen	0,70	0,15	0,30	211%

Für die membranspezifischen Anlagenteile erfolgt die Bewertung über die zuflussspezifischen Kennzahlen der Modellanlage (siehe Tabelle 5-5 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Tabelle 5-5: Membranspezifische Verfahrensstufen mit erhöhtem Energiebedarf

Pos.	Verfahren	Verbrauch [kWh/m ³]	Hilfswert [kWh/m ³]	Abweichung auf Ø des Hilfs- wertes bezogen [%]
7.12	Permeatpumpen	0,04	0,01	300%

Nachfolgend werden die in Tabelle 5-4 und Tabelle 5-5 vorliegenden Werte kurz kommentiert und bewertet.

Crossflow-Belüftung

Die Crossflow-Gebläse weisen einen leicht erhöhten Energieverbrauch auf. Sie benötigen rund 11 % mehr Energie, als es die Idealwerte der Modellanlage vorsehen. Mögliche Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs werden in Kapitel 6 analysiert.

Permeatpumpen

Der Betrieb der Permeatpumpen verbraucht im Jahr 93.089 kWh. Spezifisch betrachtet weicht der Energieverbrauch um 300 % von dem errechneten Idealwert der Modellanla-

ge ab. Gründe hierfür liegen möglicherweise in der derzeitigen Steuerung. Im Kapitel 6.3.2 wird eine mögliche Maßnahme zur Einsparung genauer betrachtet und erläutert.

Regenüberlaufbecken

Der Betrieb des Regenüberlaufbeckens liegt energetisch betrachtet 138 % über den Mittelwerten des Handbuchs. Hauptverbraucher sind die beiden Entleerungspumpen, die 3.964 kWh im Jahr verbrauchen. Der erhöhte Wert beruht auf der Tatsache, dass das im Handbuch betrachtete RÜB nicht durch Pumpen, sondern im Freigefälle entleert wird. Durch die örtlichen Bedingungen ergibt sich keine Möglichkeit, das Regenüberlaufbecken im Freigefälle zu entleeren.

Rechen

Im Gegensatz zur Modellanlage sind im Bereich des Rechens noch zusätzliche Siebe mit einer Spaltweite von 0,5 mm vorhanden. Durch ihren Betrieb wird der Energiebedarf angehoben. Da für Plattenmembranen laut Hersteller keine 3 mm Feinsiebe nötig sind, wurden diese in der Modellanlage ebenfalls nicht betrachtet. Für den Rechen wurde zunächst der Rechengutanfall geprüft, da der Verdacht nahelag, dass der hohe Stromverbrauch aus erhöhtem Rechengutanfall resultieren könnte. Aus den Betriebsdaten können nur Gesamtvolumen und -gewicht für Rechen- und Sandfanggut gemeinsam entnommen werden. Demnach fielen in 2007 insgesamt 163,9 m³ bei einem Gewicht von 56,3 t an. Daraus ergäbe sich eine Dichte von 0,3 t/m³ für das gemischte Gut. Bei einer durchschnittlichen Dichte von 1,6 t/m³ für Sandfanggut (ATV Arbeitsbericht „Sandabscheideranlagen“) und 1,1 t/m³ für (kompaktiertes) Rechengut (http://www.wau.boku.ac.at/fileadmin/_/H81/H811/Skripten/811108/811108_B_04_UE.pdf) ist dieser Wert unrealistisch.

Wenn man von einem Anteil des Rechengutes von 51 % am Gesamtvolumen des gemischten Sandfang- und Rechengutes ausgeht, ergäbe sich ein Rechengutanfall von etwa 83.500 l/a, was mit dem theoretisch ermittelten Rechengutanfall von etwa 96.000 l/a korrespondieren würde. Damit läge kein erhöhter Rechengutanfall vor.

Grundsätzlich ist zu bemerken, dass auf einer Membrankläranlage, aufgrund der erhöhten Anforderungen an die mechanische Vorreinigung, mehr Rechen- bzw. Siebgut anfällt als auf einer herkömmlichen kommunalen Kläranlage mit deutlich größeren Stababständen.

Längssandfang

Bei dem Sandfang handelt es sich um einen belüfteten Längssandfang mit einem Gerinne und seitlichem Fettfang. Der tatsächliche Verbrauch liegt mit 527 % Abweichung deutlich über dem Idealwert. Dies ist auf einen hohen Lufteintrag von 1,73 m³/min in Polstufe 1 und 3,97 m³/min in Polstufe 2 zurückzuführen. Mögliche Maßnahmen werden in Kapitel 6 analysiert.

Licht, Labor, Werkstatt

Der spezifische Energiebedarf des Betriebsgebäudes für Licht, Labor, Werkstätten etc. ist gegenüber den Vergleichswerten des MUNLV um 433 % erhöht. Dabei ist zu be-

rücksichtigen, dass für diese Bereiche keine eigenen Zähler vorliegen und daher der Stromverbrauch nur anhand von Literaturwerten geschätzt werden kann.

Die Erfahrung zeigt, dass die tatsächlichen Energiebedarfswerte im Bereich der Infrastruktur häufig von den Richtwerten abweichen. Dies liegt darin begründet, dass auf den Klärwerken heutzutage häufig auch Betriebspunkte für umliegende Anlagen untergebracht sind und daher mehr Personal auf dem Klärwerk im Einsatz ist. Dies ist auch auf dem Klärwerk Konzen der Fall. Daraus ergeben sich größere Sozialtrakte und Büroflächen, die mit höherem Energiebedarf für Beleuchtung, Steckdosen, Warmwasserbereitung etc. einhergehen. Nennenswerte Optimierungspotenziale sind in diesem Bereich üblicherweise nicht zu finden.

Grundsätzlich wird vom Personal bereits ein bewusster Umgang mit Energie gepflegt (Ausschalten der Beleuchtung bei Verlassen eines Raumes etc.). Eine weitere Sensibilisierung in diesem Bereich ist aber immer empfehlenswert.

Brauchwasser

Die Brauchwasseraufbereitung benötigt über 4.142 kWh/a und liegt damit 74 % über den Werten des Handbuchs. Das Brauchwasser wird aus dem Permeat der Membranfiltration gewonnen und für die Abreinigung der Rechen und Siebe, die Rechen- und Siebgutwaschpressen und den Sandwaschklassierer benötigt. Der Anteil des Brauchwassers am Gesamtstromverbrauch des Klärwerks ist so gering (0,28 %), sodass auf eine genauere Betrachtung verzichtet wird.

Heizung

Der Energieverbrauch für die Heizung liegt mit 23.200 kWh/a deutlich über den Mittelwerten des Handbuchs. Insgesamt beträgt die Abweichung 612 %. Dieser hohe Wert lässt sich vor allem auf den Betrieb der Wärmepumpe und der Zusatzheizung der Wärmepumpe zurückführen. Ein mögliches Einsparpotenzial ist an dieser Stelle nicht ersichtlich.

Lüftungsanlagen

Die Lüftungsanlagen erfordern insgesamt 4.265 kWh elektrische Energie. Damit liegen sie für eine Anlage dieser Größenordnung mit 211 % weit über dem üblichen Energieverbrauch. Den größten Anteil am Stromverbrauch dieser Verfahrensgruppe haben die Abluftventilatoren der Rechen- und der Siebanlage (2.549 kWh/a und 1.069 kWh/a). Die Ventilatoren in der Rechenhalle laufen aus Ex-Schutzgründen 24 h/d. Da dort eventuell zulaufende brennbare Flüssigkeiten, die eine explosionsfähige Atmosphäre erzeugen könnten, zurückgehalten werden würden, ist ein permanenter Abluftabzug aus der Siebanlage nicht mehr erforderlich. Hier laufen die Ventilatoren nur etwa 6 Stunden im Schnitt. Der Anteil am Gesamtverbrauch ist für diese Verbrauchergruppe sehr gering, weshalb keine detaillierte Betrachtung erfolgt.

Belüftung der Belebung

Die Belüftung der Belebung ist nach Vorgaben des MUNLV nicht erhöht, weist aber dennoch nach Betrachtung der Sauerstoffkonzentration Optimierungspotential auf:

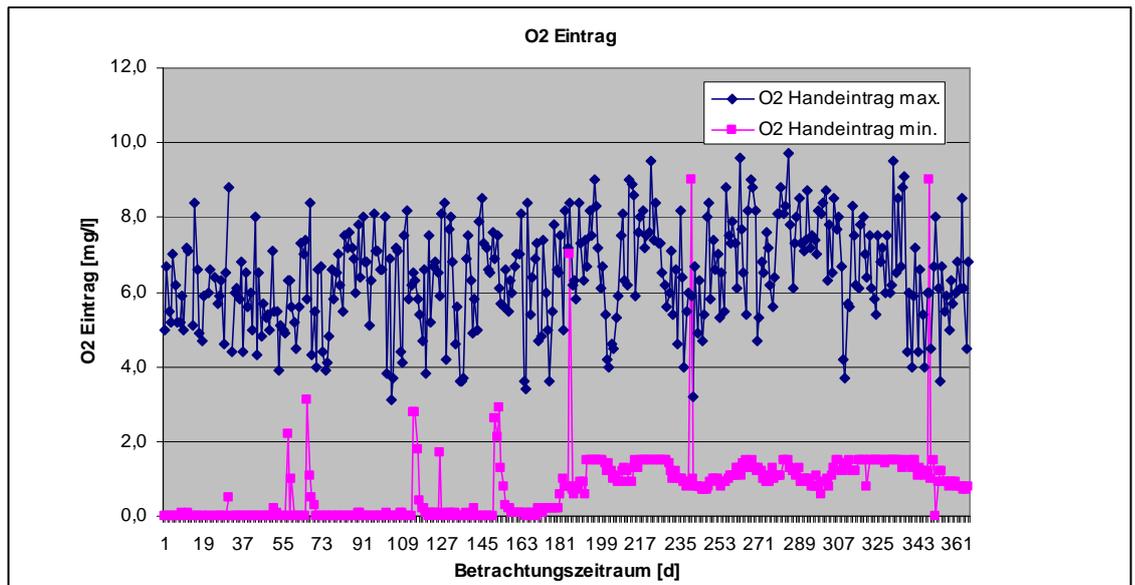


Abbildung 5-3: O2 Eintrag im Belebungsbecken Straße 1 Konzen

Wie in der Abbildung 5-3 zu sehen ist, liegt der maximale Sauerstoffeintrag im gesamten Jahr zwischen Werten von 4 und 8 mg/l. Auch der minimale Eintrag liegt teilweise bei fast 2 mg/l. Insgesamt lässt sich sagen, dass der Eintrag an O₂ auf ca. 1,5 mg/l gesenkt werden kann. Leider lagen Pöyry GKW keine ausreichend genauen Daten, wie z. B. Minuten-Mittelwerte vor, um dieses Einsparpotenzial zu berechnen. Es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass hier möglicherweise weiteres Sparpotential vorhanden ist.

6 MAßNAHMEN KONZEN

Um die im Weiteren angesprochenen Maßnahmen zur Energieeinsparung umsetzen zu können, sind je nach Art der Maßnahmen verschieden hohe finanzielle und planerische Aufwendungen zu erbringen. Dabei spielt auch der Zeitraum, in dem eine Maßnahme umgesetzt werden kann, eine wichtige Rolle für die Durchführung.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen werden gemäß der Definition des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ nach drei Realisierungsphasen unterteilt:

- Sofortmaßnahmen (S) sind sehr rentabel, erfordern geringe Investitionen und können aufgrund der technischen und betrieblichen Randbedingungen sofort realisiert werden.
Realisierungshorizont: 0 - 2 Jahre Kapitel 6.2
- Kurzfristige Maßnahmen (K) sind in der Regel insgesamt wirtschaftlich, sie sind aber mit entsprechenden Investitionen verknüpft und müssen in einer Ausführungsplanung präzisiert werden.
Realisierungshorizont: 2 - 5 Jahre Kapitel 6.3
- Abhängige Maßnahmen (A) sind an bestimmte Bedingungen geknüpft. So kann z. B. ein hocheffizienter Motor in der Regel erst nach altersbedingtem Ersatz

des alten Motors, d. h. nach Ablauf der Nutzungsdauer, eingesetzt werden. Abhängige Maßnahmen können vielfach erst mittel- bis langfristig realisiert werden.

Realisierungshorizont:

1 - 10 Jahre

Kapitel 6.4

6.1 Bereits umgesetzte Maßnahmen

6.1.1 Betrieb des Sangfangebläses auf kleiner Polstufe

Der belüftete Sandfang weist bei einem spezifischen Energiebedarf von rund 4,70 kWh/(EW·a) im Vergleich zum Richtwert nach MUNLV in Höhe von 0,75 kWh/(EW·a) eine um 527 % erhöhte Energieaufnahme auf. Der elektrische Energiebedarf wird zu rund 91 % von der Sandfangbelüftung bestimmt.

Zur Sandabscheidung steht auf der Kläranlage Konzen ein belüfteter Langsandfang zur Verfügung. Zur Sandfangbelüftung steht insgesamt 1 Drehkolbengebläse bereit, welches im Betrachtungszeitraum polumschaltbar in zwei Laststufen betrieben wurde. Das Gebläse hat laut Betriebshandbuch in hoher Polstufe eine Förderleistung von 238 Nm³/h. Die Förderleistung in niedriger Polstufe kann zu etwa 104 Nm³/h ermittelt werden.

Das Sandfangvolumen beträgt etwa 106 m³ bei einer durchflossenen Querschnittsfläche von rund 5,3 m². Nach gängigen Literaturangaben wird für Sandfänge mit der gegebenen Fließfläche ein Lufteintrag in Bereichen von 0,5 bis 1,3 Nm³/(m³·h) empfohlen. Eine Überprüfung des volumenspezifischen Lufteintrags in hoher Polstufe ergibt folgendes Ergebnis:

$$Q_{\text{Luft, spez.}} = \frac{104 \text{ Nm}^3 / \text{h}}{106 \text{ m}^3} = 0,99 \text{ Nm}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{h}) \quad \text{für die niedrige Polstufe und}$$

$$Q_{\text{Luft, spez.}} = \frac{238 \text{ Nm}^3 / \text{h}}{106 \text{ m}^3} = 2,2 \text{ Nm}^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{h}) \quad \text{für die hohe Polstufe.}$$

Aus dem Vergleich der spezifisch eingetragenen Luftmenge mit der empfohlenen Luftmenge wird deutlich, dass sich der Lufteintrag bei Betrieb in der hohen Polstufe oberhalb der empfohlenen Werte bewegt. Der Lufteintrag in niedriger Polstufe liegt genau im Mittel des empfohlenen Bereiches. Das Betriebspersonal der KA Konzen hat das Sandfangebläse bereits so umgestellt, dass es dauerhaft in Stufe 1 betrieben wird. Somit wird weniger Energie verbraucht, und keine überschüssige Luft in das Becken eingetragen.

Einsparpotenzial

Reduziert man die Betriebsweise des Gebläses dauerhaft auf Polstufe 1, kann hierdurch mit einem elektrischen Leistungsbedarf von 2,71 kW gerechnet werden. Bei kontinuierlichem Betrieb des Gebläses ergibt sich ein jährlicher Energiebedarf von 23.730 kWh/a.

Der Energiebedarf zum Lufteintrag konnte für den Betrachtungszeitraum Mai 2007-April 2008 zu 26.297 kWh/a ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass das Gebläse

kurzzeitig außer Betrieb war und somit nicht ganze 8.760 h im Jahr lief. Bei einem durchgehenden Betrieb des Gebläses mit wechselnden Polstufen ergäbe sich ein theoretischer Verbrauch von 27.779 kWh/a. Das energetische Einsparpotenzial beläuft sich gegenüber dem realen Verbrauch zu 2.567 kWh und gegenüber dem theoretischen Verbrauch zu 4.049 kWh/a. Bezogen auf den für den Betrachtungszeitraum geltenden Preis für elektrische Energie von etwa 11,5 Cent/kWh ergibt sich ein monetäres Potenzial von 295 €/a (real 2007) bzw. 466 €/a (theoretisch).

Investitionskosten

Im Rahmen der Umsetzung dieser Maßnahme sind neben dem Einsatz des Betriebspersonals keine weiteren Kosten angefallen.

6.2 Sofortmaßnahmen

Es konnten keine Sofortmaßnahmen für die Kläranlage Konzen ermittelt werden.

6.3 Kurzfristige Maßnahmen

6.3.1 Austausch der Riemenscheibe am Sandfanggebläse – K1

Bei einer Leistungsaufnahme von 3,7 kW (Polstufe 1) beträgt der Luftförderstrom des Sandfanggebläses laut Herstellerangaben 1,73 m³/min. Nach Empfehlungen der DWA (Korrespondenz Abwasser, 1998) ist ein Lufteintrag von 0,5 bis 0,9 m³/(m³·h) ausreichend, was für den vorliegenden Sandfang mit einem Volumen von 106 m³ einem Lufteintrag von 0,9 bis 2,3 m³/min entspricht. Der minimal erforderliche Lufteintrag wird momentan also in Polstufe 1 überschritten.

Um die Förderleistung des Drehkolbengebläses zu verringern und somit den Energieverbrauch abzusenken, kann die Riemenscheibe des Gebläses ausgetauscht werden. Es wird dadurch ein optimaler Lufteintrag angestrebt. Um die Wurf- oder Fliehkraftschmierung und damit einen störungslosen Betriebsablauf gewährleisten zu können, sollte eine minimale Drehzahl von rund 33 % der Gebläsedrehzahl im Auslegungszustand nicht unterschritten werden.

Für eine überschlägige Berechnung des Einsparpotenzials kann von einem linearen Zusammenhang von Leistungsaufnahme und Luftvolumenstrom ausgegangen werden. Bei einer Reduktion des Luftvolumenstroms auf 0,9 m³/min, kann demnach die Leistungsaufnahme auf 1,9 kW reduziert werden. Damit wird immer noch die erforderliche Mindestdrehzahl überschritten und es sind keine negativen Auswirkungen auf die Funktionalität des Sandfanggebläses zu erwarten.

Einsparpotenzial

Laut den Aufzeichnungen des Jahres 2007 lief das Gebläse 4.914 h. Die Betriebsstunden in Stufe 2 werden nicht protokolliert. Laut Aussagen des Betriebspersonals wird der Sandfang jedoch momentan durchgehend in Polstufe 1 betrieben, daher wird das Einsparpotenzial gegenüber dieser Betriebsweise berechnet. Bei einer Reduktion der Leis-

tungsaufnahme auf 1,9 kW und einer Laufzeit von 8.760 h/a könnten 7.181 kWh/a bzw. (bei einem effektiven Energiepreis von 11,5 Cent/kWh) 828 €a eingespart werden.

Investitionskosten

Die Materialkosten für die benötigten Scheiben und Riemen betragen ca. 500 €. Für die Montage kann mit Kosten in Höhe von 200 € gerechnet werden. Insgesamt fallen Kosten von 700 € an. Die Maßnahme würde sich somit innerhalb eines Jahres amortisieren. Der Kosten-Nutzen-Faktor beträgt 0,1 bei einer Nutzungsdauer von 12,5 Jahren. Damit ist die Maßnahme als sehr wirtschaftlich einzustufen.

6.3.2 Anpassung der Steuerung der Crossflow-Gebläse – K2

Die Steuerung der Crossflow-Gebläse sieht eine Vorlaufzeit von einer Minute zu jedem Filtrationsintervall vor. Ein Filtrationszyklus besteht aus 9 Minuten Filtrieren und einer Minute Pause mit fortsetzender Belüftung. Das Verhältnis von 10/9 Minuten ergibt sich zu 111 %. Dies wäre also das reguläre Verhältnis von Gebläselaufzeit zu Permeatpumpenlaufzeit. Die Anzahl der Betriebsstunden der Crossflow-Gebläse muss daher etwas höher liegen als die der Permeatpumpen. Bei der Prüfung der Betriebsstunden fiel auf, dass die Crossflow-Gebläse jedoch geringfügig höhere Betriebszeiten aufweisen als die Permeatpumpen. Insgesamt liegt das Verhältnis der Betriebsstunden für die Crossflow-Gebläse zu den Betriebsstunden der Permeatpumpen bei 115 % (siehe Tabelle 6-1)

Tabelle 6-1: Laufzeiten und Energieverbrauch der CF-Gebläse und Permeatpumpen

	Betriebsstunden [h/a]	Energieverbrauch [kWh/a]	Leistungsaufnahme [kW]
Gebläse gesamt	32.560	1.060.456	32,57
Permeatpumpen gesamt	28.287	93.089	1,65

Zur Kontrolle wurde eine Auswertung der Zuläufe für den Betrachtungszeitraum durchgeführt. Für drei charakteristische Tage für Trockenwetter, mittleren Mischwasserabfluss und maximalen Mischwasserabfluss konnten Daten der Gebläse ausgewertet werden. Abbildung 6-1 zeigt die Summenhäufigkeit der Zuläufe zur KA Konzen.

Summenhäufigkeit Zulauf KA Konzen

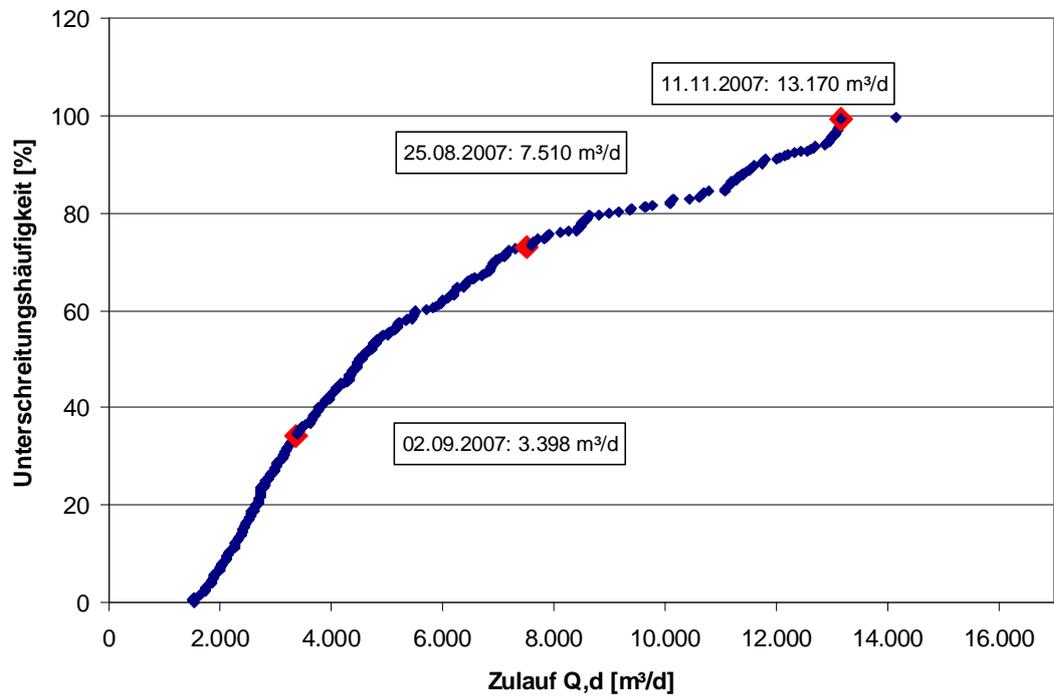


Abbildung 6-1: Summenhäufigkeit KA Konzen

Nach Auswertung der Daten ergab sich, dass bei Trockenwetter und mittlerem Mischwasserabfluss die Filtrationszyklen nicht ganz zu Ende geführt werden. Abbildung 6-2 verdeutlicht diesen Zustand besonders gut.

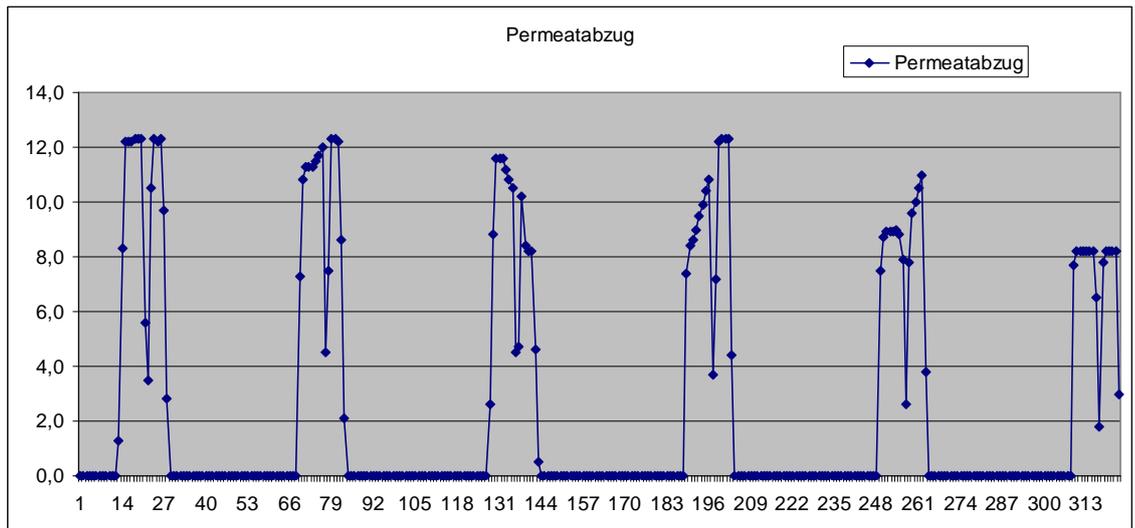


Abbildung 6-2: Darstellung der Filtrationszyklen

Zunächst beginnt der Zyklus mit 9 Minuten langem Filtrieren, anschließend folgt die eine Minute lange Filtrationspause. Nach der Pause beträgt die Filtrationsdauer aber keine volle 9 Minuten mehr, sondern nur 5 Minuten. Dies ist sowohl bei Trockenwetter, als

auch bei mittlerem Mischwasserzufluss der Fall. Bei maximalem Mischwasserzufluss werden die Intervalle vollständig ausgeführt.

