

# Leistungsvergleich zweier Aggregate zur Druckluftherzeugung im großtechnischen Parallelbetrieb

Abwasserbehandlung, Abwasserreinigung, Energieanalyse, Energieoptimierung, Belüftungssysteme, Drehkolbengebläse, Drehkolbenverdichter

Ralf Hasselbach, Joachim Dettmar, Tina Vollerthun und Stefanie Leick

*Auf der Kläranlage Illingen-Wustweiler wurden mehrere Maßnahmen zur energetischen Optimierung durchgeführt. Insbesondere wurden zwei Drehkolbengebläse durch