Einsparpotenzial

Ausgehend von der Tatsache, dass bei Trockenwetter und mittlerem Mischwasserzufluss eine nicht optimale Regelung der Filtration vorliegt, zeigt folgendes Berechnungsbeispiel die prozentuale Erhöhung der aktuellen Laufzeiten:

Optimal: 1 min Vorbelüftung, 9 min Filtrieren, 1 min Pause, 9 min Filtrieren.

$$\text{Verhältnis}_{,OPT} : 20 \text{ min} / 18 \text{ min} = 111\%$$

Ist Zustand: 1 min Vorbelüftung, 9 min Filtrieren, 1 min Pause, 5 min Filtrieren.

$$\text{Verhältnis}_{,IST} : 16 \text{ min} / 14 \text{ min} = 114\%$$

Bei optimaler Regelung ist demnach eine Einsparung von 3 % der Gebläselaufzeit möglich. Zusätzlich muss bedacht werden, dass Trockenwettertage und mittlerer Mischwasserzufluss zu etwa 85 % im Jahr vorliegen. Die Einsparung beträgt demnach nur noch 2,5 %. Weiterhin ist relevant, dass durch eine verringerte Gebläselaufzeit weniger grobblasiger Sauerstoff in die Belebung eingetragen wird. Aus Abbildung 5-3 ging jedoch bereits hervor, dass die Sauerstoff-Konzentrationen im Belebungsbecken häufig deutlich über dem Optimum liegen, da durch die Crossflow-Belüftung ein Überangebot an Sauerstoff in den belebten Schlamm eingetragen wird. Dieser Betrag ist allerdings schwer zu bilanzieren, weshalb im Folgenden zur Sicherheit angenommen wird, dass der verminderte Sauerstoffeintrag vollständig durch die feinblasige Belüftung im Belebungsbecken zu substituieren ist. Insgesamt verringert sich der Lufteintrag der Crossflow-Gebläse um 1.384.920 m³/a, dies entspricht bei einer Einblastiefe von etwa 4,2 m und einem Sauerstoffeintrag von ca. 2,0 g/(Nm³·m) rund 8,4 g/Nm³. Es fehlen durch die geringere Gebläselaufzeit nach Umrechnung somit:

$$OV_a = 1.384.920 \cdot 8,4 / 1.000 = 11.633 \text{ kgO}_2 / a$$

Dies ergibt, unter Einbezug vom Alpha Wert (Umrechnung von Reinwasser in Schlammwasser) und der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser (Herstellerangabe Messner), die tatsächlich zusätzlich benötigte Luftmenge der Belebung zu:

$$OC_a = 22 \cdot 4,2 \cdot 0,65 = 60,06 \text{ g} / \text{Nm}^3$$

$$Q_{L,a} = 11.633 \cdot 1.000 / 60,06 = 193.689 \text{ m}^3 / a$$

Nach Auswertung der vorhandenen Daten liegt in den Belebungsbecken ein Lufteintrag von insgesamt 3.924.579 Nm³/a vor. Die zusätzlich benötigte Luftmenge entspricht demnach einem Anteil von rund 5 %. Ein zusätzlicher Energieverbrauch von 5 % entspricht umgerechnet:

$$\Delta E = 24.457 \text{ kWh} / a \cdot 0,05 = 1.223 \text{ kWh} / a$$

Bei einem Gesamtverbrauch der Crossflow-Gebläse von 1.060.456 kWh/a beträgt das energetische Einsparpotenzial 27.042 kWh. Zusätzlich müssen die berechneten 1.223 kWh/a für die Belebungsbelüftung hinzugerechnet werden. Insgesamt ergibt sich also ein Einsparpotenzial von 25.819 kWh/a. Bei einem effektiven Energiepreis von 11,5 Cent/kWh ergibt sich ein monetäres Potenzial von mindestens 2.977 €

Weitere Einsparungen in diesem Bereich können durch ein Erhöhen des Flusses und einer damit einhergehenden weiteren Verkürzung der Filtrationszeit erreicht werden. Die Betrachtung dieser Maßnahme erfolgt in Kapitel 6.3.3.

Investitionskosten

Für die Anpassung der Steuerung fallen Kosten für die Programmierungsarbeiten in den entsprechenden SPS an. BN Automation hat für die Kläranlagen Konzen und Woffelsbach die gesamte Steuerung der Anlagenteile geplant und entworfen. Nach Anfrage bei BN-Automation würden für eine Umprogrammierung Kosten in Höhe von ca. 1.000 € anfallen. Damit liegt der K/N-Faktor bei 0,04. Die Maßnahme ist sehr wirtschaftlich.

6.3.3 Erhöhung der Flussrate – K3

Die Membranfiltration kann mit zwei unterschiedlichen Flussraten betrieben werden. Die vorhandene Regelung sah vor, dass bei Anforderung eines Beckens zunächst mit einem Fluss von 21,5 l/(m²·h) gefahren wird. In Abhängigkeit zum Niveau im Belebungsbecken wird bei Überschreiten eines Grenzwertes von 4,00 m die Flussrate auf 32 l/(m²·h) erhöht. Steigt trotz des erhöhten Flusses der Wasserspiegel im Belebungsbecken weiter, wird ab einer Höhe von 4,05 m das nächste Membranbecken zur Filtration zugeschaltet. Die hier berechnete Maßnahme der Erhöhung der Flussrate wurde vom Betreiber bereits vor der Optimierung angedacht.

Einsparpotenzial

Zur Berechnung des Einsparpotenzials wurden die Laufzeiten der Permeatpumpen in der Membrankammer 1 ausgewertet. Für Januar bis November 2007 sind Minutenwerte der Filtratmengen des unteren Abzugs vorhanden. Zunächst wurden den Filtratmengen Betriebspunkte zugewiesen. Bei einer Filtratmenge die geringer ist als 7 l/s gilt die Permeatpumpe als aus. Dies hat den Zweck, kurze Intervalle am Beginn und Ende einer Filtration, die geringer sind als eine Minute, aus den Daten zu separieren. Ab einer Filtrationsmenge von 7 l/s wird die Pumpe einer niedrigen Flussrate von 21,5 l/(m²·h) zugeordnet. Übersteigt die abgezogene Menge 7 l/s, so wird mit einem Fluss von 32 l/m²h gefahren. Aus den vorliegenden Daten der Kammer 1.1 der Membranfiltration konnten die Laufzeiten bei den jeweiligen Betriebspunkten ermittelt werden. Tabelle 6-2 stellt diese Auswertung dar:

Tabelle 6-2: Pumpenlaufzeiten bei unterschiedlichen Flussraten

Jan – Nov 2007	Laufzeiten bei 0 l/(m ² ·h)	Laufzeiten bei 21,5 l/(m ² ·h)	Laufzeiten bei 32 l/(m ² ·h)
Minuten	299.478	104.300	77.545
Stunden	4.991	1.738	1.292

Insgesamt ergibt sich eine Filtrationsdauer von $1.738 + 1.292 = 3.031$ h. Laut Steuerungsbeschreibung wird alle 9 Minuten der Filtrationsvorgang für eine Minute unterbrochen. Damit lässt sich die Filtrationspause zu $3.031/9 = 337$ min bestimmen. Da die Crossflow-Gebläse auch während der Filtrationspause weiterlaufen ergibt sich eine Laufzeit der Belüftung von $3.031 + 337 = 3.368$ min. Durch den dauerhaften Betrieb der Membranfiltration mit hoher Flussrate kann die Laufzeit der Permeatpumpen und Crossflow-Gebläse verringert werden. Der Energieverbrauch nimmt ab. Zur Ermittlung des Verbesserungspotenzials wird angenommen, dass nur mit einem Fluss in Höhe von $32 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h)}$ filtriert wird und, wie bei der Plausibilitätsüberprüfung, aus den behandelten Wassermengen die theoretische Betriebszeit der Gebläse und Filtrationspumpen rückgerechnet wird:

Tabelle 6-3: Betriebsstunden bei hohem Fluss

Jan – Nov 2007		Laufzeiten bei 32 l/(m ² h)
Filtration	[h/a]	2.460
Pause	[h/a]	273
Belüftung	[h/a]	2.733

Insgesamt ergeben sich somit die Betriebsstunden der Gebläse zu: $2.460 + 273$ (Filtrationspause) = 2.733 h. Die energetische Einsparung aller 8 Gebläse beträgt nach Umrechnung 158.247 kWh .

Die Einsparung der 16 Permeatpumpen beträgt 22.573 kWh . In Summe können demnach durch einen höheren Fluss 180.820 kWh für den Zeitraum Januar bis November gespart werden. Auf das Jahr hochgerechnet ergibt sich eine Summe vom 197.258 kWh .

Durch die kürzere Laufzeit der Crossflow-Gebläse wird analog zu Maßnahme K2 der zusätzlich benötigte Lufteintrag in der Belebung berücksichtigt:

Der Lufteintrag der Crossflow-Gebläse verringert sich um $8.460.096 \text{ m}^3/\text{a}$, dies entspricht nach gleicher Berechnung wie in Maßnahme K2:

$$OV_a = 8.460.096 \cdot 8,4/1.000 = 71.065 \text{ kgO}_2/\text{a} .$$

Mit Hilfe des Sauerstoffeintrags der Messner- Belüfterplatten (22 g/Nm^3) und dem Alpha Wert zur Umrechnung von Rein- in Schlammwasser ($0,65$) ergibt sich die noch benötigte Luftmenge zu:

$$OC_a = 22 \cdot 4,2 \cdot 0,65 = 60,06 \text{ g / Nm}^3$$

$$Q_{L,a.} = 71.065 \cdot 1.000 / 60,06 = 1.183.230 \text{ m}^3 / a .$$

Nach Auswertung der vorhandenen Daten liegt in den Belebungsbecken ein Lufteintrag von insgesamt 3.924.579 Nm³/a vor. Die zusätzlich benötigte Luftmenge entspricht demnach einem Anteil von rund 30 %. Ein zusätzlicher Energieverbrauch von 30 % entspricht umgerechnet:

$$\Delta E = 24.457 \text{ kWh} / a \cdot 0,03 = 7.337 \text{ kWh} / a .$$

Auf ein Kalenderjahr hochgerechnet beträgt die Einsparung somit 197.258 - 7.337 = 189.921 kWh. Bei einem effektiven Energiepreis von 11,5 Cent/kWh ergibt sich daraus ein monetäres Potential von mindestens 21.900 € im Jahr.

Investitionskosten

Eine Umstellung der Flussrate kann vom Betriebspersonal direkt im PLS eingestellt werden. Es muss keine Programmierung über BN-Automation erfolgen. Es fallen somit keine zusätzlichen Investitionskosten an und die Maßnahme ist mit einem Kosten-Nutzen-Verhältnis von 0 sehr wirtschaftlich.

6.4 Abhängige Maßnahmen

6.4.1 Gesamtübersicht über die vorgeschlagenen Maßnahmen

Nachfolgend werden die vorgeschlagenen Maßnahmen noch einmal mit den notwendigen Investitionen, den erreichbaren Energie- und Kosteneinsparungen sowie dem sich hieraus ergebenden Kosten-/Nutzenverhältnis in Tabellenform zusammengestellt.

Die Übersicht zeigt, dass sich nicht nur das Maßnahmenpaket in Summe wirtschaftlich darstellt, sondern dass auch jede einzelne Maßnahme für sich betrachtet wirtschaftlich ist. Insgesamt ergibt sich ein K/N-Verhältnis von 0,01 für das Gesamtpaket.

Tabelle 6-4: Gesamtübersicht Maßnahmen Konzen

Nr.	Maßnahme	Verbraucher	Nutzungs- dauer [a]	Investitionen		Energiereduktion Sparen + genutzte Eigenprod.		Jahres- kosten [€/a]	Jahres- nutzen [€/a]	K / N [-]
				Gesamt [€]	Energie [€]	Elektrizität [kWh/a]	Wärme [kWh/a]			
Sofortmaßnahmen										

Kurzfristige Maßnahmen

Nr.	Maßnahme	Verbraucher	Nutzungs- dauer [a]	Investitionen		Energiereduktion Sparen + genutzte Eigenprod.		Jahres- kosten [€/a]	Jahres- nutzen [€/a]	K / N [-]
				Gesamt [€]	Energie [€]	Elektrizität [kWh/a]	Wärme [kWh/a]			
K1	Austausch Riemenscheiben	4.1	12,5	700	700	7.181		86	828	0,10
K2	Anpassung Steuerung Crossflow Gebläse	7.3	12,5	1.000	1.000	25.819		123	2.977	0,04
K3	Erhöhung der Flussrate	7.5	12,5	0	0	189.921		0	21.900	0,00
Kurzfristige Maßnahmen				1.700	1.700	222.921		208	25.706	0,01

Abhängige Maßnahmen

Nr.	Maßnahme	Verbraucher	Nutzungs- dauer [a]	Investitionen		Energiereduktion Sparen + genutzte Eigenprod.		Jahres- kosten [€/a]	Jahres- nutzen [€/a]	K / N [-]
				Gesamt [€]	Energie [€]	Elektrizität [kWh/a]	Wärme [kWh/a]			
Abhängige Maßnahmen										

Maßnahmenpaket	Verbraucher	Nutzungs- dauer [a]	Investitionen		Energiereduktion Sparen + genutzte Eigenprod.		Jahres- kosten [€/a]	Jahres- nutzen [€/a]	K / N [-]
			Gesamt [€]	Energie [€]	Elektrizität [kWh/a]	Wärme [kWh/a]			
Maßnahmen S									
Maßnahmen S+K			1.700	1.700	222.921		208	25.706	0,01
Maßnahmen S+K+A			1.700	1.700	222.921		208	25.706	0,01

7 RESULTATE IM ÜBERBLICK

7.1 Energiebilanz

Der Stromverbrauch der betrachteten Anlagenteile der Kläranlage Konzen kann durch das gesamte Maßnahmenpaket um 222.921 kWh/a bzw. 13,4 % gesenkt werden.

Tabelle 7-1: Energiebilanz Konzen

Energiebilanz			IST-Zustand	nach Realisierung der Maßnahmenpakete		
				S	S+K	S+K+A
Elektrizität	-Verbrauch gesamt	[kWh/a]	1.663.309	1.663.309	1.440.388	1.440.388
	-Eigenprod. genutzt	[kWh/a]	0	0	0	0
	-Einkauf	[kWh/a]	1.663.309	1.663.309	1.440.388	1.440.388
Wärme	-Verbrauch gesamt	[kWh/a]	0	0	0	0
	-Eigenprod. genutzt	[kWh/a]	0	0	0	0
	-Einkauf	[kWh/a]	0	0	0	0

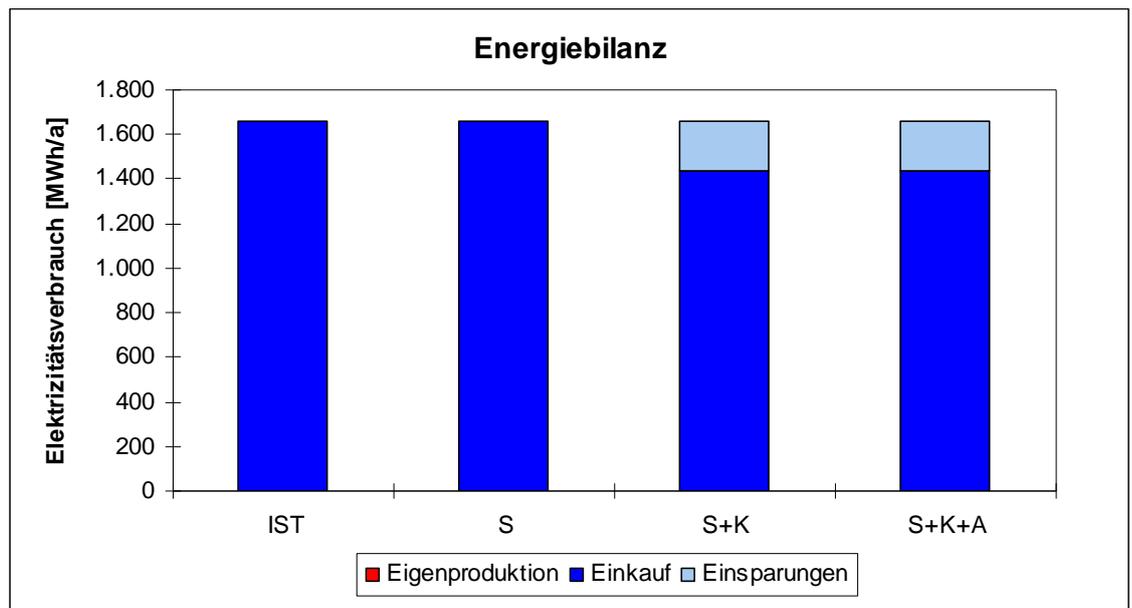


Abbildung 7-1: Grafische Darstellung der Energiebilanz nach MUNLV

7.2 Energiebezugskosten

Die Kosteneinsparung durch die Reduktion des Fremdbezugs an Energie wurde auf Basis der Energiepreise für Einkauf und Verkauf im Betrachtungszeitraum 2007 errechnet. Sollten alle hier geschilderten Maßnahmen umgesetzt werden, könnten Energieverbrauchs-kosten in Höhe von fast 25.706 €a oder 13,4 % eingespart werden. Der Hauptteil der Kostenreduktion für den Bezug von elektrischer Energie resultiert dabei aus der möglichen Optimierung der Erhöhung der Flussrate. Dadurch entsteht ein Jahresnutzen von 21.900 €

Tabelle 7-2: Energieverbrauchskosten nach MUNLV, Konzen

Energieverbrauchskosten		IST-Zustand	nach Realisierung der Maßnahmenpakete		
			S	S+K	S+K+A
Energieverbrauchskosten gesamt	[€/a]	191.800	191.800	166.094	166.094
in % IST	%	100%	100%	87%	87%
Einkauf Elektrizität	[€/a]	191.800	191.800	166.094	166.094
Einkauf Brennstoff	[€/a]	0	0	0	0

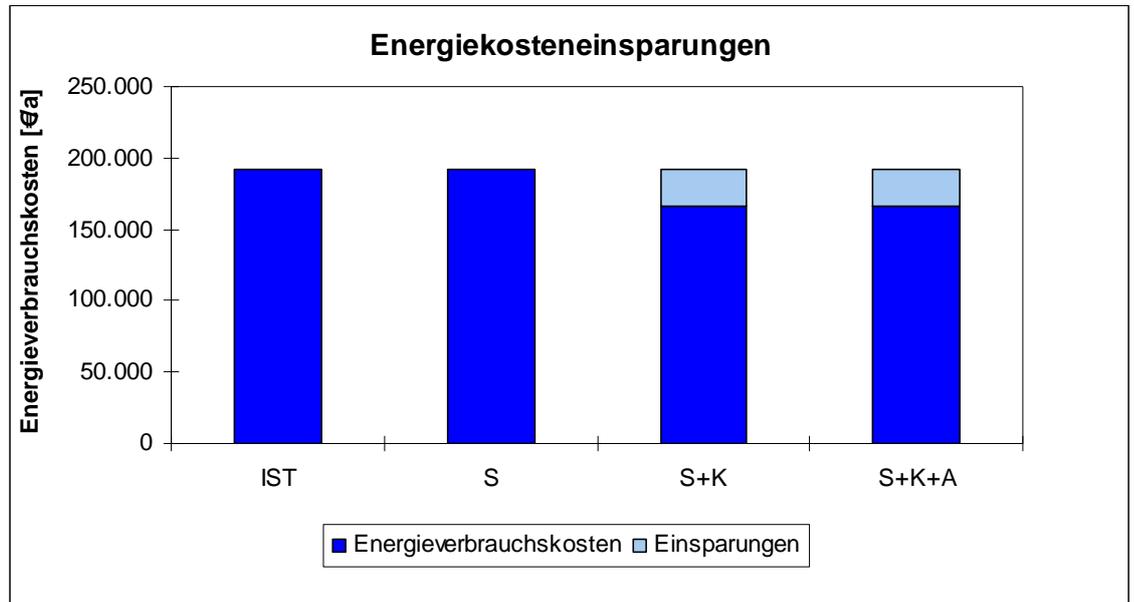


Abbildung 7-2: Energiekosteneinsparung nach MUNLV, Konzen

7.3 Wirtschaftlichkeit

Um die dargestellten Einsparungen realisieren zu können, sind eine Reihe von Investitionen zu tätigen. Dabei muss sich insgesamt ein günstiges Kosten-Nutzenverhältnis, das heißt ein Verhältnis $K/N < 1$, ergeben. Nach Umsetzung des kompletten Maßnahmenpakets stehen einem Nutzen von 25.706 €/a Kosten von etwa 208 €/a gegenüber. Daraus ergibt sich ein Kosten-Nutzenverhältnis von 0,01. Das Gesamtmaßnahmenpaket ist also als sehr wirtschaftlich einzustufen. Insgesamt erfordern die vorgeschlagenen Maßnahmen ein Investitionsvolumen von 1.700 €, wovon 100 % auf die Energieoptimierung entfallen.

Tabelle 7-3: Wirtschaftlichkeit nach MUNLV, Konzen

Investitionen und Wirtschaftlichkeit	IST-Zustand	nach Realisierung der Maßnahmenpakete		
		S	S+K	S+K+A
Gesamt - Investitionen [€]		0	1.700	1.700
Energie - Investitionen [€]		0	1.700	1.700
Jahreskosten [€/a]		0	208	208
Jahresnutzen [€/a]		0	25.706	25.706
K / N [-]		0,00	0,01	0,01

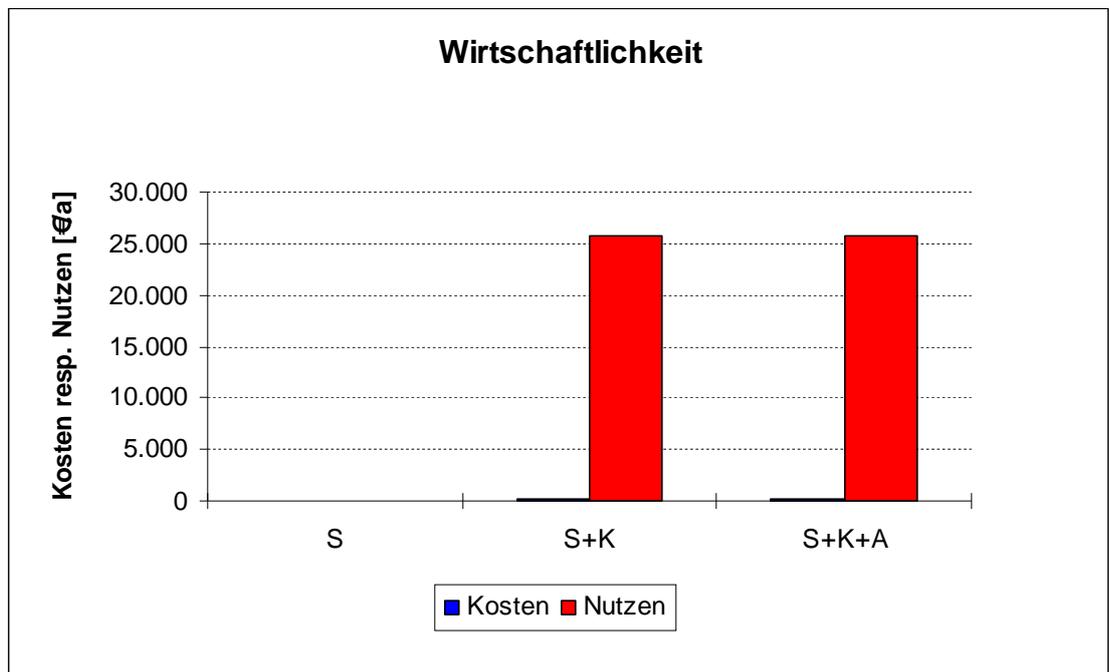


Abbildung 7-3: Grafische Darstellung der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmenpakete nach MUNLV, Konzen

8 ZUSAMMENFASSUNG

Vergleicht man die spezifischen Daten der Kläranlage Konzen nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen mit dem Zustand des Betrachtungsjahres 2007, zeigt sich, dass der spezifische Gesamtverbrauch noch um 37 kWh/(EW·a) auf 235 kWh/(EW·a) gesenkt werden kann. Da es sich hier um eine Membranbelebungsanlage handelt, die generell deutlich mehr Energie benötigt als eine konventionelle Anlage, ist ein direkter Vergleich mit den Richt- und Idealwerten nicht möglich.

Alle erläuterten Werte zum Vergleich mit dem Ist-Zustand können noch einmal der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 8-1: Überblick Energienachweis, Konzen

Energienachweis	IST-Zustand	nach Realisierung der Maßnahmenpakete			Richtwert	Idealwert
		S	S+K	S+K+A		
gesamter spez. Elektrizitätsverbrauch	271 kWh/EW a	271 kWh/EW a	235 kWh/EW a	235 kWh/EW a	54 kWh/EW a	42 kWh/EW a
spez. Elektrizitätsverbrauch Belebung	19 kWh/EW a	19 kWh/EW a	19 kWh/EW a	19 kWh/EW a	36 kWh/EW a	28 kWh/EW a
Grad der gesamten Faulgasnutzung	0 %	0 %	0 %	0 %	95 %	97 %
Grad der Faulgasumwandlung in Kraft/Elektrizität	0 %	0 %	0 %	0 %	25 %	26 %
spez. Faulgasproduktion pro kg oTR eingetragen	0 l/kg oTR	0 l/kg oTR	0 l/kg oTR	0 l/kg oTR	450 l/kg oTR	475 l/kg oTR
Eigenversorgungsgrad						
Wärme	0 %	0 %	0 %	0 %	90 %	95 %
Elektrizität	0 %	0 %	0 %	0 %	31 %	41 %

Um auch den membranspezifischen Anlagenteil, der in der MUNLV Tabelle nicht erfasst wird, berücksichtigen zu können, werden in Tabelle 8-2 die spezifischen Energieverbräuche bezogen auf die jährliche Mischwassermenge mit den ermittelten Werten der Modellanlage verglichen:

Tabelle 8-2: Vergleich des Energieverbrauchs bezogen auf die jährliche Mischwassermenge

Verbraucher	Konzen gemessen [kWh/m ³]	Konzen optimiert [kWh/m ³]	Modellanlage [kWh/m ³]
Belüftung CF	0,50	0,40	0,47
ges. Filtration	0,00	0,00	0,00
Rezipumpen	0,04	0,04	0,05
Permeat	0,04	0,04	0,01
Perm+Rezi	0,00	0,00	0,00
Belüftung BB	0,01	0,02	0,15
Rührwerke	0,00	0,00	0,00
Schlamm	0,00	0,00	0,00
Reinigung	0,00	0,00	0,00
Infrastruktur	0,02	0,02	0,01
Hebewerk	0,05	0,05	0,01
Rechen	0,01	0,01	0,00
Sandfang	0,01	0,01	0,01
Fällmittel	0,00	0,00	0,00
Summe:	0,70	0,59	0,72

Die nachfolgende Abbildung 8-1 stellt die Ergebnisse zudem anhand eines Balkendiagrammes dar:

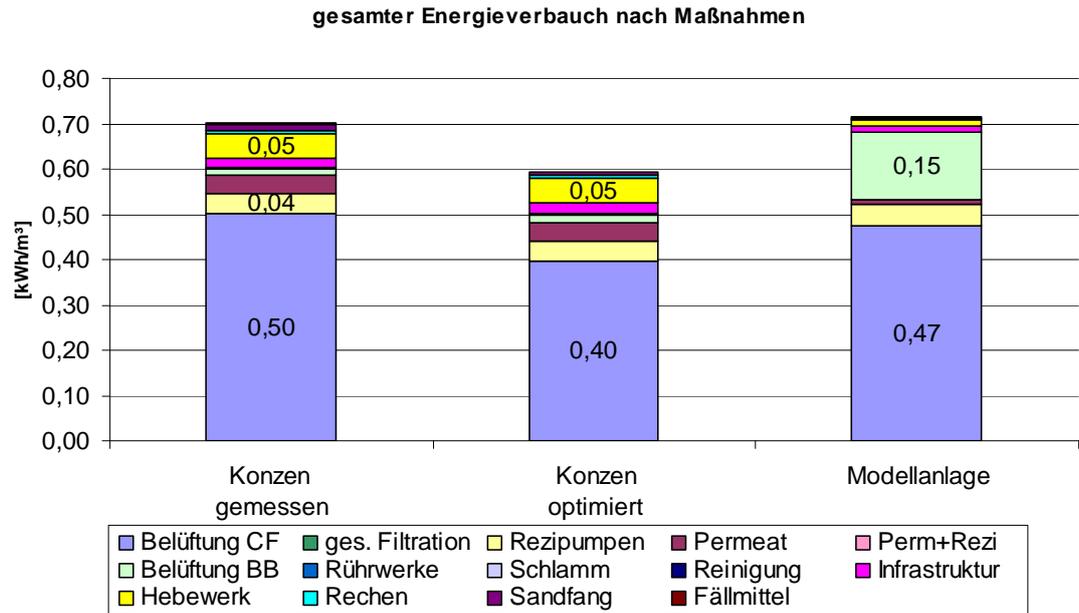


Abbildung 8-1: Vergleich Energieverbrauch Konzen und Modellanlage vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

Insgesamt lässt sich nach Umsetzung der Maßnahmen der spezifische Energieverbrauch von 0,7 kWh/m³ auf 0,59 kWh/m³ senken. Es ist deutlich erkennbar, dass das größte Einsparpotenzial im Bereich der Crossflow-Belüftung liegt. Hier wäre eine Reduktion um wenigstens 0,10 kWh/m³ auf unter 0,40 kWh/m³ möglich. Alle anderen Stufen bleiben weitestgehend gleich, oder ihr energetischer Einfluss ist zu gering, um sich im Endverbrauch zu spiegeln. Auffällig ist ebenfalls, dass der ohnehin schon gute Energieverbrauch der KA Konzen durch die Maßnahmen sogar noch unter die Idealwerte der Modellanlage zu senken ist. Hierbei sei aber zu bemerken, dass dies auf der Tatsache des sehr hohen Fremdwasserzuflusses beruht, der durch dünneres Wasser auch geringere Zulaufkonzentrationen bewirkt.

Insgesamt konnten im Zuge der Energieanalyse nur wenige Optimierungsmöglichkeiten gefunden werden. Dies spricht für eine gute Betriebsführung durch das Personal, welches sich auch schon in der Vergangenheit intensiv mit dem Thema der Energieeinsparung und Optimierung der Betriebsführung befasst hat und bereits im Vorfeld diverse Maßnahmen umsetzen konnte (z. B. Optimierung Betrieb Sandfanganlage, Optimierungsansatz Flussrate).

Abschließend ist zu bemerken, dass die hier vorliegende Feinanalyse, ohne die gute Anlagenkenntnis und insbesondere das Engagement des Betriebspersonals des Klärwerks beim Zusammenstellen der notwendigen Anlagendaten, nicht in der vorliegenden Detailtiefe möglich gewesen wäre. Die Bereitschaft, auch neue Wege zu beschreiten und die Aufgeschlossenheit gegenüber weiteren Optimierungsansätzen waren ebenfalls bei der Durchführung dieser Studie ein entscheidendes Kriterium für die Ermittlung der beschriebenen Maßnahmen.

9 IST-ZUSTAND KLÄRWERK WOFFELSBACH

9.1 Datengrundlage

Eine ausführliche Erhebung der vorhandenen Daten des aktuellen Zustandes bildet die Grundlage für die weitere Analyse. Je detaillierter und genauer die Ausgangsdaten sind, desto zuverlässiger sind die Ergebnisse der Analyse.

Im Einzelnen wurde u. a. auf folgendes Datenmaterial zurückgegriffen:

- Betriebsdatenauszüge aus dem PLS der KA Woffelsbach
- Aufstellung des täglichen Stromverbrauchs für die Jahre 2007 und 2008
- Monatliche Aufstellungen über Beseitigung/Verwertung des Rechen- und Sandfanggutes für das Jahr 2007
- Monatliche Aufstellungen über die Nassschlammabgabe an andere Kläranlagen für das Jahr 2007
- Monatsleistungspreisregelung 2007 mit dem EVU
- Stromverbrauch des Pumpwerks Rurberg
- Steuerungsbeschreibung der KA Woffelsbach
- Datenpunktliste der KA Woffelsbach
- Angaben des Betriebspersonals zu den Messungen auf dem Klärwerk
- Angaben des Betriebspersonals zur Betriebsführung der KA

Der Betrachtungszeitraum für die Energieanalyse ist das Jahr 2007.

9.2 Kläranlagenbeschreibung

9.2.1 Allgemeines

Die Kläranlage Woffelsbach liegt unmittelbar am Rursee, der mit einem Speichervolumen von rund 200 Mio. m³ der Trink- und Brauchwasserbereitstellung dient und ein wichtiges Naherholungsgebiet darstellt. Zunächst wurden 1975 von der Gemeinde Simmerath zwei konventionelle Kläranlagen in Woffelsbach und Rurberg errichtet, die beide direkt in den Rursee einleiteten. Im Jahre 1998 wurde der Betrieb der Kläranlagen vom Wasserverband Eifel-Rur übernommen und an die heutigen Erfordernisse angepasst. Aufgrund von begrenzten Platzverhältnissen, saisonal stark schwankenden Abwasserzuflüssen und den Qualitätsansprüchen an das Abwasser, entschied man sich für eine innovative Kläranlage mit Membranfiltration in Woffelsbach. Die beiden Standorte wurden zusammengefasst, was die wirtschaftlichste Lösung darstellte. Das Abwasser aus Rurberg wird nun mittels einer 3,5 km langen Druckrohrleitung, bestehend aus 3

Hochdruckrohren mit je 160 mm Durchmesser, zur Kläranlage Woffelsbach transportiert. Die alte Kläranlage Rurberg wurde dazu in ein Pumpwerk mit Notfallspeicherbecken umgewandelt. Der restliche Bestand wurde zurückgebaut. Das Pumpwerk Rurberg wird aufgrund topografischer Gegebenheiten über eine 60 m lange Druckleitung mittels zweier Pumpen aus dem Kanalnetz der Ortslage Rurberg beschickt.

Die Kläranlage Woffelsbach ist in der aktuellen Ausbaustufe von 6.200 Einwohnern auf einen maximalen Trockenwetterzufluss von $Q_t = 43,1$ l/s und einem maximalen Mischwasserzufluss $Q_{m, \max} = 88$ l/s ausgelegt.

Der mittlere Tageszufluss bei Trockenwetter betrug im betrachteten Jahr 2007 647,87 m³/d. Eine anschauliche Darstellung des Jahresgangs der täglichen Abwassermengen zur Anlage ist nachfolgend in Abbildung 9-1 gegeben.

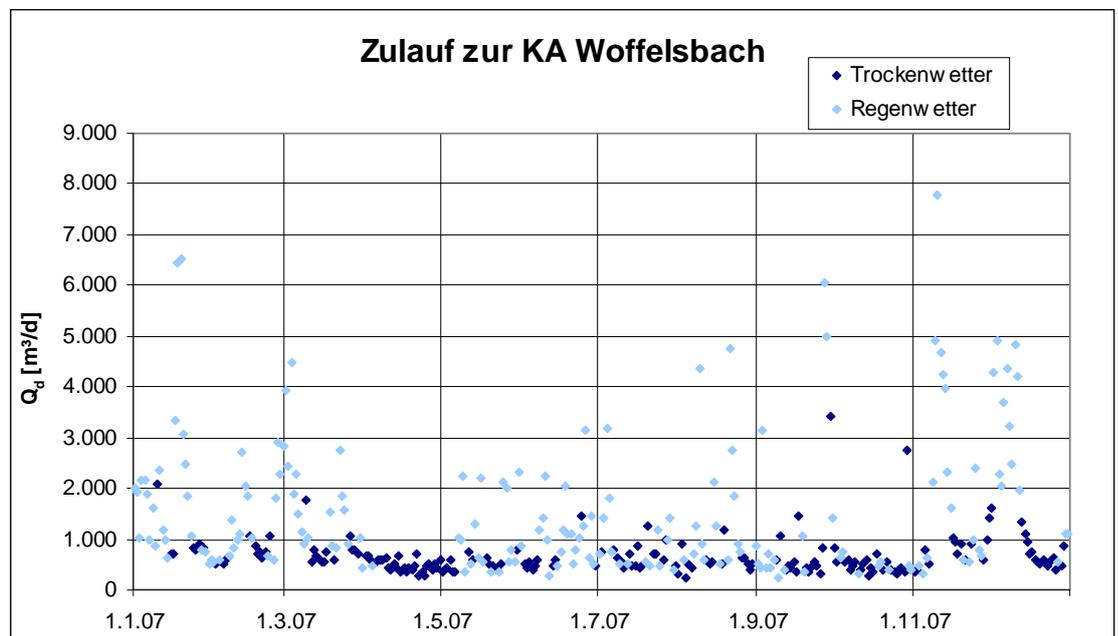


Abbildung 9-1: Jahresgang der täglichen Abwassermengen im Zulauf des Klärwerks

Tabelle 9-1: Allgemeine Kenndaten des Klärwerks Woffelsbach

Klärwerk Woffelsbach		
Einwohnerwerte (Auslegungswert)	6.200	[EW]
Größenklasse	3	[-]
Mittlerer Abfluss bei Trockenwetter (\varnothing 2007)	647,87	[m ³ /d]
Mittlerer Mischwasserabfluss (\varnothing 2007)	1608,34	[m ³ /d]
Täglicher Trockenwetterabfluss (Auslegungswert)	43,1	[l/s]
Maximaler Mischwasserabfluss (Auslegungswert)	88,0	[l/s]

Tabelle 9-2: Überwachungs- und Ablaufwerte des Klärwerks Woffelsbach

	CSB	BSB₅	NH₄-N	P_{ges}
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Überwachungswerte	80	20	10	0,5
Ablaufkonzentrationen (85 %-Quantil)	17	-	0,2	0,3

9.2.2 Festlegung der Bezugsgröße

Wie bereits erläutert, erfolgt die Festlegung der Bezugsgröße auf Basis der mittleren Schmutzfrachten im Zulauf der Kläranlage und den üblichen einwohnerspezifischen Schmutzfrachten.

Zur Überprüfung der Plausibilität der über diese Frachten ermittelten mittleren Anlagenbelastung erfolgte ein Quervergleich mit den 85 %-Quantilen dieser Frachten.

Betriebsdatenauswertung 2007

Zur Ermittlung der durchschnittlichen jährlichen Kläranlagenbelastung lagen die im Jahr 2007 gemessenen CSB-Konzentrationen des Zulaufes vor. Weiterhin wird der Parameter N_{ges} messtechnisch erfasst. Obwohl die nähere Umgebung der KA Woffelsbach gerade in den Sommermonaten als Naherholungsgebiet genutzt wird, zeigt der Jahresverlauf der CSB-Fracht nur im August einen leichten Anstieg der Belastung. Eine separate Betrachtung der Saisonmonate und des restlichen Jahres erfolgte daher nicht. Für die Bewertung des Energieverbrauchs der Kläranlage wird somit das Jahr 2007 als Ganzes betrachtet.

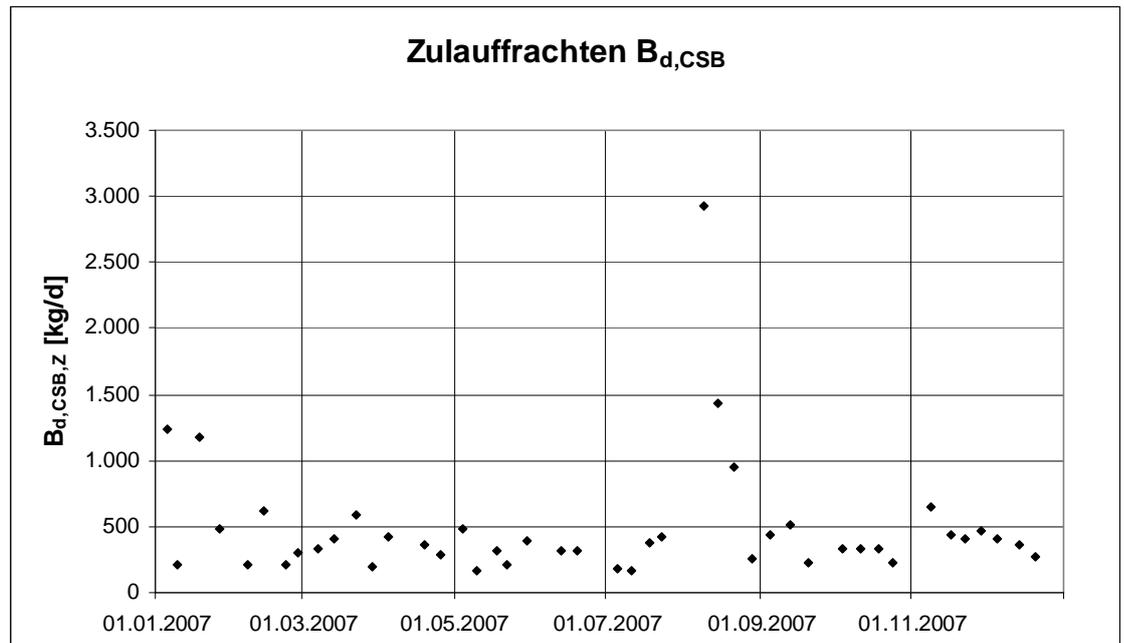


Abbildung 9-2: CSB-Zulauffrachten der KA Woffelbach

Durch Multiplikation der gemessenen Konzentrationen mit den zugehörigen Wassermengen wurden die entsprechenden Zulauffrachten errechnet und deren Mittelwerte bzw. 85 %-Quantile gebildet. Für die anschließende Umrechnung der Frachten in Einwohnergleichwerte wurden die Standardwerte des ATV-DVWK-Arbeitsblattes 131 herangezogen. Es ergeben sich hiernach folgende Einwohnergleichwerte (Tabelle 5.3):

Tabelle 9-3: Ermittlung der Einwohnerwerte über CSB, N_{ges}, NH₄ und P

Ermittlung der Einwohnergleichwerte		CSB	N_{ges}	NH₄-N	P
Probenzahl	[-]	44	43	44	45
Mittelwert der Tagesfrachten	[kg/d]	485	66	46	10
85 %-Quantil der Tagesfrachten	[kg/d]	605	86	58	15
Standardwerte nach ATV	[g/(EW·d)]	120	11	7	1,8
Einwohnerwerte aus MW	[EW]	4.043	6.043	6.587	5.730
Einwohnerwerte aus 85 %-Q.	[EW]	5.038	7.829	8.324	8.502

Die Bestimmung der Bezugsgröße erfolgt als Mittelwert der Frachten der Parameter Kohlenstoff und Stickstoff. Der Parameter Phosphor wird bei der Mittelwertbildung nicht mit berücksichtigt, da dieser für den Energiebedarf des Klärwerks eine untergeordnete Rolle spielt. Weiterhin wird der Parameter Stickstoff nur über die N_{ges}-Frachten berücksichtigt. Mit diesen Ansätzen ergibt sich eine Bezugsgröße für den Energiebedarf von 5.043 Einwohnergleichwerten als Grundlage für weitere Betrachtungen.

9.2.3 Beschreibung der Verfahrenstechnik

Zulauf Pumpwerk Rurberg

Der Abwasserzulauf aus Rurberg muss über ein Zulaufpumpwerk auf das Niveau der Druckpumpstation gehoben werden. Das Zulaufpumpwerk besteht aus einem Pumpensumpf mit zwei Tauchmotorpumpen gleicher Förderleistung. Beide Pumpen fördern das Wasser in Abhängigkeit des Füllstands im Zulaufpumpwerk.

Das Abwasser wird dann über drei seeverlegte Rohrleitungen auf die Kläranlage Woffelsbach gepumpt. Bei Trockenwetter werden die Seeleitungen 1 und 2 wechselseitig betrieben. Die 3. Seeleitung dient, mit Brauchwasser gefüllt, als Reserve.

Auf dem Gelände des PW Rurberg befinden sich 2 Ausgleichsbecken, in die überschüssige Zuläufe abgeschlagen werden. Zur Entleerung dieser Becken sind eine kleine Tauchmotorpumpe und pro Becken ein Wirbeljet vorhanden.

Zulaufpumpwerk KA Woffelsbach

Der Abwasserzulauf aus Woffelsbach muss zunächst durch das vorgelagerte Zulaufpumpwerk auf das Niveau der Kläranlage gehoben werden. Dazu stehen drei Tauchmotorpumpen mit identischer Förderleistung zur Verfügung. Zwei Pumpen sind zur Förderung des Wasseranfalls ausreichend. Eine Pumpe dient als Reserveaggregat. Alle drei Pumpen sind FU-geregelt und fördern das Wasser füllstandsabhängig. Das Abwasser wird von hier aus über eine ca. 30 m lange Leitung in den Verteilerschacht vor der mechanischen Vorreinigung gepumpt.

Zulaufverteiler / Rechen

Der Verteilerschacht ist der mechanischen Vorreinigung vorgelagert. Hierhin fließen die Abwässer aus Woffelsbach, die Wassermengen der Seeleitungen aus Rurberg, die Entleerung des Ausgleichsbeckens der KA Woffelsbach, die Entleerung des Prozesswasserpumpwerks und auch die Mengen in der Schwimmstoffleitung des Sandfangs. Vom Verteilerschacht aus fließt das Wasser zwei Filterstufenrechen mit einer Spaltweite von 3 mm zu. Beide Rechen werfen mittels zweier Spiralförderer das Rechengut in die Rechengutwaschpresse, die anschließend in einen Container entleert. Für Revisionszwecke steht eine zweite Rechengutwaschpresse zur Verfügung.

Das Luft-Gas-Gemisch wird aus den Sieben separat abgezogen und nach draußen geleitet. Außerdem wird das Gebäude 24 Stunden am Tag durch Ventilatoren entlüftet. Aus diesem Grund ist das Rechengebäude keine Ex-Zone.

Sandfang / Sandklassierer

Nach Durchfließen des Filterstufenrechens gelangt das Wasser in einen belüfteten Rundsandfang. Das Belüftungsaggregat wird dauerhaft und automatisch betrieben. Durch die Sandpumpe werden abgelagerte Stoffe in den Sandwäscher gefördert. Die Sandpumpe wird Zeit-Pause gesteuert. Über eine ebenfalls Zeit-Pause-gesteuerte

Schwimmstoffpumpe werden die Schwimmstoffe abgezogen und zurück in den vorge-lagerten Verteilerschacht gefördert.

Der Sandklassierer wird in Abhängigkeit von der Sandpumpe betrieben und wirft anschließend den gereinigten Sand in einen Großmüllcontainer ab. Die ausgewaschenen Bestandteile fließen im Freigefälle dem Prozesswasserpumpwerk zu.

Siebanlage (Feinstrechen)

Die Siebanlage besteht aus vier Filterstufenrechen mit einer Spaltweite von 0,5 mm. Sie werden aus einer gemeinsamen Wasservorlage beschickt. Die vier Rechen werden im Automatikbetrieb in Abhängigkeit des Wasserniveaus parallel angesteuert. Ebenso wie die Feinrechen werfen sie auf die Spiralförderer und anschließend in den Rechengutcontainer ab.

Störfallschieber

Im Vorreinigungsgebäude befindet sich ein Störfallschieber, der dafür sorgt, dass nur maximal 55 l/s der Belebungsanlage zugeführt werden. Der Rest wird dem Ausgleichsbecken am Ende der Kläranlage zugeleitet, das wiederum in den Verteilerschacht entleert.

Biologische Reinigung

Nach der mechanischen Vorreinigung fließt das Wasser dem Belebungsbecken zu. Die Belebung ist als Umlaufbecken ($V = 200 \text{ m}^3$) mit vorgeschalteter Denitrifikation und Nitrifikation ausgeführt. Die O_2 -Versorgung erfolgt zum Großteil über die Rezirkulation aus den Membranbecken. Diese werden durch die Crossflow-Belüftung der Membranmodule mit Sauerstoff versorgt. Zur Aufrechterhaltung der Umwälzströmung sind insgesamt 2 Rührwerke im Becken installiert. Sie werden im Automatikbetrieb dauerhaft angesteuert. Aus der Belebung werden insgesamt zwei Membranstraßen über je eine Rezirkulationspumpe beschickt. Die Pumpen werden mit verschiedenen Drehzahlen in Abhängigkeit der betriebenen Membranbecken und dem TS-Gehalt der jeweiligen Beckenstraße betrieben.

Membranfiltration

Nach der biologischen Reinigung folgt die Phasenseparation von belebtem Schlamm und gereinigtem Abwasser durch eine Membranfiltration mittels Plattenmembranen vom Typ Kubota EK 400. Es existieren zwei Membranstraßen mit jeweils 3 Becken und 7 Doppeldeckermodulen. In Abhängigkeit der Zulaufmenge wird automatisch bestimmt wie viele Beckenkammern und Module betrieben werden müssen. Über den Höhenstand im Belebungsbecken werden dann zwischen 70 und 100 % der eingegebenen maximalen Flussrate geregelt. Die derzeitige Regelung erfolgt über eine feste Drehzahl von 45 Hz. Zur Crossflow-Belüftung stehen drei Gebläse mit identischer Leistung zur Verfügung (ein Gebläse pro Straße und ein Reservegebläse).

Die Membran- und Belebungsbecken sind abgedeckt ausgeführt, es wird aber kein separater Abluftabzug betrieben. Die Membrane neigen laut Aussage des Betreibers zum

Verblocken und müssen regelmäßig per Hand gezogen und mechanisch gereinigt werden. Chemische Reinigungen finden ca. jedes halbe Jahr statt.

Permeatabzug

Das Permeat wird mittels zweier drehzahlvariabler Förderpumpen pro Becken (oben und unten) abgezogen. Die Permeatpumpen werden über eine Saugdruckmessung überwacht, damit keine zu hohe Druckbelastung auf den Membranplatten entsteht. Die Pumpen sind alle FU-geregelt. Das gereinigte Abwasser wird mittels der Permeatpumpen in den Ablaufschacht gepumpt und anschließend dem Rursee zugeführt.

Maschinenhalle

In der Maschinenhalle befindet sich die Fällmitteldosierung zur P-Elimination. In Abhängigkeit zur Zulaufmenge wird die Menge des Fällmittels bestimmt. Zur Dosierung stehen zwei Dosierpumpen zur Verfügung, eine in Betrieb, die andere redundant. Als Fällmittel wird auf der Anlage Aluminat verwendet. Auch die Reinigungsvorlage für die Membranplatten und ein Kompressor zur Ansteuerung der Pneumatikschieber befinden sich in der Maschinenhalle.

Überschussschlammabzug

Hinter der Belebung befindet sich das rechteckige Überschussschlamm Speicherbecken. Sowohl der Überschussschlamm als auch der Schwimmschlamm des Belebungsbeckens werden dem Schlamm Speicherbecken zugeführt. Dazu stehen zwei FU-geregelte Drehkolbenpumpen zur Verfügung. Der Abzug des Schlammes erfolgt nicht kontinuierlich, sondern x mal am Tag mit y m³. Zeiten und Mengen können manuell am PLS eingegeben werden.

Das Becken ist mit zwei, am Galgen höhenverstellbaren Trübwasserabzugspumpen ausgerüstet. Diese werden von Hand bedient und fördern das Trübwasser direkt in den Prozesswasserschacht. Über einen Schieber kann jedes der Membranbecken an die Pumpe angeschlossen werden. Der Schlamm wird dann in das Schlamm Speicherbecken gefördert. Der Abtransport des Schlammes erfolgt mittels Container- oder Saugwagen.

Ausgleichsbecken

In gleicher Baugröße befinden sich hinter dem Schlamm Speicher zwei Ausgleichsbecken. Diese werden bei einer Zuflussmenge von mehr als 55 l/s beschickt. Das geschieht so lange, bis die Becken vollständig gefüllt sind oder der Gesamtzufluss wieder unter den Grenzwert sinkt. Sind die Ausgleichsbecken gefüllt, wird die gesamte Zulaufmenge der Biologie zugeführt. Beide Becken sind mit jeweils einem Wirbeljet und einer Entleerungspumpe ausgerüstet. Die Pumpe springt an, sobald der Füllstand einen minimalen Grenzwert überschritten hat und der Zulauf zur Kläranlage längere Zeit unter 55 l/s liegt. Sie pumpt das Wasser wieder in den Zulaufverteiler der Kläranlage. Die Wirbeljets verhindern Ablagerungen in den Becken und werden automatisch in Abhängigkeit des Füllstands betrieben.

Gebläsehalle

Im Gebläseraum befinden sich drei FU-geregelte Drehkolbengebläse für die Crossflow-Belüftung (jeweils ein Gebläse pro Membranstraße und ein Reserveaggregat), des Weiteren auch zwei Gebläse für die Belebung. Beide sind FU-geregelt und werden in Abhängigkeit des Sauerstoffgehalts in der Belebung gesteuert. Die Gebläsehalle kann über ein Klimasplitgerät gekühlt werden. Die Wärmepumpenanlage befindet sich ebenfalls in der Gebläsehalle.

Prozesswassersammelschacht

Der Prozesswassersammelschacht befindet sich unmittelbar vor der Anlage. Hier fließen alle Abwässer aus der mechanischen Vorreinigung (Spülwasser aus Rechengutwaschpresse und Sandwäscher) und das Trübwasser aus dem Schlamm Speicher zusammen. Zwei Tauchmotorpumpen fördern das Wasser abhängig vom Höhenstand wieder vor die Siebe in das Verteilerbauwerk vor der Kläranlage.

9.2.4 Überblick

Folgende Tabelle fasst die allgemeinen Objektdaten der Kläranlage Woffelsbach zusammen.

Tabelle 9-4: Allgemeine Objektdaten der Kläranlage Woffelsbach

Objektdaten		
Objekt	Kläranlage Woffelsbach	
Standort / Adresse	Im Steinchen, 52152 Woffelsbach	
Baujahr	1975	
Ausbau / Erweiterung realisiert	1998, 2005	Anschluss PW Rurberg über 3,5 km Seeleitung, Betrieb des MBR
geplante Energiespar- maßnahmen		
Kontaktpersonen Kläranlage	Herr Haas	Tel: 02473 - 96032921

In der nachfolgenden Tabelle 9-5 sind die wichtigsten Anlagendaten zusammengestellt. Neben den Daten zu Betrachtungszeitraum, Einwohnerwerten und Verfahrensart sind dort auch Angaben zu Schlammfall und Energieverbrauch aufgeführt. Diese Angaben bilden die Grundlage für die weitere Energieanalyse.

Anmerkung: Für die erforderliche Angabe der Höhendifferenz aller Pumpwerke wurde ein Wert von 3 m angegeben. Diese Angabe entspricht nicht den Gegebenheiten vor Ort, da ein Teil des Abwassers über eine 3,5 km lange seeverlegte Druckrohrleitung zum Klärwerk gepumpt wird. Diese Situation stellt, insbesondere im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit anderen Membrananlagen und der Modellanlage, einen Sonderfall dar. Das Pumpwerk Rurberg verfügt über einen eigenen Stromzähler, wird aber mit über das Klärwerk abgerechnet. Die Aggregate und der zugehörige Energieverbrauch sind in die Verbraucherliste mit aufgenommen.

Auf welchen Grundlagen und Annahmen die weiteren Zahlenwerte basieren und wie sie errechnet wurden, wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels genauer erläutert.

Tabelle 9-5: Anlagendaten der Kläranlage Woffelsbach

Anlagendaten		
Betriebsjahr	2007	
Einwohnerwert Ausbau (85%-Wert)	6.200	[EW]
BSB5 (aktuelle Frachtbelastung Zulauf KA)	110	[t/a]
Einwohnerwert aktuell Zulauf KA (60 g BSB5/EW*d)	5.043	[EW BSB]
Angeschlossene Einwohner	5.050	[Einw.]
C-Abbau (Schlammalter ca. 5 Tage)	Nein	
Nitrifikation (Schlammalter ca. 13 Tage)	Nein	
Nitrifikation (Schlammalter > 25 Tage)	Ja	
Filtration	Ja	
Hebwerke (Höhendifferenz aller Einlauf- und Zwischenhebwerke exkl. Filtration)	3	[m]
Abwasseranfall	409.358	[m3/a]
Rohschlammanfall	5.412	[m3/a]
Trockensubstanz im Rohschlamm	89	[t TR/a]
Organischer Anteil Schlammeintrag in Faulung		[t oTR/a]
Faulgasanfall gesamt [Normkubikmeter]	0	[Nm3/a]
Faulgasnutzung Kessel	0	[Nm3/a]
Faulgasnutzung BHKW	0	[Nm3/a]
Faulgasverkauf	0	[Nm3/a]
Abfackelung Faulgas	0	[Nm3/a]
Wärmeprod. intern genutzt (Kessel, BHKW)	0	[MWh/a]
Einkauf Wärme-Energie (z.B. Heizöl)	0	[MWh/a]
Endenergieverbrauch Wärme gesamt	0	[MWh/a]
Elektrizitätsproduktion intern (BHKW)	0	[MWh/a]
Einkauf Elektrizität (Netz EVU)	719	[MWh/a]
Elektrizitätsverbrauch Belebung	125	[MWh/a]
Endenergieverbrauch Elektrizität gesamt	719	[MWh/a]

Die Angabe der BSB5-Frachtbelastung im Zulauf erfolgt durch Rückrechnung aus den zuvor auf Basis der CSB- und N-Frachten ermittelten Einwohnerwerten mit einer einwohnerspezifischen Belastung von 60 g/(EW·d).

Der Einkauf Elektrizität setzt sich zusammen aus dem Strombezug für die Kläranlage und für das Pumpwerk.

9.3 Energieverbrauch und Energiekosten

Elektrische Energie:

Der Gesamtstrombezug der Kläranlage Woffelsbach beträgt für das Jahr 2007 laut Rechnung des EVU 638.407 kWh. 80.960 kWh bezog im Betrachtungszeitraum das Pumpwerk Rurberg. Insgesamt ergibt sich ein Verbrauch von 719.373 kWh. Den monatlichen Strombezug der Kläranlage zeigt die Abbildung 9-3:

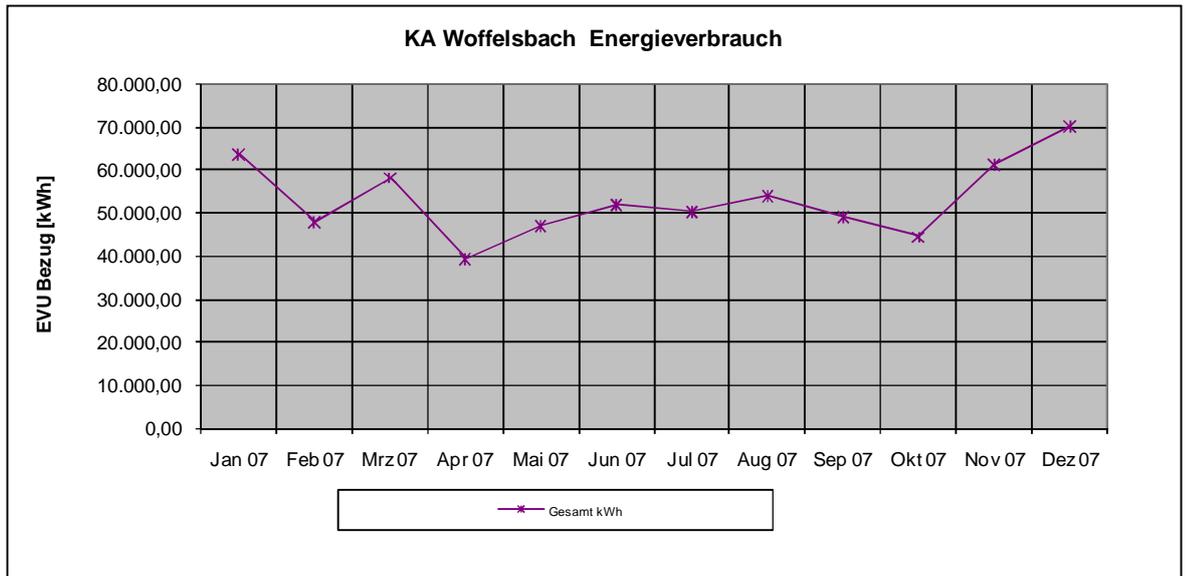


Abbildung 9-3: Monatlicher Strombezug der KA Woffelsbach

Im Jahr 2007 betragen die Kosten für die vom EVU bezogene Energie 75.558,47 € für die Kläranlage und 14.978,81 € für das Pumpwerk Ruhrberg. Die Gesamtkosten betragen demnach 90.537,38 €. Daraus errechnet sich ein spezifischer Mischpreis von 12,6 Cent/kWh.

Thermische Energie

Die erforderliche Raumwärme wird über den Betrieb einer Wärmepumpe, einer Zusatzheizung der Wärmepumpe und einer elektrischen Heizung gedeckt. Der Verbrauch der Wärmepumpe betrug im Jahr 2007 10.000 kWh. Die Zusatzheizung der Wärmepumpe verbrauchte 9.900 kWh. Dieser Energieverbrauch und die entsprechenden Kosten wurden den Kosten für die elektrische Energie zugeordnet.

Alle Daten über den Energiebezug und die daraus resultierenden Kosten sind in den nachfolgenden Tabellen noch einmal aufgeführt.

Tabelle 9-6: Energieverbrauch der KA Woffelsbach im Jahr 2007

Energieverbrauch	Eigenproduktion	Einkauf	Gesamt
Elektrizität	0 MWh/a	719 MWh/a	719 MWh/a
Wärme	0 MWh/a	0 MWh/a	0 MWh/a
Endenergieverbrauch gesamt	0 MWh/a	719 MWh/a	719 MWh/a

Tabelle 9-7: Energieverbrauchskosten der KA Woffelsbach im Jahr 2007

Energie- verbrauchskosten	effektive Ener- giepreise	Energie- verbrauchskosten	Anteil
Elektrizität (inkl. Leistung etc.)	12,6 Cent/kWh	90.537 €/a	100%
Wärme	0,0 Cent/kWh	0 €/a	0%
Endenergiekosten gesamt		90.537 €/a	100%

9.4 Energieverbrauchermatrix

Die Erfassung des Stromverbrauchs der Kläranlage Woffelsbach wurde oben bereits erläutert. Im Betrachtungsjahr 2007 wurden insgesamt **638.407 kWh** elektrischer Energie vom EVU für die Kläranlage bezogen. Weitere 80.966 kWh werden im vorgelagerten Pumpwerk über eine eigene elektrische Versorgung aus dem EVU-Netz bezogen.

Zur Beurteilung des Ist-Zustandes und zum Lokalisieren von Einsparpotenzialen wurde zunächst untersucht, wie sich der Energiebedarf auf die einzelnen Verfahrensstufen und Verbrauchergruppen aufteilt. Die Aufteilung wird im Folgenden grafisch dargestellt und kommentiert. Der Rechengang und der Energieverbrauch jedes Verbrauchers sind der Anlage 9 zu entnehmen. Die Bewertung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate oder Aggregategruppen erfolgt im Kapitel 2.6.

Abbildung 9-4 zeigt in der Gesamtübersicht die Aufteilung der im Jahr 2007 benötigten elektrischen Energie auf die einzelnen Verfahrensstufen. Erwartungsgemäß beansprucht die Membranstufe mit 52,7 % den größten Anteil des Elektrizitätsverbrauchs. Dies entspricht 354.555,71 kWh. Die Verfahrensgruppe mit dem zweitgrößten Energiebedarf ist die biologische Reinigung mit 18,5 % des Gesamtbedarfes. Sie benötigt 124.556,41 kWh. Die Hebewerke benötigen mit 13,5 % ähnlich viel Energie wie die biologische Stufe, dies entspricht 90.664 kWh. Die Verfahrensgruppe Infrastruktur ist der viertgrößte Verbraucher und benötigt mit 57.708 kWh im Jahr etwa 8,6 % der Gesamtenergie. Die mechanische Reinigungsstufe trägt mit 5,2 % bzw. 35.308 kWh zum Gesamtstromverbrauch bei. Der Strombedarf für die Ausgleichsbecken liegt bei 0,9 % und 6.077 kWh. In ähnlichen Größenordnungen liegt der Anteil der Fällmitteldosierung und Schlammbehandlung. Es fallen lediglich 1.752 bzw. 2.034 kWh im Jahr an, was einem Anteil von je 0,3 % entspricht.

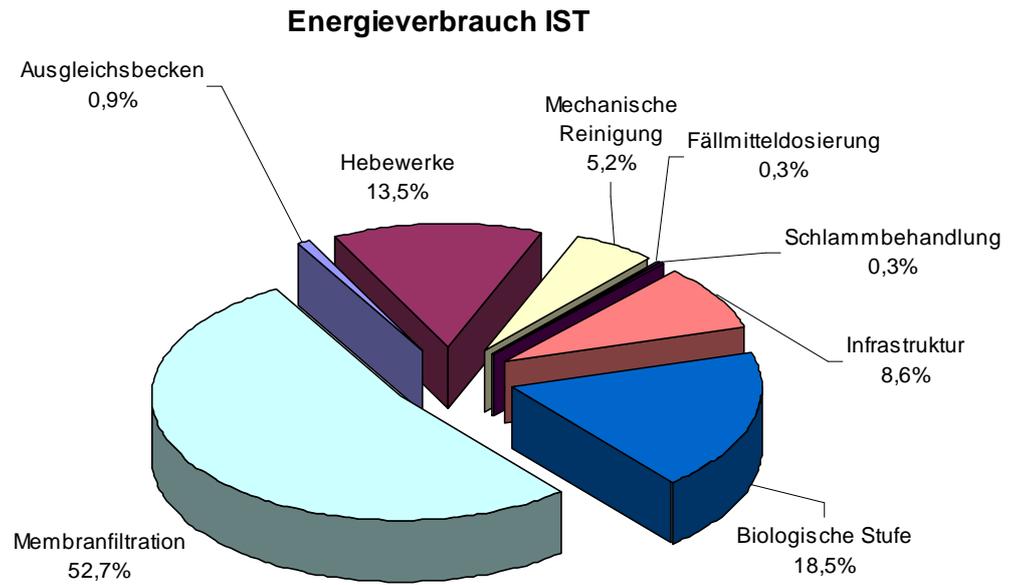


Abbildung 9-4: Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs im Ist-Zustand

Im Folgenden werden die einzelnen Verfahrensstufen hinsichtlich ihres Energieverbrauches genauer betrachtet und bewertet. So zeigt Abbildung 9-5 die Aufteilung des Stromverbrauchs für die mechanische Stufe inklusive der Hebewerke. Den größten Anteil des Elektrizitätsverbrauchs in dieser Gruppe benötigen die Hebewerke mit 72,0 %, was 90.664 kWh im Jahr entspricht. Darin enthalten sind sowohl die Pumpen in Rurberg, als auch die Förderung der Abwässer zur Kläranlage Woffelsbach. Durch die Belüftung des Sandfangs werden 25.181 kWh bzw. 20,0 % verbraucht. Der Rechen (10.127 kWh) ist mit 8,0 % der kleinste Verbraucher.

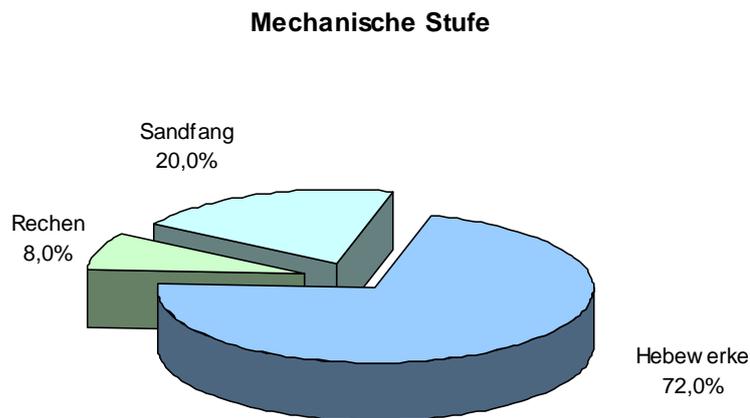


Abbildung 9-5: Verteilung des Strombedarfs der mechanischen Stufe inkl. Hebewerke

Für die biologische Verfahrensstufe sieht die Aufteilung des Stromverbrauchs folgendermaßen aus (Abbildung 9-6):

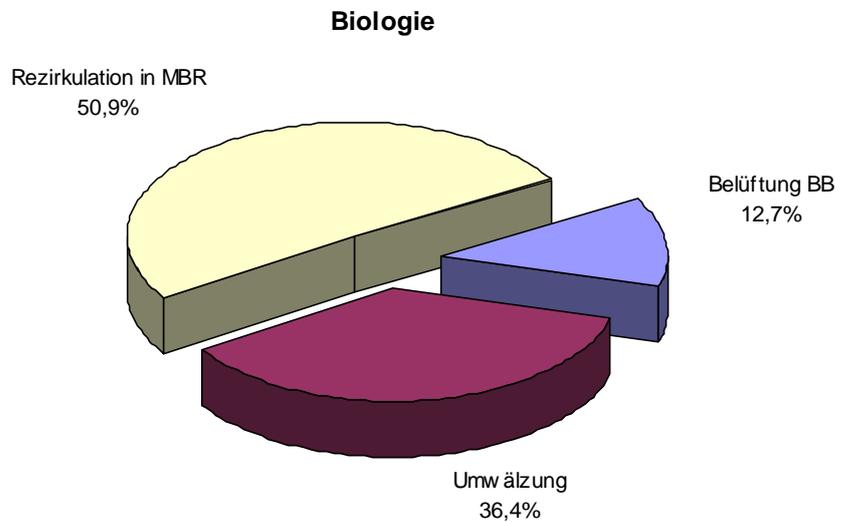


Abbildung 9-6: Verteilung des Strombedarfs der biologischen Stufe

Der größte Stromverbrauch entfällt auf die Rezirkulation der Belebungsbecken in die Membranbecken. Hier werden mit 63.390 kWh 50,9 % der elektrischen Energie dieser Verfahrensstufe benötigt. Dies entspricht 9,4 % des Gesamtstrombedarfs der Kläranlage. Einen ebenfalls bedeutenden Anteil am Stromverbrauch der Biologie hat die Umwälzung (36,4 %). Sie trägt mit 45.336 kWh und 6,7 % zum Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage bei. Der Stromverbrauch der Belüftung der Belebungsbecken in der Biologie liegt bei 15.830 kWh bzw. 12,7 %.

Nach der biologischen Reinigung folgt die Membranstufe. Diese ist der Hauptverbraucher der Kläranlage Woffelsbach. Mit 354.556 kWh verbraucht die Membranstufe mehr als die Hälfte der gesamten Energie der Kläranlage (52,7 %).

Membranfiltration

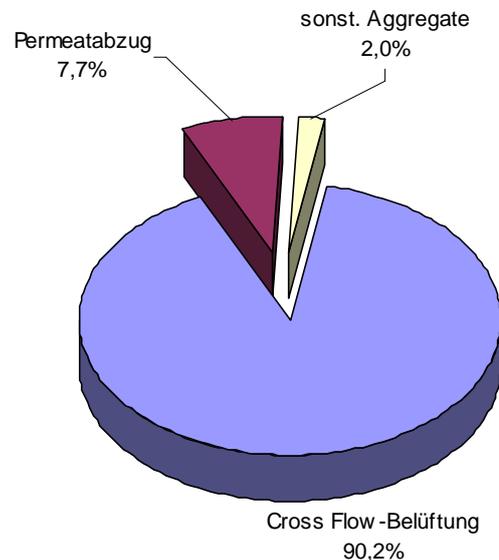


Abbildung 9-7: Verteilung des Strombedarfs der Membranstufe

Innerhalb dieser Stufe hat erwartungsgemäß die Crossflow-Belüftung der Membranmodule mit 90,0 % den größten Anteil am Energieverbrauch, dies entspricht 319.909 kWh. Der Permeatabzug ist mit 8,0 % der nächstkleinere Verbraucher. Im Jahr 2007 verbrauchten die Permeatpumpen 27.434 kWh an elektrischer Energie.

Abbildung 9-8 zeigt die Verteilung des Strombedarfs auf die einzelnen Verbrauchergruppen, die der Infrastruktur zugeordnet werden. Diese machen einen Anteil von etwa 8,6 % des Gesamtbedarfs der Kläranlage an elektrischer Energie aus. Davon entfallen 47,1 % bzw. 27.202 kWh auf die Abluftreinigung. In einer ähnlichen Größenordnung liegt der Energieverbrauch der Betriebsmittel. Mit 42,1 % werden insgesamt 24.279 kWh im Jahr verbraucht. Das Betriebsgebäude benötigt innerhalb der Infrastruktur die geringste Energie. Im Jahr werden 6.228 kWh verbraucht, dies entspricht 10,8 %.

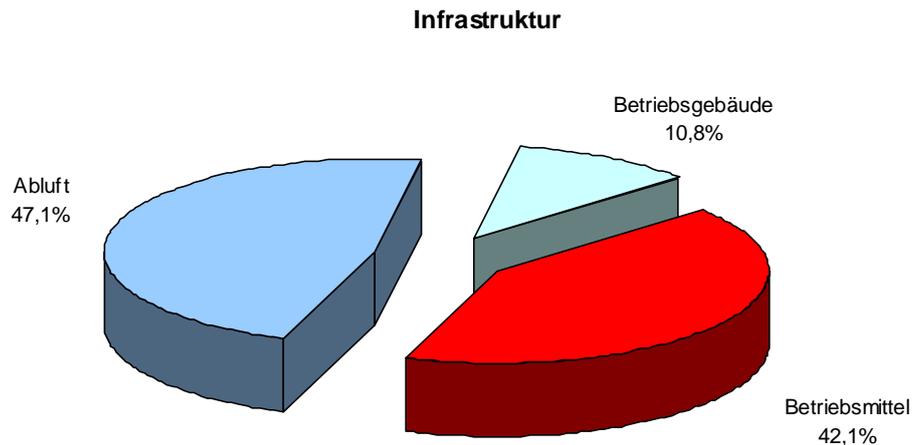


Abbildung 9-8: Verteilung des Strombedarfs der Aggregate der Infrastruktur

Da die Abluft mit 47,1 % und die Betriebsmittel inklusive der Wärmepumpen mit 42,1 % einen recht großen Anteil am Strombedarf der Infrastruktur ausmachen, werden diese Aggregategruppen noch einmal genauer betrachtet (Abbildung 9-9).

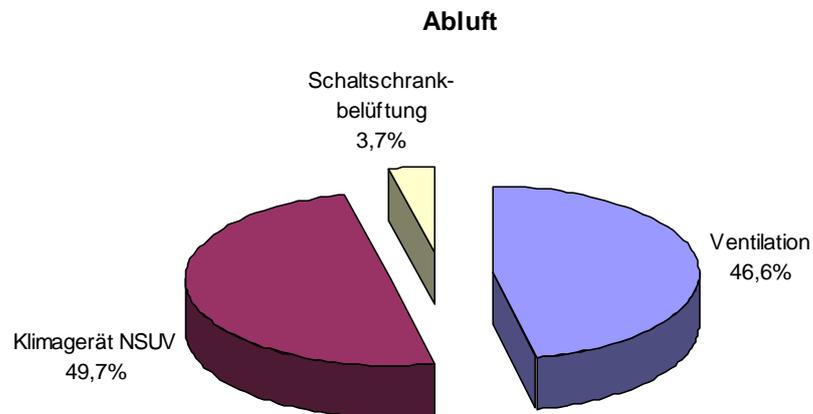


Abbildung 9-9: Verteilung des Strombedarfs der Abluft

Es fällt auf, dass das Klimagerät mit 49,7 % gut die Hälfte des Energieverbrauchs dieser Verfahrensgruppe ausmacht. Es werden hier 13.524 kWh im Jahr verbraucht. Der Betrieb der Ventilation benötigt zusätzlich 12.678 kWh, was einem Anteil von 46,6 % entspricht. Die Schaltschrankbelüftung benötigt 3,7 % des Energiebedarfs. Dies sind 1.000 kWh im Jahr.

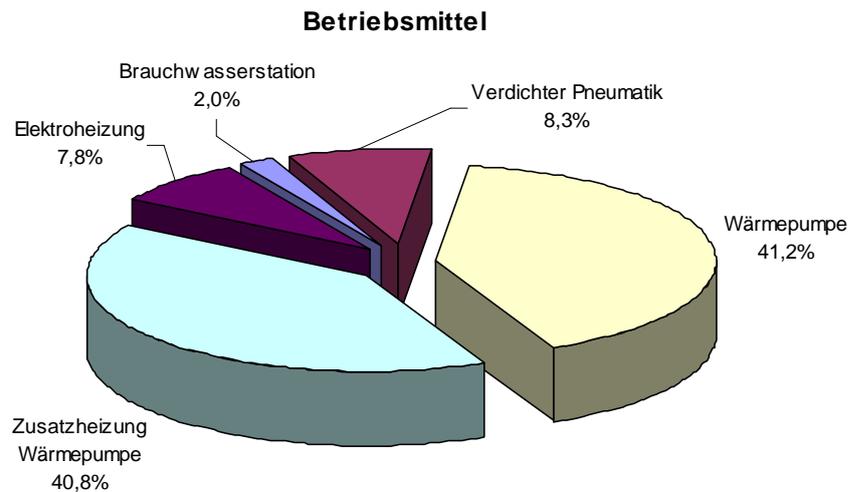


Abbildung 9-10: Verteilung des Strombedarfs der Betriebsmittel

Bei der Betrachtung des Energieverbrauchs der Betriebsmittel fällt auf, dass der Großteil auf die Wärmepumpe fällt. Sie verbraucht insgesamt 41,2 %, was 10.000 kWh im Jahr entspricht. Die Zusatzheizung der Wärmepumpe verbraucht ähnlich viel Energie im Jahr. Der Verbrauch von 9.900 kWh macht einen Anteil von 40,8 % dieser Verfahrensgruppe aus. Die restlichen Verbraucher wie Elektroheizung, Brauchwasserstation und Verdichter benötigen zusätzlich insgesamt 4.379 kWh im Jahr. Dies entspricht zusammen 18 % des Energieverbrauchs.

Abschließend ist in Abbildung 9-11 die Verteilung des Strombedarfs auf die Hauptverbrauchergruppen, unabhängig von der Verfahrensstufe dargestellt. Wie bereits zuvor erläutert, fällt der größte Teil des Strombedarfs auf die Belüftung der Membranbelebung (47,6%), die Hebewerke (13,5 %) und die Rezirkulation (9,4 %). Der Bereich Infrastruktur verbraucht 8,6 % der Gesamtenergie und die Umwälzung im Belebungsbecken geht mit 6,7 % in die Bilanz der Kläranlage Woffelsbach ein. Die anderen Hauptverbraucher haben verhältnismäßig geringe Anteile am Stromverbrauch. Sandfang und Rechen haben einen Anteil von 3,7 % bzw. 1,5 %. Kleinere Verbrauchergruppen wurden unter „Sonstige“ zusammengefasst. Sie benötigen lediglich 1,1 % des Strombedarfs der Kläranlage.

Hauptverbraucher

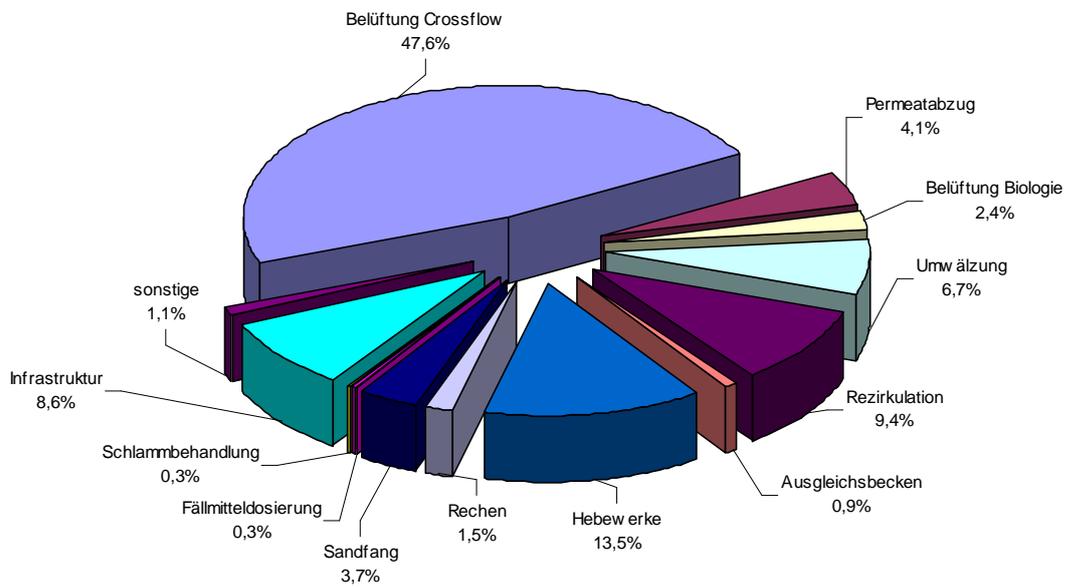


Abbildung 9-11: Verteilung des Strombedarfs auf die Hauptverbrauchergruppen

10 BEWERTUNG IST- ZUSTAND WOFFELSBACH

Als Grundlage für die Bewertung des Ist-Zustandes der Kläranlage Woffelsbach dienen zur Orientierung die gemessenen Werte aus Energieverbrauch und Abwassermengen. Der Größenunterschied des Energieverbrauchs in Abhängigkeit von Trockenwetter- oder Mischwasserabfluss wird deutlich erkennbar. Die folgende Abbildung verdeutlicht dies in Abhängigkeit der tatsächlichen Verbrauchswerte des Klärwerks Woffelsbach:

Spez. Energiebedarf bezogen auf Q

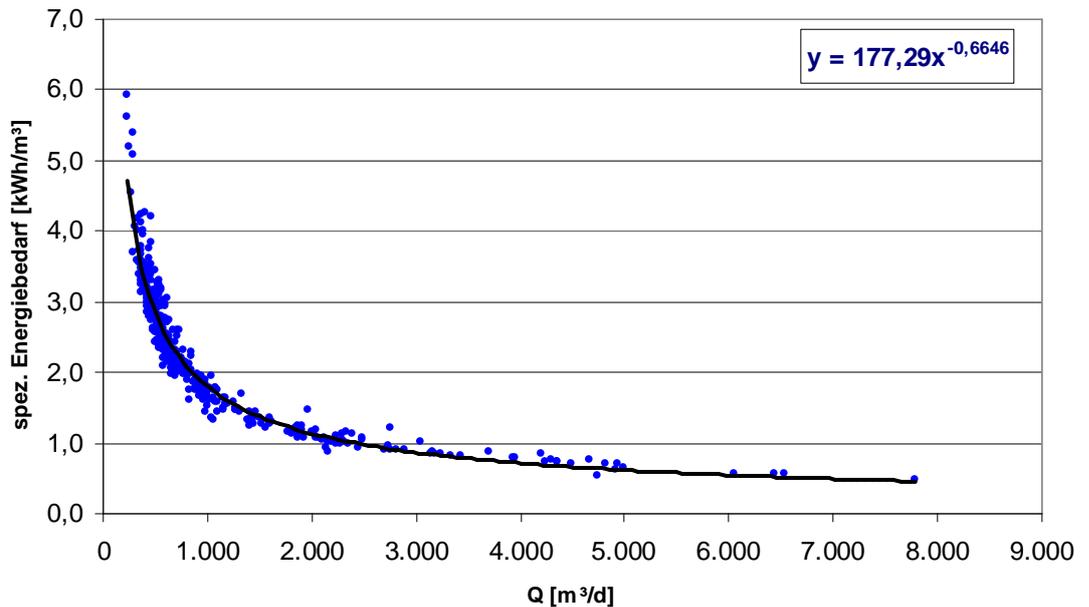


Abbildung 10-1: spez Energiebedarf bezogen auf Zulauf

Es ist zu erkennen, dass bei Trockenwetterabflussmengen unter 500 m³/d spezifische Energieverbrauchswerte zwischen 2,5 und bis zu 6,0 kWh/m³ erreicht werden. Bei hohen Mischwasserabflüssen von über 4.000 m³/d werden spezifische Energieverbrauchswerte < 0,90 kWh/m³ möglich. Der genannte mittlere spezifische Energieverbrauch von 1,63 kWh/m³ bezieht sich auf den Abfluss im Jahresmittel von gut 1.122 m³/d. Um eine optimale Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde daher auch der Energiebedarf der Modellanlage bei mittlerem Mischwasserabfluss betrachtet (0,70 kWh/m³).

Zur Beurteilung der membranspezifischen Anlagenteile erfolgt eine Gegenüberstellung der mittels der Modellanlage theoretisch ermittelten Werte mit den Ist-Werten des Klärwerks Woffelsbach. Da es sich bei dem auf dem Klärwerk Woffelsbach gemessenen Wert um einen Wert handelt, der sich auf die Jahresabwassermenge inkl. Niederschlagswasser bezieht, wurde der entsprechende Wert der Modellanlage zum Vergleich herangezogen. Dies ist grafisch und tabellarisch in der folgenden Abbildung und der folgenden Tabelle dargestellt:

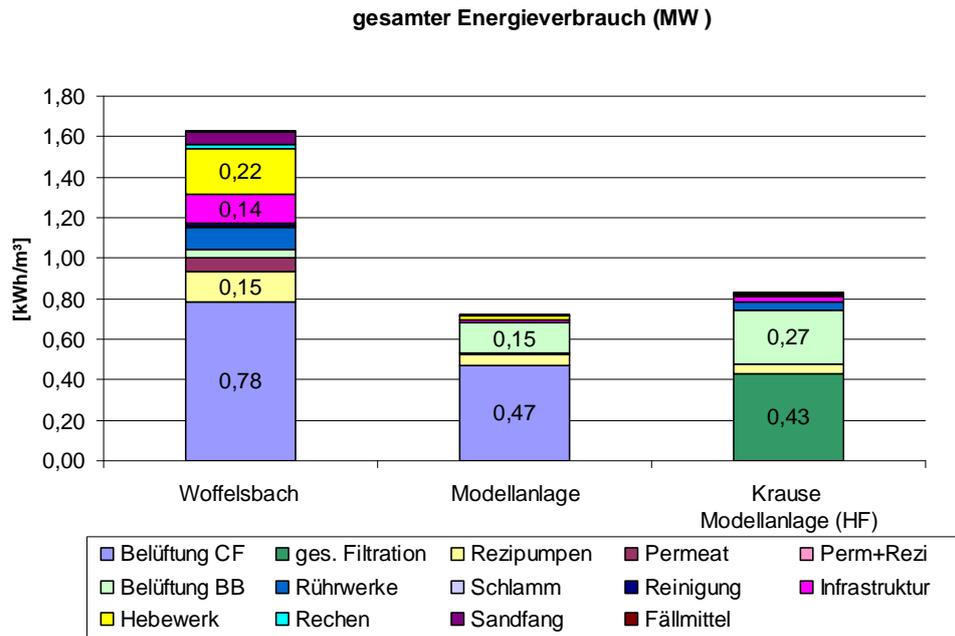


Abbildung 10-2: Gegenüberstellung Gesamtenergieverbrauch Klärwerk Woffelsbach und verschiedene Modellanlagen

Tabelle 10-1: Gegenüberstellung Gesamtenergieverbrauch Klärwerk Woffelsbach und verschiedene Modellanlagen

Verbraucher	Woffelsbach	Modellanlage	Krause Modellanlage (HF)
	[kWh/m³]	[kWh/m³]	[kWh/m³]
Belüftung CF	0,78	0,47	0,00
ges. Filtration	0,00	0,00	0,43
Rezipumpen	0,15	0,05	0,05
Permeat	0,07	0,01	0,00
Perm+Rezi	0,00	0,00	0,00
Belüftung BB	0,04	0,15	0,27
Rührwerke	0,11	0,00	0,04
Schlamm	0,00	0,00	0,00
Reinigung	0,02	0,00	0,00
Infrastruktur	0,14	0,01	0,02
Hebewerk	0,22	0,01	0,01
Rechen	0,02	0,00	0,00
Sandfang	0,06	0,01	0,01
Fällmittel	0,00	0,00	0,00
Summe:	1,63	0,72	0,83

Wie erkennbar ist, liegt der Verbrauch beider Modellanlagen deutlich niedriger als die tatsächlich gemessenen Werte in Woffelsbach. Wie bereits erwähnt, ist der erhöhte Energieverbrauch des Klärwerks Woffelsbach gerade im Bereich der Hebewerke damit zu begründen, dass das Abwasser über eine lange Druckrohrleitung vom Pumpwerk Rurberg bis vor den Rechen gepumpt wird. Betrachtet man die Kategorie Hebewerke

ohne den Verbrauch des Pumpwerks Rurberg (79.211 kWh/a), so verringert sich der spezifische Energieverbrauch auf nur noch 0,03 kWh/m³. Dieser liegt damit nur noch geringfügig über dem Idealwert.

Ein weiterer maßgebender Punkt ist der erhöhte Energiebedarf der Crossflow-Belüftung. Dieser liegt 0,31 kWh/m³ bzw. 66 % über dem theoretisch berechneten Idealwert. Auch der spezifische Wert der Rührwerke ist deutlich erhöht. Für beide Verfahrensstufen werden im Folgenden Energiesparmaßnahmen erarbeitet. Auch im Bereich der mechanischen Vorreinigung und Infrastruktur sind erhöhte Energieverbrauchswerte zu erkennen.

Die Bewertung des energetischen Ist-Zustandes der Kläranlage wird für die nicht-membranspezifischen Verfahrensstufen durch den Vergleich des Energieverbrauchs der einzelnen Verfahrensstufen mit den Hilfswerten des Handbuches „Energie in Kläranlagen“ durchgeführt. Dabei wird der Stromverbrauch über die Zahl der an die Kläranlage angeschlossenen Einwohnerwerte auf einwohnerspezifische Werte umgerechnet, sodass sich entsprechende Vergleichszahlen ergeben.

In Tabelle 10-2 ist der Energienachweis nach MUNLV für die KA Woffelsbach zusammengefasst.

Tabelle 10-2: Spezifischer Energieverbrauch und Vergleichswerte nach MUNLV (für konventionelle) Anlagen für das Klärwerk Woffelsbach

Energienachweis	IST-Zustand	Richtwert	Idealwert
gesamter spez. Elektrizitätsverbrauch pro EW BSB	143 kWh/EW a	64 kWh/EW a	37 kWh/EW a
spez. Elektrizitätsverbrauch Belebung pro EW BSB	25 kWh/EW a	36 kWh/EW a	28 kWh/EW a
Grad der gesamten Faulgasnutzung	0 %	95 %	97 %
Grad der Faulgasumwandlung in Kraft/Elektrizität	0 %	25 %	26 %
spez. Faulgasproduktion pro kg oTR eingetragen	0 l/kg oTR	450 l/kg oTR	475 l/kg oTR
Eigenversorgungsgrad	Wärme	0 %	90 %
	Elektrizität	0 %	36 %

Der spezifische Energieverbrauch liegt mit 143 kWh/(EW·a) für die Gesamtanlage aufgrund des hohen Energiebedarfs der Membranfiltration sehr hoch. Dies ist in den Richt- und Idealwerten nicht berücksichtigt. Der Richtwert wurde manuell um den spezifischen Energieverbrauch des Pumpwerks Rurberg erhöht, um in diesem speziellen Fall dem erhöhten Energiebedarf durch das Überpumpen der Wassermengen Rechnung zu tragen:

$$\Delta E_{\text{Pumpwerk}} = 80.966 \text{ kWh/a} / 5.043 \text{ EW} = 16,02 \text{ kWh/(EW}\cdot\text{a)}.$$

Betrachtet man allein die Belebung, liegt diese in ihrem spezifischen Energieverbrauch mit 25 kWh/(EW·a) sehr günstig. Der Richtwert liegt bei Kläranlagen dieser Größenordnung bei 36 kWh/(EW·a) und der Idealwert bei 28 kWh/(EW·a). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Aggregate der Membranfiltration der Verfahrensgruppe der Nachklärung zugeordnet wurden, also auch die Crossflow-Gebläse. Diese tragen je-

doch auch einen Teil zur Deckung des Sauerstoffbedarfs der Belebung bei und müssten anteilig der Belebung zugeordnet werden. Die Betrachtung nach MUNLV ist für die Gesamtanlage an dieser Stelle nicht korrekt und sollte sich auf die einzelnen nicht membranspezifischen Verfahrensschritte beschränken.

Entsprechend detaillierte Tabellen finden sich in der Anlage 10 und 11. Dabei werden der Stromverbrauch der Abwasserreinigung auf die angeschlossenen Einwohnerwerte und der Stromverbrauch der Schlammbehandlung auf das Volumen des behandelten Schlammes bezogen. Die Software des MUNLV rechnet dabei standardmäßig mit der auf S. 85 angegebenen Schlammmenge (in diesem Fall der Überschussschlamm aus der Belebung/Membranfiltration).

In der nachfolgenden Tabelle 10-3 sind die Verfahrensstufen mit den genauen Werten aufgelistet, deren spezifischer Energieverbrauch wesentlich von den Hilfswerten des MUNLV abweicht. Hierbei wurden die auf Verfahrensgruppen bezogenen Vergleichswerte als Mittelwerte der, dem Handbuch beiliegenden Software des MUNLV zu entnehmenden, Hilfswerte angesetzt. Die vollständige Tabelle mit allen spezifischen Energieverbräuchen findet sich in Anlage 8. Die Abwasserhebwerke sind aufgrund der bereits erläuterten besonderen Situation nicht weiter aufgeführt.

Tabelle 10-3: Verfahrensstufen mit erhöhtem Energieverbrauch

Pos.	Verfahren	Verbrauch [kWh/EW]	Hilfswert [kWh/EW]		Abweichung auf Ø des Hilfs- wertes bezogen [%]
			von	bis	
1.1	Regenüberlaufbecken	1,21	0,2	0,6	203%
3.1	Rechen	2,01	0,1	0,2	1240%
4.2	Rundsandfang	4,99	0,50	1,00	565%
6.2	Umwälzung unbelüfteter Teil	8,99	1,70	3,40	253%
8.1	Fällmitteldosierung	0,35	0,04	0,08	483%
13.3	Voreindickung statisch	0,38	0,1	0,2	153%
15.1	Licht, Labor, Werkstatt	1,23	0,18	0,36	356%
16.3	Druckluft	0,40	0,06	0,20	208%
16.4	Heizung	4,32	0,37	0,74	678%
17.2	Lüftungsanlagen	5,39	0,15	0,30	2296%

Für die membranspezifischen Anlagenteile erfolgt die Bewertung über die Kennzahlen der Modellanlage (Tabelle 10-4).

Tabelle 10-4: Erhöhte membranspezifische Verfahrensstufen

Pos.	Verfahren	Verbrauch [kWh/m ³]	Hilfswert [kWh/m ³]	Abweichung auf Hilfswerte bezo- gen [%]
6.3	Rezirkulationspumpen	0,15	0,05	200%
7.12	Permeatpumpen	0,07	0,01	600%
7.3	Crossflow-Belüftung	0,78	0,47	66%

Im Anschluss wird jede erhöhte Verfahrensstufe kurz umschrieben:

Crossflow-Belüftung

Die Crossflow-Belüftung weist einen um 66 % erhöhten Energieverbrauch auf. Die derzeitige Verfahrensgebung in Woffelsbach erscheint energetisch ungünstig zu sein. Je ein Gebläse belüftet in drei Frequenzstufen ein, zwei oder drei Beckenkammern einer Straße. Bisher erfolgt die Anwahl der Becken in den Straßen abwechselnd, sodass zwei Gebläse in kleiner Stufe laufen, statt der energetisch günstigeren Variante, dass ein Gebläse in derselben Straße hochgeschaltet wird. Die detaillierte Berechnung und Beschreibung dieser Maßnahme befindet sich in Kapitel 11.3.1.

Rezirkulationspumpen

Die Rezirkulationspumpen der KA Woffelsbach benötigen insgesamt 63.390 kWh im Jahr. Dies sind ca. 200 % mehr, als der errechnete Verbrauch der Pumpen der Modellanlage. Die Rezirkulationspumpen laufen in Woffelsbach fast das ganze Jahr durchgängig. Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs werden in Zusammenhang mit einer Neuregelung der Crossflow-Gebläse in Kapitel 11.3.1 betrachtet.

Permeatpumpen

Die Permeatpumpen weisen in Woffelsbach mit 0,07 kWh/m³ im Vergleich zur Modellanlage mit 0,01 kWh/m³ einen deutlich erhöhten Energieverbrauch auf. Dies entspricht etwa 600 %. Ein Grund liegt in der derzeitigen Regelung. In Kapitel 11.3.1 wird eine Neuregelung der Membranfiltration genauer umschrieben.

Rechen

Der Rechen der Kläranlage benötigt im betrachteten Jahr insgesamt 10.126,57 kWh. Darunter fällt auch der Betrieb der Feinsiebe, die auf herkömmlichen Kläranlagen nicht betrieben werden. Dieser Verbrauch ist im Vergleich zu dem Hilfswert des MUNLV um 1240 % zu hoch. Die Hauptverbraucher dieser Verfahrensgruppe stellen die beiden Waschpressen dar, die rund 94 % der Energie benötigen. Ein Austausch der Waschpressen wäre vorstellbar, ist aber aufgrund der Investitionskosten und der relativ geringen Einsparung unwirtschaftlich.

Rundsandfang

Bei dem Sandfang handelt es sich um einen belüfteten Rundsandfang. Den größten Teil der Energie verbraucht das Belüftungsaggregat. Laut Betriebspersonal ist der Grad der Sandabscheidung nicht so hoch wie gewünscht. Der Austausch des Rundsandfangs wurde im Zuge der Maßnahmenbetrachtung untersucht. Derzeitig weisen die Aggregate des vorhandenen Sandfangs folgende Daten auf:

Tabelle 10-5: Verbrauch einzelner Sandfangkomponenten „IST“

	Nennleistung [kW]	maßg. Leistung [kW]	Laufstunden [h/a]	el. Arbeit [kWh/a]
Belüftungsaggregat	3	2,62	8.760	22.941
Schwimmstoffpumpe	1,5	1,85	300	555
Sandaustragsschnecke	0,75	0,72	250	180
Kompressor	1,7	2,13	130	277
Summe				23.953

Durch einen Austausch des Sandfangs könnten die einzelnen Aggregate in ihrem Verbrauch verringert werden. Tabelle 10-6 stellt die optimierten Werte dar:

Tabelle 10-6: Verbrauch einzelner Sandfangkomponenten „NEU“

	Nennleistung [kW]	maßg. Leistung [kW]	Laufstunden [h/a]	el. Arbeit [kWh/a]
Belüftungsaggregat	1,5	1,53	8.760	13.399
Schwimmstoffpumpe	2	1,87	300	562
Sandaustragsschnecke	3	-	250	750
Kompressor	1,7	1,97	130	256
Summe				14.967

Insgesamt könnten bei einem Austausch somit rund 9.000 kWh im Jahr gespart werden. Durch die großen Investitionskosten von rund 83.000 € ergäbe sich jedoch ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von etwa 7, was als sehr unwirtschaftlich einzustufen ist. Der gesamte Austausch des Sandfangs ist also nicht ratsam. Es wäre aber zu prüfen, ob möglicherweise nur das Belüftungsaggregat austauschbar ist, da dieses die größte Einsparung aufweist. Leider lagen keine konkreten Angaben zum vorhandenen Sandfang vor, so dass diese Variante nicht genauer betrachtet werden konnte. Der Einbau einer Kompaktanlage ist aus Platzgründen nicht möglich.

Umwälzung

Die vorhandenen Rührwerke im Belebungsbecken weisen im Vergleich zum Richtwert einen stark erhöhten Energieeintrag auf. Mögliche Energieeinsparungsmaßnahmen werden im Kapitel 11 erarbeitet.

Fällmitteldosierung

Die Fällmitteldosierung liegt 483 % über dem spezifischen Energieverbrauch des Handbuchs. Da diese jedoch eine eher geringe absolute Energieaufnahme aufweist und insgesamt nur mit 0,3 % am Energiebedarf der Kläranlage beteiligt ist, erfolgt an dieser Stelle keine genauere Betrachtung.

Voreindickung statisch

Der erhöhte Energieverbrauch der statischen Voreindickung ergibt sich aus dem Betrieb des Rührwerks im Stapelbehälter aufgrund der vorhandenen Schlammkonsistenz. Dieses verbraucht mit 1.067 kWh/a in Bezug auf den Gesamtverbrauch der Kläranlage nur 0,16 % und wird deshalb nicht in die Maßnahmenbetrachtung miteinbezogen.

Licht, Labor, Werkstatt

Der spezifische Energiebedarf des Betriebsgebäudes für Licht, Labor, Werkstätten etc. ist gegenüber den Vergleichswerten des MUNLV um 356 % erhöht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für diese Bereiche keine eigenen Zähler vorliegen und daher der Stromverbrauch nur anhand von Literaturwerten geschätzt werden kann.

Die Erfahrung zeigt, dass die tatsächlichen Energiebedarfswerte im Bereich der Infrastruktur häufig von den Richtwerten abweichen. Nennenswerte Optimierungspotenziale sind in diesem Bereich üblicherweise nicht zu finden.

Grundsätzlich wird vom Personal bereits ein bewusster Umgang mit Energie gepflegt (Ausschalten der Beleuchtung bei Verlassen eines Raumes etc.). Eine weitere Sensibilisierung in diesem Bereich ist aber immer empfehlenswert.

Druckluft

Auf einer Kläranlage mit Membrantechnologie werden mehr Armaturen mittels Druckluft betrieben, als es auf konventionellen Anlagen der Fall ist. Aus diesem Grund ist der Energieverbrauch im Bereich Druckluft leicht erhöht. Der Verbrauch übersteigt den Richtwert nach MUNLV um 208 %, was aber effektiv nur 0,3 % des Gesamtverbrauches ausmacht. Da aber hier kein Einsparpotential erkennbar ist, erfolgt keine Erarbeitung von Sparmaßnahmen.

Heizung

Der Energieverbrauch für die Heizung liegt mit 21.800 kWh/a deutlich über den Mittelwerten des Handbuchs. Insgesamt beträgt die Abweichung 678 %. Dieser hohe Wert lässt sich vor allem auf den Betrieb der Wärmepumpe und der Zusatzheizung der Wärmepumpe zurückführen. Eine weitere Betrachtung erfolgt an dieser Stelle nicht.

Abluft

Die Lüftungsanlage erfordert insgesamt 27.202 kWh elektrische Energie. Damit liegt sie für eine Anlage dieser Größenordnung weit über dem üblichen Energieverbrauch. Der spezifische Verbrauch für die Abluftbehandlung am Klärwerk Woffelsbach liegt bei knapp 5,39 kWh/EW und damit 2.296 % über dem Mittel der Hilfswerte des MUNLV für die Abluftbehandlung. Ein Grund hierfür ist der Betrieb des Klimagerätes in der NSUV Anlage. Durch den Betrieb der Membrananlage werden viele Vorgänge automatisiert durchgeführt, was die hohe Anzahl an Schaltschränken erklärt. Durch die baulichen Gegebenheiten und dem vorhandenen Flachdach besteht im Sommer eine sehr hohe Sonneneinstrahlung. Bisher wird der NSV Raum auf eine Temperatur von 22 °C gekühlt. Eine Anhebung der Temperatur zur Energieeinsparung ist nicht sinnvoll, da eine Erhöhung des Temperaturniveaus Einschränkungen im Betrieb der elektrischen Geräte hervorrufen kann.

11 MAßNAHMEN WOFFELSBACH

11.1 Bereits durchgeführte Maßnahmen

11.1.1 Außerbetriebnahme eines Rührwerks

Im Belebungsbecken der Kläranlage Woffelsbach befinden sich zwei Rührwerke vom Typ Amaprop des Herstellers KSB, die im Betrachtungszeitraum durchgehend in Betrieb waren. Durch das Betriebspersonal wurde erläutert, dass im Jahr 2008 eines der beiden Rührwerke durch Materialermüdung ausgefallen ist und nicht ersetzt wurde. Das Belebungsbecken wird demnach zum aktuellen Zeitpunkt nur durch ein Rührwerk umgewälzt. Ein Rührwerk benötigt bei einem Belebungsvolumen von 279 m³ einen spezifischen Verbrauch von 9,3 W/m³. Dieser Wert ist im Vergleich zu Angaben aus der Literatur von 1,5 – 3 W/m³ deutlich erhöht. In Kapitel 11.4.1 wird deshalb zusätzlich die Einsparung bei einem Austausch beider Rührwerke betrachtet.

Einsparpotenzial

Wird das Belebungsbecken durch zwei kontinuierlich laufende Rührwerke umgewälzt, so entsteht ein jährlicher Verbrauch von 45.336 kWh. Bei Stilllegung eines Rührwerks halbiert sich der Energieverbrauch demnach auf 22.668 kWh. Bei einem effektiven Energiepreis von 12,6 Cent/kWh entspricht dies einer Einsparung von 2.853 € im Jahr.

Investitionskosten

Durch die Stilllegung eines Rührwerks fallen keinerlei Investitionskosten an.

11.2 Sofortmaßnahmen

Es konnten keine Sofortmaßnahmen für die KA Woffelsbach ermittelt werden.

11.3 Kurzfristige Maßnahmen

11.3.1 Anpassung der Steuerung der Membranfiltration – K1

Die derzeitige Regelung der Membranfiltration sieht vor, dass die Anwahl der Becken immer abwechselnd in beiden Straßen erfolgt. Da je Straße ein Gebläse, schaltbar in 3 Stufen (1, 2, 3 Becken in Betrieb), zur Verfügung steht, werden demnach bei 2 filtrierenden Straßen auch beide Gebläse betrieben. Diese Regelung ist bei Betrachtung des Verbrauchs der Gebläse in den jeweiligen Stufen eher ungünstig. Zur Einsparung von Energie wäre es günstiger, zunächst erst eine Straße mit allen 3 Becken zu betreiben und die zweite Straße erst danach anzuwählen. Somit kann zunächst ein Gebläse hochgeschaltet werden, bevor das zweite Gebläse anspringt. Diese Regelung ist insofern interessant, da zu 95 % der Zeit nur eine Straße zum Filtrieren ausreicht. Folgende Grafik stellt dies dar:

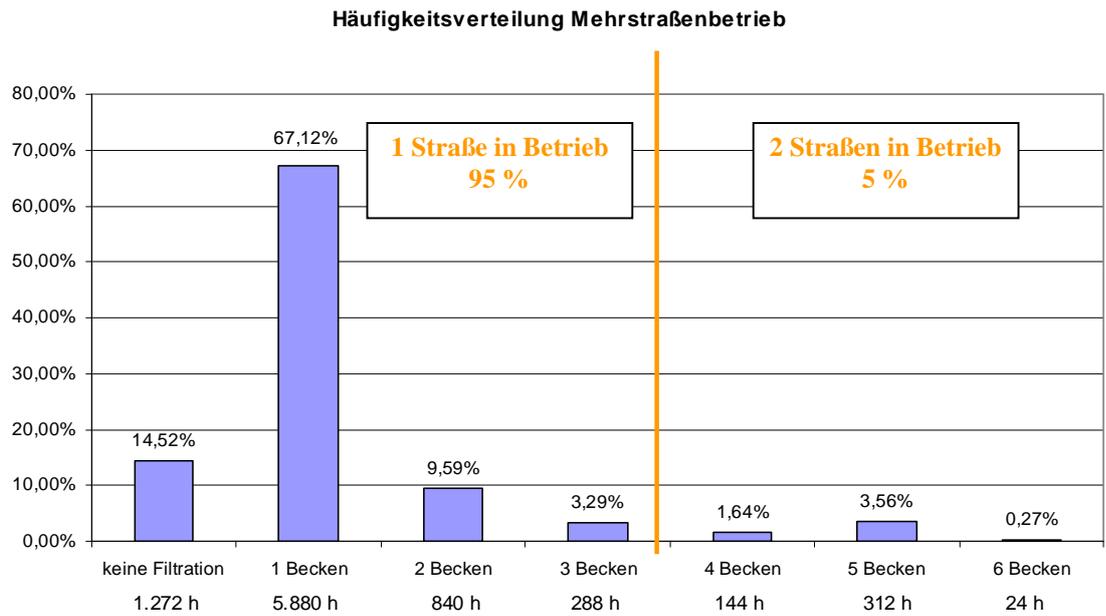


Abbildung 11-1: Häufigkeitsverteilung Woffelsbach

In Tabelle 11-1 ist die derzeitige Regelung und die aktuelle Leistungsaufnahme der beiden Gebläse dargestellt:

Tabelle 11-1: Leistungsaufnahme der Gebläse bei aktueller Regelung

Becken in Betrieb [Stk.]	Straßen in Betrieb [Stk.]	Gebläse in Betrieb [Stk.]	Leistung Gebläse 1 [kW]	Leistung Gebläse 2 [kW]	Leistung gesamt [kW]
1	1	1	25	0	25
2	2	2	25	25	50
3	2	2	39	25	64
4	2	2	39	39	78
5	2	2	56	39	95
6	2	2	56	56	112

Einsparpotenzial Gebläse

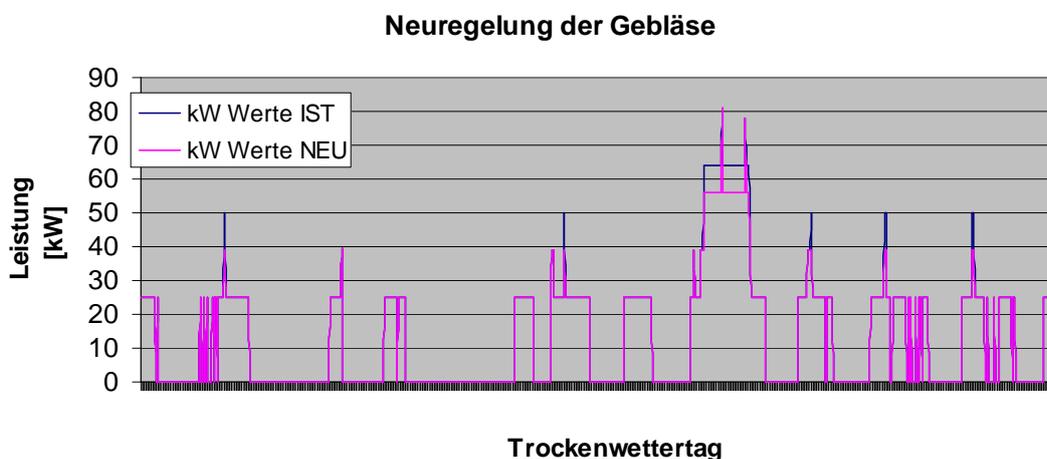
Durch die neue Regelung, dass erst eine Straße und demnach auch ein Gebläse in allen drei Stufen hochgeschaltet wird, ändert sich die Leistungsaufnahme wie in Tabelle 11-2 dargestellt ist wie folgt:

Tabelle 11-2: Leistungsaufnahme der Gebläse bei neuer Regelung

Becken in Betrieb [Stk.]	Straßen in Betrieb [Stk.]	Gebläse in Betrieb [Stk.]	Leistung Gebläse 1 [kW]	Leistung Gebläse 2 [kW]	Leistung gesamt [kW]
1	1	1	25	0	25
2	1	1	39	0	39
3	1	1	56	0	56
4	2	2	56	25	81
5	2	2	56	39	95
6	2	2	56	56	112

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die neue Regelung die größten Auswirkungen auf die Leistungsaufnahme bei einem Betrieb von 1 bis 3 Becken hat. Da dies zu 95 % der Zeit der Fall ist, erscheint diese Maßnahme als besonders sinnvoll.

Es lagen Daten von drei charakteristischen Tagen (Trockenwetter, mittlerer Mischwasserzufluss, maximaler Mischwasserzufluss) vor. Über einen Zeitraum von 18h wurden die Flussraten in Minutenwerten angegeben. Über diese Angaben konnten die Gebläsestufen und die Verbräuche angepasst werden. Abbildung 11-2 zeigt, wie sich die neue Regelung auf die Leistungsaufnahme auswirkt:


Abbildung 11-2: Neuregelung der Gebläse

Nach Optimierung der vorhandenen Gebläseregelung ergibt sich folgende Einsparmöglichkeit:

Tabelle 11-3: Optimierte Regelung (Daten über 18h für 3 charakteristische Tage)

	Summe IST [kWh]	Summe OPT. [kWh]	Einsparung [%]
Trockenwetter – 176 Tage	230	222	4
mittl. Mischwasser – 172 Tage	245	237	3
max. Mischwasser – 18 Tage	1290	1290	0

Wie in Tabelle 11-3 deutlich erkennbar ist, ergibt sich eine Einsparung nur an Tagen mit Trockenwetter- und mittlerem Mischwasserzufluss. Da dies aber zu 95 % im Jahr der Fall ist kann, die gesamte jährliche Einsparung in Abhängigkeit des Zuflusses bestimmt werden zu:

$$Einsparung_{gesamt} = (4\% \cdot 176d + 3\% \cdot 172d) / 365d = 3,2\% .$$

Es ist erkennbar, dass die Einsparung bei Trockenwetter und mittlerem Mischwasser am größten ist, was sich aus der Anwahl von meist ein oder zwei Becken ergibt und hier die neue Regelung besonders zum Zuge kommt. Bei einem effektiven Energiepreis von 0,126 Cent/kWh, ergibt sich eine gesamte Einsparung von knapp 10.149 kWh/a bzw. 1.279 €a.

Theoretisch muss auch hier der verringerte Eintrag der grobblasigen Crossflow-Belüftung in die Belebung durch zusätzlichen feinblasigen Lufteintrag ersetzt werden. Das Einsparpotenzial beträgt jedoch nur 3,2 %, was bei einem Lufteintrag von 126.034 m³/a einen Anteil von 4.166 m³/a bzw. 35 kgO₂/a ausmacht. Insgesamt ergibt sich ein zusätzlicher Energieverbrauch der Belebungsgebläse von 12 kWh.

Bei einem Gesamtverbrauch der Crossflow-Gebläse von 317.159 kWh/a beträgt das energetische Einsparpotenzial 10.149 kWh. Zuzüglich des Energiebedarfs der Belebung ergibt sich ein gesamtes Einsparpotenzial von 10.137 kWh. Bei einem effektiven Energiepreis von 12,6 Cent/kWh ergibt sich ein monetäres Potenzial von 1.277 €

Das Ziel, weitestgehend immer nur eine Straße durch Zuschalten der Becken zu betreiben, hat ebenfalls Auswirkungen auf den Betrieb der Rezirkulationspumpen. So bräuchte bei dauerhaftem Betrieb (95 %) von nur einer Straße auch nur eine Rezirkulationspumpe betrieben werden. Die Einsparungen dieser Maßnahme werden im Folgenden erläutert.

Rezirkulationspumpen – Anpassung der Laufzeiten

Wie bereits beschrieben, erscheint es als sinnvoll die Membranfiltration so zu betreiben, dass die Anforderung der Becken zunächst innerhalb einer Straße erfolgt. Neben dem energetischen Vorteil in der Betriebsweise der Gebläse, lassen sich auch die Laufzeiten der Rezirkulationspumpen optimieren. Bisher laufen beide Pumpen durchgehend, unabhängig, ob filtriert wird oder nicht. Diese ständige Durchmischung ist laut Angaben des Betriebspersonals sehr günstig für den Betrieb der Biologie, für die eigentliche Membranfiltration aber nicht nötig. Da angestrebt wird, zum Großteil der Zeit nur eine Straße

zu betreiben, wäre auch der Betrieb von nur einer Rezirkulationspumpe ausreichend. In Abhängigkeit der Häufigkeit, in der einzelne Becken angefordert werden, lässt sich die optimierte Laufzeit der Pumpen wie folgt darstellen. Dabei wurde der Energieverbrauch mit der in der Verbraucherliste angegebenen Leistungsaufnahme von 3,62 kW berechnet.

Tabelle 11-4: Optimierte Laufzeiten der Rezirkulationspumpen

Becken in Betrieb [Stk.]	Pumpen in Betrieb [Stk.]	Anteil Zeit [%]	Betriebsstunden [h]	Leistungsaufnahme [kW]	Energieverbrauch [kWh]
0	1	14,5	1.272	3,4	4.351
1	1	67,1	5.880	3,7	21.673
2	1	9,6	840	4,6	3.870
3	1	3,3	288	5,5	1.573
4	2	1,6	288	3,7	1.062
5	2	3,6	624	4,6	2.875
6	2	0,3	48	5,5	262
			9.240		35.665

Um anaerobe Prozesse durch stehendes Wasser in der zweiten, nicht filtrierenden Membranstraße zu verhindern, wird zusätzlich die zweite Rezirkulationspumpe intervallweise zugeschaltet. Bei einer gewählten Laufzeit von 10 min pro Stunde rezirkuliert die Pumpe aus allen drei Becken mit einer Leistungsaufnahme von 5,5 kW. Insgesamt ergibt sich dadurch ein zusätzlicher Energieverbrauch von:

$$E_{\text{zusätzlich}} = 1.460 \text{ h} \cdot 5,5 \text{ kW} = 8.030 \text{ kWh} / a .$$

Der Betrieb beider Rezirkulationspumpen wirkt sich für die Biologie positiv aus, da somit mehr Volumen aktiviert werden kann. Für die Umsetzung dieser Maßnahme ist Rücksprache mit dem Betriebspersonal zu halten und zu prüfen, ob eine solche Regelung machbar ist. Weiterhin ist nach Absprache mit dem Personal erwünscht, die angeählte Straße etwa stündlich zu wechseln.

Einsparpotenzial Rezirkulationspumpen

Im Betrachtungszeitraum betrug die Laufzeit beider Pumpen etwa 17.506 h und der daraus resultierende Energieverbrauch 63.371 kWh. Nach Änderung der Regelung kann der Verbrauch um 19.676 kWh auf nur noch 43.695 kWh im Jahr gesenkt werden. Bei einem effektiven Energiepreis von 12,6 Cent/kWh ergibt dies eine Einsparung von rund 2.476 €

Einsparpotenzial gesamt

Das gesamte Einsparpotenzial ergibt sich aus der Summe der einzelnen Einsparungen der Gebläse und der Rezirkulationspumpen. Insgesamt können durch die neue Regelung $10.137 \text{ kWh} + 19.676 \text{ kWh} = 29.813 \text{ kWh}$ eingespart werden. Dies entspricht umgerechnet 3.752 €a .

Investitionskosten

Für die Anpassung der Steuerung fallen Kosten für die Programmierungsarbeiten in den entsprechenden SPS an. Nach Angaben von BN Automation fallen für die Neuregelung des Straßenbetriebes rund 2.500 € an Programmierkosten an. Damit liegt der K/N-Faktor bei $0,08$. Die Maßnahme ist sehr wirtschaftlich.

11.3.2 Anpassung der Anwahl der Becken innerhalb einer Straße –K2

Zusätzlich zur neuen Regelung der Membranfiltration, dass zunächst die Becken einer Straße betrieben werden bevor die zweite Straße angewählt wird, besteht die Möglichkeit, die Regelung innerhalb einer Straße anzupassen. Grundlegender Ansatz hierfür ist der vorhandene Lufteintrag. Die derzeit eingetragene Luftmenge, abhängig von der Schaltstufe ist in Tabelle 11-5 dargestellt:

Tabelle 11-5: Lufteintrag abh. von den Schaltstufen

Frequenz	Leistung	Lufteintrag
[Hz]	[kW]	[l/(m ² ·min)]
20	25	13,02
30	39	9,76
40	56	8,68

Laut dem Hersteller Kubota liegt der optimale Lufteintrag zwischen $8,75$ und $12,75 \text{ l/(m}^2\cdot\text{min)}$. Demnach ist erkennbar, dass die eingetragene Luftmenge am wirtschaftlichsten ist, wenn die Gebläse in Schaltstufe 2 (30 Hz) laufen. Dies ist der Fall, wenn 2 Becken in Betrieb sind. Wie in der Häufigkeitsverteilung (Abbildung 11-1) ersichtlich ist, wird zu rund 67% der Zeit nur ein Becken betrieben. D.h., zu 67% der Zeit wird mit $13,02 \text{ l/(m}^2\cdot\text{min)}$ zu viel Luft eingeblasen. Eine andere Regelung der Beckenanwahl könnte den Lufteintrag dementsprechend optimieren

Einsparpotenzial

Die vorhandene Regelung sollte so umgestellt werden, dass statt einem Becken immer zwei Becken filtrieren. Bei Filtration in Stufe 2 liegt der vorhandene Lufteintrag mit $9,76 \text{ l/(m}^2\cdot\text{min)}$ genau mittig im geforderten Bereich des Herstellers. Die ankommende Wassermenge wird somit nicht einem Becken zugeführt, sondern zweien. Dadurch verringert sich die Laufzeit der Gebläse um die Hälfte.

1 Becken : 7.949 h bei 25 Hz = 198.735 kWh

2 Becken : 3.975 h bei 39 Hz = 155.014 kWh

Insgesamt ergibt sich durch die neue Regelung ein Einsparpotenzial von rund 43.722 kWh im Jahr, was einem monetären Potenzial von 5.503 € entspricht

Durch die verkürzte Laufzeit der Crossflow-Gebläse wird weniger Sauerstoff in die Belebung eingetragen. Analog zur Vorgehensweise in Konzen wird im Folgenden das theoretisch entstehende Sauerstoffdefizit über die feinblasige Belüftung im Belebungsbecken ausgeglichen. Insgesamt entsteht ein zusätzlicher Luftbedarf von 9.041 m³/a (detaillierte Berechnungen siehe Anlage 12). Bei einem Lufteintrag der Belebungsgebläse von 8,3 m³/min und einer Leistung von 11 kW ergibt sich ein zusätzlicher Energieverbrauch von 191 kWh im Jahr. Das gesamte Einsparpotenzial verringert sich somit auf 43.531 kWh mit einem monetären Potenzial von 5.479 €

Investitionskosten

Die Umstellung der Regelung kann im PLS direkt durch das Betriebspersonal vor Ort erfolgen. Es fallen keine zusätzlichen Programmierungskosten an. Diese Maßnahme ist somit als sehr wirtschaftlich einzustufen.

11.4 Abhängige Maßnahmen

11.4.1 Austausch des Rührwerks der Belebung - A1

Derzeit werden zur Umwälzung des Schlammes innerhalb des Belebungsbeckens zwei Rührwerke vom Typ Amaprop des Herstellers KSB verwendet. Nach Betrachtung des spezifischen Energieverbrauchs ist erkennbar, dass die Rührwerke rund 19 W/m³ Belebungsvolumen benötigen. Nach Stand der Technik sind aber mittlerweile Rührwerke mit spezifischen Verbräuchen von ca. 1,5 W/m³ realisierbar. Wie bereits in Kapitel 11.1.1 beschrieben, ist derzeit nur eines der Rührwerke in Betrieb. Um die hohen Kosten der bestehenden Rührwerke zu verringern, ist ein Austausch des verbliebenen Rührwerks gegen ein sparsameres Aggregat sinnvoll. Die nachfolgende Berechnung einer möglichen Einsparung bezieht sich auf den Zustand, dass bereits nur ein Rührwerk betrieben wird und ist in Kombination zu Maßnahme 11.1.1 zu betrachten.

Einsparpotenzial

Das derzeit verwendete Rührwerk benötigt im Jahr rund 22.688 kWh, um ein Volumen von 279 m³ umzuwälzen. Wie bereits in Kapitel 2.2.5 beschrieben, verbrauchen neue Rührwerke nach Herstellerangaben etwa 1,5 W/m³. Dies entspricht, bezogen auf das Belebungsvolumen, einem Jahresverbrauch von 3.666 kWh/a. Das energetische Potenzial des Austausches des derzeit betriebenen Rührwerks kann zu 19.002 kWh/a angegeben werden. Das monetäre Potenzial, bezogen auf den für das Jahr 2007 geltenden elektrischen Energiepreis, beträgt rund 2.392 €/a. Die Kombination der Außerbetriebnahme eines Rührwerks und ein anschließender Austausch beider Rührwerke ergibt in Summe eine Einsparung von 41.670 kWh/a, was einer Kostenersparnis von 5.244 € im Jahr entspricht.

Investitionskosten

Der Austausch des vorhandenen Rührwerks mit energetisch sparsameren Aggregaten kostet nach Auslegung der Fa. Flygt insgesamt rund 12.500 € Es stellt sich somit ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von 0,64 ein, wodurch diese Maßnahme als wirtschaftlich einzustufen ist.

11.5 Gesamtübersicht der vorgeschlagenen Maßnahmen

Nachfolgend werden die vorgeschlagenen Maßnahmen noch einmal mit den notwendigen Investitionen, den erreichbaren Energie- und Kosteneinsparungen sowie dem sich hieraus ergebenden Kosten-/Nutzenverhältnis in Tabellenform zusammengestellt.

Die Übersicht zeigt, dass sich nicht nur das Maßnahmenpaket in Summe wirtschaftlich darstellt, sondern auch, dass jede einzelne Maßnahme für sich betrachtet wirtschaftlich ist. Insgesamt ergibt sich ein K/N-Verhältnis von 0,24 für das Gesamtpaket.

Tabelle 11-6: Gesamtübersicht Maßnahmen Woffelsbach

Nr.	Maßnahme	Verbraucher	Nutzungs- dauer [a]	Investitionen		Energiereduktion		Jahres- kosten [€/a]	Jahres- nutzen [€/a]	K/ N [-]
				Gesamt [€]	Energie [€]	Sparen + genutzte Elektrizität [kWh/a]	Eigenprod. Wärme [kWh/a]			
Sofortmaßnahmen										

Kurzfristige Maßnahmen

Nr.	Maßnahme	Verbraucher	Nutzungs- dauer [a]	Investitionen		Energiereduktion		Jahres- kosten [€/a]	Jahres- nutzen [€/a]	K/ N [-]
				Gesamt [€]	Energie [€]	Sparen + genutzte Elektrizität [kWh/a]	Eigenprod. Wärme [kWh/a]			
K1	Neuregelung der Membranfiltration	7.3	12,5	2.500	2.500	29.813		307	3.752	0,08
K2	Anpassung der Beckenanwahl	7.6	12,5	0	0	43.531		0	5.479	0,00
Kurzfristige Maßnahmen				2.500	2.500	73.344		307	9.231	0,03

Abhängige Maßnahmen

Nr.	Maßnahme	Verbraucher	Nutzungs- dauer [a]	Investitionen		Energiereduktion		Jahres- kosten [€/a]	Jahres- nutzen [€/a]	K/ N [-]
				Gesamt [€]	Energie [€]	Sparen + genutzte Elektrizität [kWh/a]	Eigenprod. Wärme [kWh/a]			
A1	Austausch der Rührwerke	6.1	12,5	12.500	12.500	19.002		1.533	2.392	0,64
Abhängige Maßnahmen				12.500	12.500	19.002		1.533	2.392	0,64

Maßnahmenpaket	Verbraucher	Nutzungs- dauer [a]	Investitionen		Energiereduktion		Jahres- kosten [€/a]	Jahres- nutzen [€/a]	K/ N [-]
			Gesamt [€]	Energie [€]	Sparen + genutzte Elektrizität [kWh/a]	Eigenprod. Wärme [kWh/a]			
Maßnahmen S			2.500	2.500	73.344		307	9.231	0,03
Maßnahmen S+K			15.000	15.000	92.346		1.840	11.622	0,16
Maßnahmen S+K+A									

12 RESULTATE IM ÜBERBLICK

12.1 Energiebilanz

Der Stromverbrauch der betrachteten Anlagenteile der Kläranlage Woffelsbach kann durch das gesamte Maßnahmenpaket um 92.346 kWh/a bzw. 12,8 % gesenkt werden.

Tabelle 12-1: Energiebilanz KA Woffelsbach nach MUNLV

Energiebilanz		IST-Zustand	nach Realisierung der Maßnahmenpakete		
			S	S+K	S+K+A
Elektrizität	-Verbrauch gesamt [kWh/a]	719.373	719.373	646.029	627.027
	-Eigenprod. genutzt [kWh/a]	0	0	0	0
	-Einkauf [kWh/a]	719.373	719.373	646.029	627.027
Wärme	-Verbrauch gesamt [kWh/a]	0	0	0	0
	-Eigenprod. genutzt [kWh/a]	0	0	0	0
	-Einkauf [kWh/a]	0	0	0	0

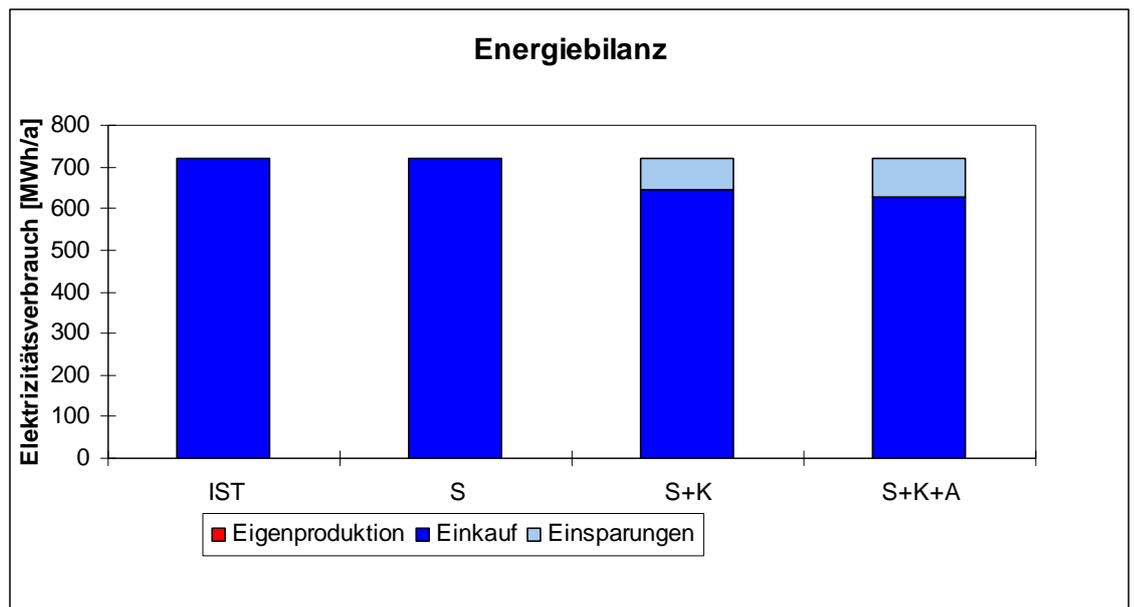


Abbildung 12-1: Grafische Darstellung der Energiebilanz nach MUNLV, Woffelsbach

12.2 Energiebezugskosten

Die Kosteneinsparung durch die Reduktion des Fremdbezuges an Energie wurde auf Basis der Energiepreise für Einkauf und Verkauf im Betrachtungszeitraum 2007 errechnet. Sollten alle hier geschilderten Maßnahmen umgesetzt werden, könnten Energieverbrauchs-kosten in Höhe von 11.622 €a oder 12,8 % eingespart werden. Der Hauptteil der Kostenreduktion für den Bezug von elektrischer Energie resultiert dabei aus der möglichen Optimierung der Beckenanwahl der Membranfiltration. Dadurch entsteht ein Jahresnutzen von 43.531 €

Tabelle 12-2: Tabelle Energieverbrauchskosten nach MUNLV, Woffelsbach

Energieverbrauchskosten	IST-Zustand	nach Realisierung der Maßnahmenpakete		
		S	S+K	S+K+A
Energieverbrauchskosten gesamt	[€/a] 90.537	90.537	81.307	78.915
in % IST	% 100%	100%	90%	87%
Einkauf Elektrizität	[€/a] 90.537	90.537	81.307	78.915
Einkauf Brennstoff	[€/a] 0	0	0	0

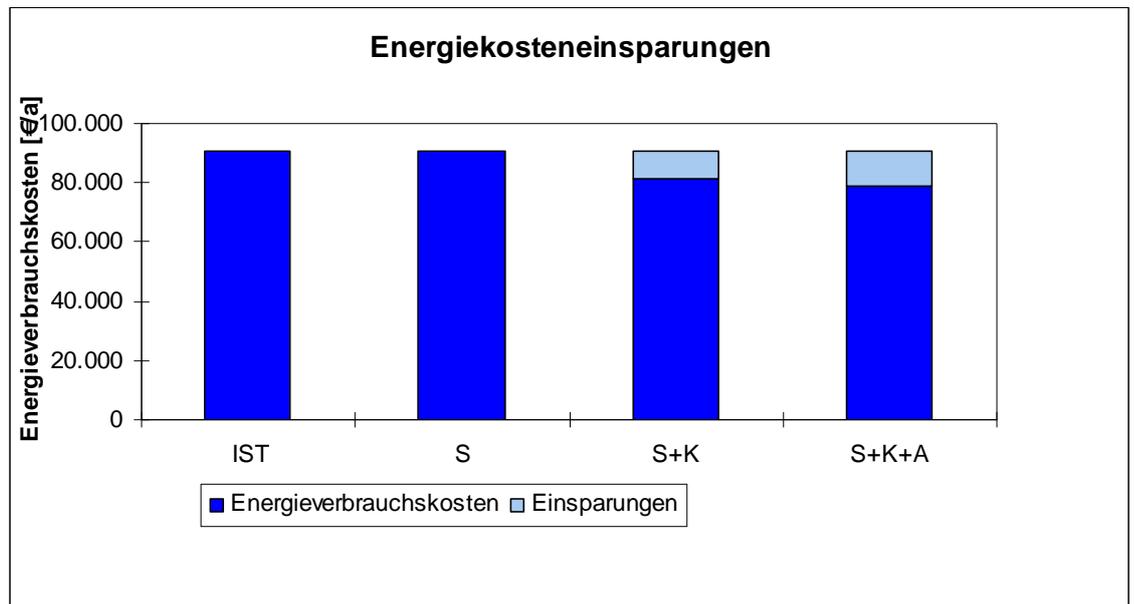


Abbildung 12-2: Graphische Darstellung der Energiekosteneinsparungen nach MUNLV, Woffelsbach

12.3 Wirtschaftlichkeit

Um die dargestellten Einsparungen realisieren zu können, sind eine Reihe von Investitionen zu tätigen. Dabei muss sich insgesamt ein günstiges Kosten-Nutzenverhältnis, das heißt ein Verhältnis $K/N < 1$, ergeben. Nach Umsetzung des kompletten Maßnahmenpakets stehen einem Nutzen von 11.622 €/a Kosten von etwa 1.840 €/a gegenüber. Daraus ergibt sich ein Kosten-Nutzenverhältnis von 0,16. Das Gesamtmaßnahmenpaket ist also als sehr wirtschaftlich einzustufen. Insgesamt erfordern die vorgeschlagenen Maßnahmen ein Investitionsvolumen von 15.000 €, wovon 100 % auf die Energieoptimierung entfallen.

Tabelle 12-3: Wirtschaftlichkeit nach MUNL, Woffelsbach

Investitionen und Wirtschaftlichkeit	IST-Zustand	nach Realisierung der Maßnahmenpakete		
		S	S+K	S+K+A
Gesamt - Investitionen [€]		0	2.500	15.000
Energie - Investitionen [€]		0	2.500	15.000
Jahreskosten [€/a]		0	307	1.840
Jahresnutzen [€/a]		0	9.231	11.622
K / N [-]		0,00	0,03	0,16

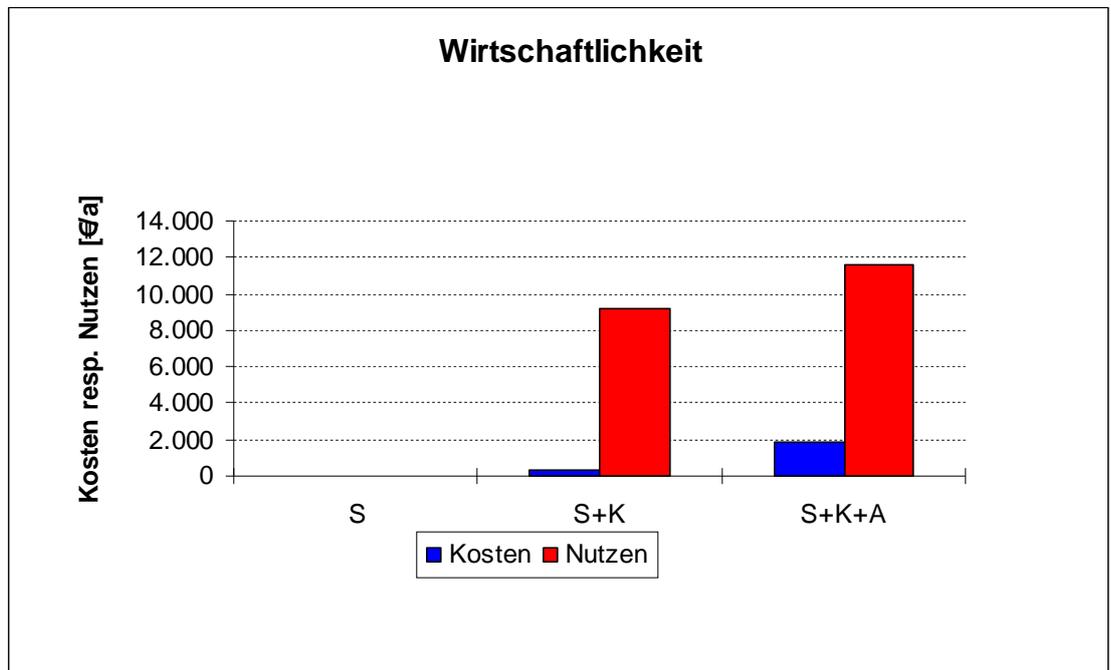


Abbildung 12-3: Grafische Darstellung der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmenpakete nach MUNLV, Woffelsbach

13 ZUSAMMENFASSUNG

Vergleicht man die spezifischen Daten der Kläranlage Woffelsbach nach Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen mit dem Zustand des Betrachtungsjahres 2007, zeigt sich, dass der spezifische Gesamtverbrauch noch um 19 kWh/(EW·a) auf 123 kWh/(EW·a) gesenkt werden kann. Da keinerlei Maßnahmen innerhalb der Belebungs vorgeschlagen wurden, bleibt der Energieverbrauch an dieser Stelle gleich. Da es sich bei der KA Woffelsbach um eine Membrananlage handelt, können die Ideal- und Richtwerte hier nicht als direkter Vergleich dienen.

Alle erläuterten Werte zum Vergleich mit dem Ist-Zustand können noch einmal der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 13-1: Überblick Energienachweis, Woffelsbach

Energienachweis	IST-Zustand	nach Realisierung der Maßnahmenpakete			Richtwert	Idealwert
		S	S+K	S+K+A		
gesamter spez. Elektrizitätsverbrauch	143 kWh/EW a	143 kWh/EW a	128 kWh/EW a	124 kWh/EW a	64 kWh/EW a	40 kWh/EW a
spez. Elektrizitätsverbrauch Belebungs	25 kWh/EW a	25 kWh/EW a	25 kWh/EW a	25 kWh/EW a	36 kWh/EW a	28 kWh/EW a
Grad der gesamten Faulgasnutzung	0 %	0 %	0 %	0 %	95 %	97 %
Grad der Faulgasumwandlung in Kraft/Elektrizität	0 %	0 %	0 %	0 %	25 %	26 %
spez. Faulgasproduktion pro kg oTR eingetragen	0 l/kg oTR	0 l/kg oTR	0 l/kg oTR	0 l/kg oTR	450 l/kg oTR	475 l/kg oTR
Eigenversorgungsgrad	Wärme	0 %	0 %	0 %	90 %	95 %
	Elektrizität	0 %	0 %	0 %	32 %	43 %

Ähnlich wie in Konzen ist auch in Woffelsbach ein Vergleich zu der von Pöyry entwickelten theoretischen Modellanlage deutlich sinnvoller als ein Vergleich zu den Richt- und Idealwerten des MUNLV, da diese die membranspezifischen Anlagenkomponenten nicht berücksichtigen. Ein Vergleich des spezifischen Energieverbrauchs bezogen auf die Wassermenge wird in Tabelle 13-2. dargestellt. Zusätzlich ist in Abbildung 13-1 der Vergleich in Form eines Diagrammes ersichtlich.

Tabelle 13-2: spezifischer Verbrauch nach Umsetzung der Maßnahmen

Verbraucher	Woffelsbach gemessen [kWh/m³]	Woffelsbach optimiert [kWh/m³]	Modellanlage [kWh/m³]
Belüftung CF	0,78	0,65	0,47
ges. Filtration	0,00	0,00	0,00
Rezipumpen	0,15	0,11	0,05
Permeat	0,07	0,07	0,01
Perm+Rezi	0,00	0,00	0,00
Belüftung BB	0,04	0,04	0,15
Rührwerke	0,11	0,01	0,00
Schlamm	0,00	0,00	0,00
Reinigung	0,02	0,02	0,00
Infrastruktur	0,14	0,14	0,01
Hebewerk	0,22	0,22	0,01
Rechen	0,02	0,02	0,00
Sandfang	0,06	0,06	0,01
Fällmittel	0,00	0,00	0,00
Summe:	1,63	1,35	0,72

gesamter Energieverbrauch nach Maßnahmen

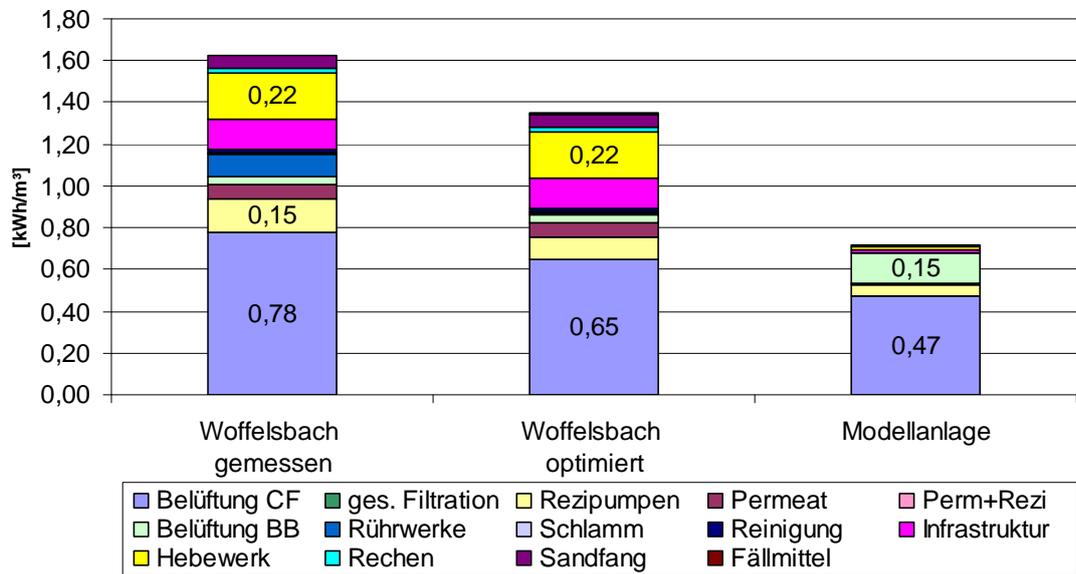


Abbildung 13-1: Vergleich Energieverbrauch Woffelsbach und Modellanlage vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

Insgesamt lässt sich nach Umsetzung der Maßnahmen der spezifische Energieverbrauch von 1,63 kWh/m³ auf 1,35 kWh/m³ senken. Auch hier ist die größte Einsparung im Bereich der Membranfiltration zu finden. Allein die neue Regelung der Crossflow-Belüftung kann den Verbrauch von 0,78 kWh/m³ auf 0,65 kWh/m³ senken. Der weiter-

hin erhöhte Verbrauch ergibt sich aus der Tatsache, dass in Woffelsbach mit einem relativ geringen Fluss gefahren wird. Könnte dieser erhöht werden, würde der Energiebedarf weiter sinken. Auch der Verbrauch der Rezirkulationspumpen verringert sich nach Umsetzung der Maßnahmen. Alles in allem liegt der Gesamtverbrauch aber auch nach Berechnung der Maßnahmen immer noch deutlich über dem der theoretischen Modellanlage. Dies ergibt sich aber zum Teil aus anderen topographischen Gegebenheiten wie z.B. dem vorgelagerten Pumpwerk. Verringert man den Verbrauch von Woffelsbach um den Anteil des Pumpwerks Rurberg, so kann der Gesamtverbrauch dem idealen Verbrauch der Modellanlage angenähert werden:

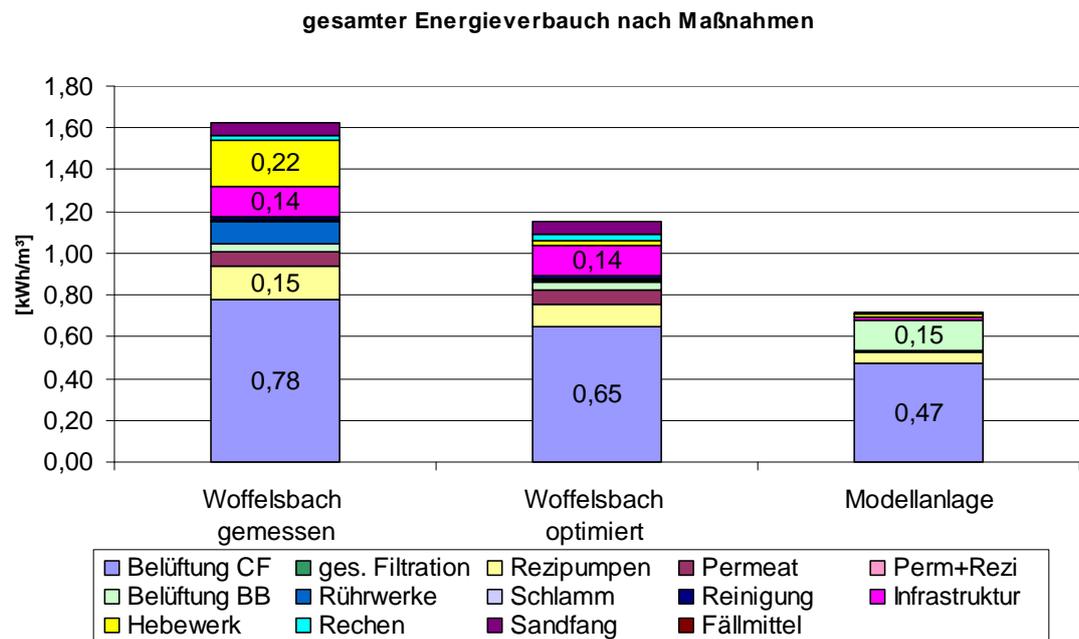


Abbildung 13-2: Vergleich Energieverbrauch Woffelsbach und Modellanlage vor und nach Umsetzung der Maßnahmen, ohne Betrachtung des PW Rurberg

Im Zuge der Energieanalyse konnten einige größere Optimierungsmöglichkeiten gefunden werden. Vor allem der derzeitige Betrieb der Membranfiltration erscheint optimierbar. Eine grundlegende Maßnahme zur Änderung dieser Regelung hätte Auswirkungen auf sowohl die Crossflow-Gebläse als auch den Betrieb der Rezirkulationspumpen.

Abschließend ist zu bemerken, dass die hier vorliegende Feinanalyse ohne die gute Anlagenkenntnis und besonders durch das Engagement beim Zusammenstellen der notwendigen Anlagendaten durch das Betriebspersonal des Klärwerks nicht in der vorliegenden Detailtiefe möglich gewesen wäre. Die Bereitschaft, auch neue Wege zu beschreiten und die Aufgeschlossenheit gegenüber weiteren Optimierungsansätzen waren ebenfalls bei der Durchführung dieser Studie ein entscheidendes Kriterium für das Auffinden der beschriebenen Maßnahmen.

14 WEITERE MÖGLICHE EINSARPOTENZIALE FÜR BEIDE KLÄRANLAGEN

14.1 Permeatabzug unter Ausnutzung des Gravity-Flow

Eine Möglichkeit zur weiteren Einsparung von Energiekosten besteht darin, den Betrieb der Permeatpumpen einzustellen und den Abzug des gereinigten Abwassers allein durch die hydrostatische Druckdifferenz zu ermöglichen. Diese Variante des Permeatabzuges nennt sich Gravity-Flow. Dies wäre aufgrund der örtlichen Gegebenheiten bei beiden Anlagen möglich. Durch die Stilllegung der Permeatpumpen kann fast 100 % der verbrauchten Energie eingespart werden. Da aber noch zusätzliche Schieber und Ventile eingesetzt werden müssen, wird das Einsparpotenzial insgesamt nur zu 90 % angesetzt. Für die Anlagen Konzen und Woffelsbach betrüge dies insgesamt:

KA Konzen: 87.870 kWh bzw. 9.661 €und

KA Woffelsbach: 24.690 kWh bzw. 3.170 €

Insgesamt lässt sich aber sagen, dass eine Umstellung auf den Abzug mittels Gravity-Flow mit großen betrieblichen Umbaumaßnahmen und Umstellungen verbunden ist. Zudem erweist sich die Regelungstechnik des Abzuges über Gravity Flow als schwierig. Aus diesen Gründen und durch anfallende hohe Investitionskosten wird diese Maßnahme als unwirtschaftlich bewertet.

14.2 Erhöhung der Flussrate abhängig von der Abwassertemperatur

Für beide Membrananlagen gilt der gleiche Ansatz, dass generell bei steigender Abwassertemperatur mit höheren Flussraten gefahren werden kann. D. h. wenn demnach im Winter mit einer Rate von 32 l/(m²·h) filtriert wird, so sollte es im Sommer möglich sein, diesen Wert zu erhöhen. Abbildung 14-1: stellt den Temperaturverlauf in der Belebung aus Woffelsbach dar:

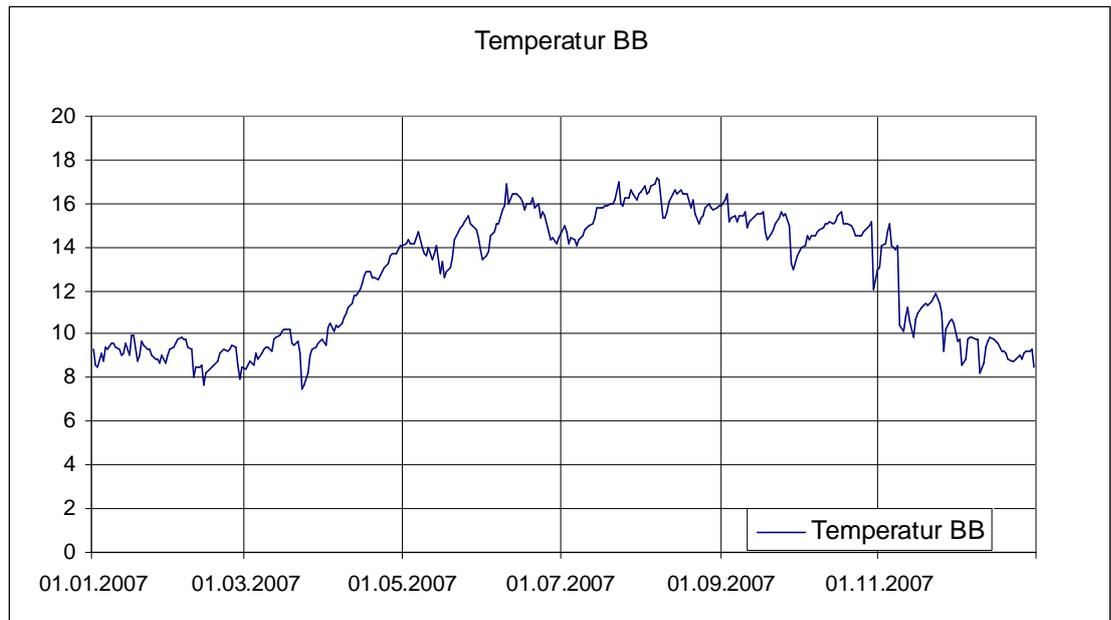


Abbildung 14-1: Temperaturverlauf in der Belebung Woffelsbach

Speziell für Woffelsbach erscheint diese Überlegung sinnvoll, da die Flussraten geringer sind als in Konzen und noch Platz nach oben bieten. Wie aber bereits durch das Betriebspersonal mitgeteilt wurde, besteht ein deutliches Problem in der Deckschichtkontrolle, die durch höhere Flussraten zusätzlich verschlechtert würde. Bei Umsetzung einer solchen Maßnahme sollte demnach ganz genau betrachtet werden, inwiefern sich die Deckschichtkontrolle verschlechtert und ob evtl. die grobblasige Crossflow - Belüftung zusätzlich erhöht werden müsste. Auch eine bisher noch nicht vorhandene Nachbelüftungszeit würde die Kontrolle der Deckschicht weiter verbessern können. Dies würde sich aber negativ auf die Energiebilanz auswirken, da sich die Gebläselaufzeit erhöhen würde. Ob demnach eine Einsparung durch diese Maßnahme möglich wäre, lässt sich ohne betriebliche Erfahrungen nicht sagen, da der Energieverbrauch an anderen Stellen, wie z. B. Crossflow-Belüftung, steigen würde.

14.3 Verminderung des TS - Gehaltes bei steigender Temperatur

Mit steigenden Abwassertemperaturen steigen gleichzeitig die biologischen Umsatzprozesse im belebten Schlamm. Somit ist es denkbar, in den Sommermonaten die Schlammkonzentration und damit gleichzeitig die Viskosität des Schlamm-Wasser-Gemisches zu senken. Bei damit einhergehenden höheren Permeabilitäten könnten gleichzeitig höhere spezifische Flussraten realisiert werden, was sich wiederum positiv auf den spezifischen Energieverbrauch auswirkt.

Abbildung 14-2 stellt den Wassertemperatur- und TS-Gehalt im Belebungsbecken Woffelsbach dar:

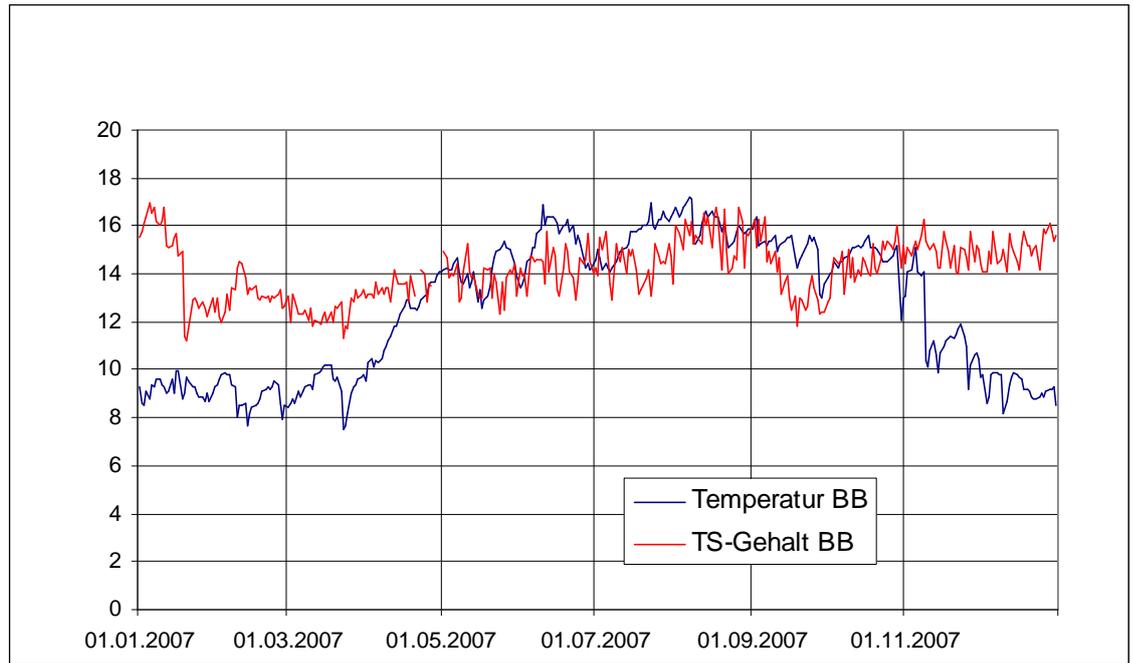


Abbildung 14-2: Verlauf von Temperatur und TS-Gehalt in der Belebung Woffelsbach

Es ist erkennbar, dass der TS- Gehalt übers Jahr gesehen nur geringen Schwankungen unterliegt. Hier sollte die Möglichkeit bestehen, den TS-Gehalt im Sommer zu senken. An dieser Stelle sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass ein minimaler TS-Gehalt von ca. 8 g/l nicht unterschritten werden sollte, da sonst die Deckschichtkontrolle durch die Crossflow-Belüftung negativ beeinflusst werden könnte. Dies hätte ein vermehrtes Membranfouling und damit einen höheren Reinigungsaufwand der Module zur Folge. Auch hier gilt, dass die praktische Umsetzbarkeit dieser Maßnahmen nur durch praktische Versuche vor Ort belegt werden kann.

15 ZUSAMMENFASSUNG UND VERGLEICH MIT HOHLFASERMODULEN

Neben der Bemessung einer idealen Modellanlage für Plattenmodule, wurde von Pöyry GWK auch eine Modellanlage mit Hohlfasermodulen entwickelt. Diese diente als Vergleich bei der Energieanalyse des GWK Nordkanal (<http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/abwasser.htm>), ausgerüstet mit Hohlfasermembranen des Herstellers Zenon. Die ermittelten Idealwerte (Mischwasserzufluss) betragen für die Modellanlage mit Hohlfasern 0,64 kWh/m³ und für die Anlage mit Plattenmembranen 0,72 kWh/m³. Im Vergleich weist die Kläranlage Konzen einen ähnlich guten Energieverbrauch bezogen auf die Modellanlage auf, wie das GWK Nordkanal. Im Bereich der Membranfiltration ist der Verbrauch der KA Konzen um rund 21 % erhöht, der Verbrauch des GWK Nordkanal um etwa 18 %. Nach Umsetzung der ermittelten Maßnahmen kann der Verbrauch der Membranstufe im GWK Nordkanal auf 0 % Abweichung verringert werden, in Konzen liegt der Verbrauch der Membranstufe sogar rund 30 % unterhalb des Idealwertes der Modellanlage

Generell lässt sich sagen, dass nach der Bewertung des Energiebedarfs von Membrankläranlagen weiteres Optimierungspotenzial gefunden werden konnte. Vor allem kann durch eine gut durchdachte und an die vorhandenen Aggregate, wie Gebläse und Pumpen, angepasste Steuerung, der Energiebedarf im Membranbioreaktor verringert werden. Hierbei ist ein maßgebendes Kriterium der Fluss, mit dem die Anlagen betrieben werden. Ist es möglich die Filtration mit hohen Flussraten zu betreiben, so sinkt der Energieverbrauch. Die Höhe der Flussrate ist aber abhängig von den jeweiligen Abwassereigenschaften und dem Verhalten der Membranen. So können zu hohe Flussraten zum Verblocken der Membranen führen. Für die Bemessung der beiden Modellanlagen wurden jeweils dieselben Flussraten verwendet, mit denen die Kläranlagen in der Realität gefahren werden. Für die Modellanlage mit Hohlfasermodulen beträgt die Flussrate 20 l/(m²·h), wohingegen die Modellanlage mit Plattenmodulen für einen Fluss von 32 l/(m²·h) ausgelegt wurde.

In der Gesamtheit liegt der theoretische spezifische Energiebedarf einer Membrananlage mit rund 0,5 kWh/m³ (Betrieb mit Air-Cycling, bei Hohlfasermodulen) bis 0,7 kWh/m³ immer noch deutlich über dem Verbrauch konventioneller Anlagen (0,28 kWh/m³). Durch den viren- und keimfreien Abfluss und die Hygienisierung des Abwassers bieten Membrankläranlagen aber speziell dort Vorteile, wo das eingeleitete Abwasser besonderen Anforderungen entsprechen muss (Trinkwasserentnahme, Badegewässer). Auch der geringe Platzbedarf stellt einen großen Vorteil der Membrananlagen dar. Durch weitere Forschung und Entwicklung ist es in Zukunft möglich, den Energiebedarf der Membrananlagen weiter zu senken und sie somit noch wirtschaftlicher zu machen.

16 VERZEICHNIS DER KURZZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Zeichen	Einheit	Beschreibung
Δp	[m]	Einblastiefe
Δp_s	[bar], [m]	Saugdruck
ΔP_{TM}	[bar], [m]	Transmembrandruck
α	[-]	Grenzflächenfaktor nach Verrecht
α_{BB}	[-]	Grenzflächenfaktor Belebung
α_{OC}	[kgO ₂ /d]	Sauerstoffzufuhr
ρ_{Luft}	[kg/m ³]	Luftdichte
η_G	[%]	Wirkungsgrad
A_M	[m ²]	Membranfläche
A_{Mod}	[m ²]	Membranfläche pro Modul
BB	[-]	Belebung
CF	[-]	Cross-Flow
E_a	[kWh/a]	Energieverbrauch Cross-Flow
E_{spez}	[kWh/m ³]	Spezifischer Energieverbrauch Cross-Flow
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[-]	Hebewerke
h	[m]	Förderhöhe
Inf	[-]	Infrastruktur
MW	[-]	Mischwasser
MBR	[-]	Membran
m_o	[g/(m ³ ·m)]	Sauerstofftrag nach Verrecht
OC	[kgO ₂ /d]	Sauerstoffmenge
OP	[kg/kWh]	Sauerstofftrag

Zeichen	Einheit	Beschreibung
P	[kW]	Leistung
PP	[-]	Permeatpumpen
Q_M	[l/s]	Maximaler Mischwasserabfluss
Q_f	[l/s]	Fremdwasserabfluss
Q_s	[l/s]	Schmutzwasserabfluss
Q_L	[m ³ /h]	Luftmenge
$Q_{L, \text{spez}}$	[m ³ /hm ²]	Spezifischer Luftbedarf
$Q_{T,d,AM}$	[m ³ /d]	Trockenwetterabfluss
$Q_{L,d}$	[m ³ /d]	Eingetragene Luftmenge eines Tages
Q_a	[m ³ /a]	Jahreswassermenge bei Trockenwetter
Q_{RZ}	[m ³ /s]	Rezirkulationsmenge
Q_{BNV}	[m ³ /a]	Wassermenge abh. vom Brutto-Netto-Verhältnis
Q_S	[m ³ /d]	Schlammvolumenstrom
R	[-]	Rechen
Rein	[-]	Reinigung
RW	[-]	Rührwerke
RZ	[-]	Rezirkulationsverhältnis
SF	[-]	Sandfang
SAD_M	[m ³ /hm ²].	Spezifischer Luftbedarf nach Verrecht
Sch	[-]	Schlammbehandlung
Str	[-]	Straße
SV	[-]	Statische Voreindickung
T	[°C]	Temperatur
$t_{G,CF}$	[h/d]	Laufzeit der Cross-Flow Gebläse
t_F	[min]	Filtrationsdauer

Zeichen	Einheit	Beschreibung
t_{RX}	[min]	Relaxationsdauer
TR	[g/l]	Trockenrückstand
\ddot{U}_S	[kg/d]	Schlammmenge
V_{BB}	[m ³]	Volumen Belebung
V_F	[l/m ²]	Durchflussmenge Filtrationsphase
V_N	[m ³]	Volumen Nitrizone
V_{DN}	[m ³]	Volumen Denizone
V_{Vario}	[m ³]	Volumen Variozone
$v_{F,netto}$	[l/(m ² ·h)]	Netto-Fluss
$v_{F,brutto}$	[l/(m ² min)]	Brutto-Fluss

17 LITERATURVERZEICHNIS

Abeling, U., Härtel, L., Hartwig, P., Nowak, O., Otterpohl, R., Schwentner, G., Svardal, K., Wolffson, C.: Bemessung von Kläranlagen zur Stickstoffelimination. Korrespondenz Abwasser, 38. Jg.; 1991, S. 222 - 227

ATV (Hrsg.): ATV-Handbuch: Biologische und weitergehende Abwasserreinigung. 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1997

ATV-DVWK (Hrsg.): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. ATV-DVWK-Regelwerk, Hennef, Mai 2000

ATV (Hrsg.); ATV-Handbuch „Mechanische Abwasserreinigung“, 4. Auflage, Ernst und Sohn Verlag Berlin, 1997

ATV-DVWK (Hrsg.): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 198: Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. ATV-DVWK-Regelwerk, Hennef, April 2003

Bever, Stein, Teichmann.: Weitergehende Abwasserreinigung, 3. Auflage, Oldenburg Verlag, Wien 1995

Böhnke: Bemessung der Stickstoffelimination in der Abwasserreinigung (HSG-Ansatz). Korrespondenz Abwasser, 36. Jg.; Heft 9/1989, S. 1.046-1.061

Dohmann et al.: Bemessung der Belebungsbecken nach dem Ansatz der Hochschulgruppe (HSG-Ansatz). Korrespondenz Abwasser, 40. Jg.; Heft 8/1993, S. 1240

DWA-Fachausschuss KA-5 „Absatzverfahren“; Sandfänge – Anforderungen, Systeme und Bemessung, Korrespondenz Abwasser, Heft 5/08, S. 508 -518, 2008

DWA-Fachausschuss KA-7.: 2. DWA Arbeitsbericht „Membranbelebungsverfahren“, 2005

Imhoff, Karl und Klaus R.: „Taschenbuch der Stadtentwässerung“ , 29. Auflage, R. Oldenburg Verlag München Wien, 1999

Krause, Stefan: Untersuchungen zum Energiebedarf von Membranbelebungsanlagen, Darmstadt, 2005

Kubota: Instruction Manual for Submerged Membrane Unit, Japan; December 2004

Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV) (Hrsg.): Energie in Kläranlagen, Düsseldorf, 1999

Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW (MUNLV) (Hrsg.): Abwasserreinigung mit Membrantechnik – Membraneinsatz im kommunalen und industriellen Bereich. 1. Auflage, Düsseldorf, 2003

Verrecht, B., Judd, S., Guglielmi, G., Brepols, C., Mulder, J. W.: An aeration model for an immersed membrane bioreactor; Water Research, Heft 42, 2008

18 TABELLEN- UND BILDVERZEICHNIS

18.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wassermengen für die Bemessung der Modellanlage	11
Tabelle 2-2: Bemessungskonzentrationen und zugehörige Frachten	13
Tabelle 2-3: Mittelwerte und 85 %-Quantile der Tagesfrachten der KA Konzen	14
Tabelle 2-4: Ergebnisse der Bemessung des erforderlichen Belebungsvolumens nach HSG	14
Tabelle 2-5: Dimensionierung der Membranfiltration	16
Tabelle 2-6: Wassermengen für 7.000 angeschlossene Einwohner	17
Tabelle 2-7: Energieverbrauch der Modellanlage bezogen auf die Einwohner	31
Tabelle 4-1: Allgemeine Kenndaten der Kläranlage Konzen	39
Tabelle 4-2: Überwachungs- und Ablaufwerte der Kläranlage Konzen	39
Tabelle 4-3: Einwohnerwerte über die Parameter CSB, N _{ges} , NH ₄ -N und P	40
Tabelle 4-4: Einwohnerwerte über den Schlammanfall	41
Tabelle 4-5: Objektdaten der Kläranlage Konzen	45
Tabelle 4-6: Anlagendaten der Kläranlage Konzen	46
Tabelle 4-7: Energieverbrauch der KA Konzen von 2007 bis 2008	47
Tabelle 4-8: Energieverbrauchskosten der KA Konzen von 2007 bis 2008	48
Tabelle 5-1: Vergleich des Energieverbrauchs der Membranstufe	56
Tabelle 5-2: Energieverbrauch bezogen auf Einwohner	57
Tabelle 5-3: Spezifischer Energieverbrauch und Vergleichswerte nach MUNLV für konventionelle Kläranlagen für das Klärwerk Konzen	58
Tabelle 5-4: Verfahrensstufen mit erhöhtem Energiebedarf nach MUNLV	59
Tabelle 5-5: Membranspezifische Verfahrensstufen mit erhöhtem Energiebedarf	59
Tabelle 6-1: Laufzeiten und Energieverbrauch der CF-Gebläse und Permeatpumpen	65
Tabelle 6-2: Pumpenlaufzeiten bei unterschiedlichen Flussraten	69
Tabelle 6-3: Betriebsstunden bei hohem Fluss	69
Tabelle 6-4: Gesamtübersicht Maßnahmen Konzen	71
Tabelle 7-1: Energiebilanz Konzen	71
Tabelle 7-2: Energieverbrauchskosten nach MUNLV, Konzen	73
Tabelle 7-3: Wirtschaftlichkeit nach MUNLV, Konzen	74
Tabelle 8-1: Überblick Energienachweis, Konzen	75
Tabelle 8-2: Vergleich des Energieverbrauchs bezogen auf die jährliche Mischwassermenge	75

Tabelle 9-1: Allgemeine Kenndaten des Klärwerks Woffelsbach	79
Tabelle 9-2: Überwachungs- und Ablaufwerte des Klärwerks Woffelsbach	79
Tabelle 9-3: Ermittlung der Einwohnerwerte über CSB, Nges, NH4 und P	80
Tabelle 9-4: Allgemeine Objektdaten der Kläranlage Woffelsbach	84
Tabelle 9-5: Anlagendaten der Kläranlage Woffelsbach	85
Tabelle 9-6: Energieverbrauch der KA Woffelsbach im Jahr 2007	86
Tabelle 9-7: Energieverbrauchskosten der KA Woffelsbach im Jahr 2007	87
Tabelle 10-1: Gegenüberstellung Gesamtenergieverbrauch Klärwerk Woffelsbach und verschiedene Modellanlagen	95
Tabelle 10-2: Spezifischer Energieverbrauch und Vergleichswerte nach MUNLV (für konventionelle Anlagen für das Klärwerk Woffelsbach)	96
Tabelle 10-3: Verfahrensstufen mit erhöhtem Energieverbrauch	97
Tabelle 10-4: Erhöhte membranspezifische Verfahrensstufen	98
Tabelle 10-5: Verbrauch einzelner Sandfangkomponenten „IST“	99
Tabelle 10-6: Verbrauch einzelner Sandfangkomponenten „NEU“	99
Tabelle 11-1: Leistungsaufnahme der Gebläse bei aktueller Regelung	103
Tabelle 11-2: Leistungsaufnahme der Gebläse bei neuer Regelung	104
Tabelle 11-3: Optimierte Regelung (Daten über 18h für 3 charakteristische Tage)	105
Tabelle 11-4: Optimierte Laufzeiten der Rezirkulationspumpen	106
Tabelle 11-5: Lufteintrag abh. von den Schaltstufen	107
Tabelle 11-6: Gesamtübersicht Maßnahmen Woffelsbach	109
Tabelle 12-1: Energiebilanz KA Woffelsbach nach MUNLV	110
Tabelle 12-2: Tabelle Energieverbrauchskosten nach MUNLV, Woffelsbach	111
Tabelle 12-3: Wirtschaftlichkeit nach MUNLV, Woffelsbach	112
Tabelle 13-1: Überblick Energienachweis, Woffelsbach	113
Tabelle 13-2: spezifischer Verbrauch nach Umsetzung der Maßnahmen	114

18.2 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2-1: Vergleich der Energieverbräuche unterschiedlicher Modellanlagen	27
Abbildung 2-2: Gegenüberstellung Gesamtverbrauch Modellanlage und Modellanlage Krause.	31
Abbildung 2-3: Vergleich Modellanlage TW-MW	32
Abbildung 2-4: Vergleich des Energieverbrauchs der Modellanlage bei verschiedenen Flussraten	33
Abbildung 3-1: Beispielhafte Darstellung der Verbraucherliste	34
Abbildung 4-1: Jahresgang der täglichen Abwassermenge im Zulauf der KA	38
Abbildung 4-2: Monatlicher Strombezug der KA Konzen	47
Abbildung 4-3: Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs im Ist-Zustand	49
Abbildung 4-4: Verteilung des Strombedarfs der mechanischen Stufe inkl. Hebewerke	49
Abbildung 4-5: Verteilung des Strombedarfs der biologischen Stufe	50
Abbildung 4-6: Verteilung des Strombedarfs der Membranstufe	51
Abbildung 4-7: Verteilung des Strombedarfs der Aggregate der Infrastruktur	52
Abbildung 4-8: Verteilung des Strombedarfs der Betriebsmittel	52
Abbildung 4-9: Verteilung des Strombedarfs auf die Hauptverbrauchergruppen	53
Abbildung 5-1: spezifischer Energiebedarf in Konzen	54
Abbildung 5-2: Gegenüberstellung Gesamtenergieverbrauch KA Konzen und verschiedene Modellanlagen	55
Abbildung 5-3: O ₂ Eintrag im Belebungsbecken Straße 1 Konzen	62
Abbildung 6-1: Summenhäufigkeit KA Konzen	66
Abbildung 6-2: Darstellung der Filtrationszyklen	66
Abbildung 7-1: Grafische Darstellung der Energiebilanz nach MUNLV	72
Abbildung 7-2: Energiekosteneinsparung nach MUNLV, Konzen	73
Abbildung 7-3: Grafische Darstellung der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmenpakete nach MUNLV, Konzen	74
Abbildung 8-1: Vergleich Energieverbrauch Konzen und Modellanlage vor und nach Umsetzung der Maßnahmen	76
Abbildung 9-1: Jahresgang der täglichen Abwassermengen im Zulauf des Klärwerks	78
Abbildung 9-2: CSB-Zulauffrachten der KA Woffelbach	80
Abbildung 9-3: Monatlicher Strombezug der KA Woffelsbach	86
Abbildung 9-4: Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs im Ist-Zustand	88
Abbildung 9-5: Verteilung des Strombedarfs der mechanischen Stufe inkl. Hebewerke	88
Abbildung 9-6: Verteilung des Strombedarfs der biologischen Stufe	89

Abbildung 9-7: Verteilung des Strombedarfs der Membranstufe	90
Abbildung 9-8: Verteilung des Strombedarfs der Aggregate der Infrastruktur	91
Abbildung 9-9: Verteilung des Strombedarfs der Abluft	91
Abbildung 9-10: Verteilung des Strombedarfs der Betriebsmittel	92
Abbildung 9-11: Verteilung des Strombedarfs auf die Hauptverbrauchergruppen	93
Abbildung 10-1: spez Energiebedarf bezogen auf Zulauf	94
Abbildung 10-2: Gegenüberstellung Gesamtenergieverbrauch Klärwerk Woffelsbach und verschiedene Modellanlagen	95
Abbildung 11-1: Häufigkeitsverteilung Woffelsbach	103
Abbildung 11-2: Neuregelung der Gebläse	104
Abbildung 12-1: Grafische Darstellung der Energiebilanz nach MUNLV, Woffelsbach	110
Abbildung 12-2: Graphische Darstellung der Energiekosteneinsparungen nach MUNLV, Woffelsbach	111
Abbildung 12-3: Grafische Darstellung der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmenpakete nach MUNLV, Woffelsbach	112
Abbildung 13-1: Vergleich Energieverbrauch Woffelsbach und Modellanlage vor und nach Umsetzung der Maßnahmen	114
Abbildung 13-2: Vergleich Energieverbrauch Woffelsbach und Modellanlage vor und nach Umsetzung der Maßnahmen, ohne Betrachtung des PW Rurberg	115
Abbildung 14-1: Temperaturverlauf in der Belebung Woffelsbach	117
Abbildung 14-2: Verlauf von Temperatur und TS-Gehalt in der Belebung Woffelsbach	118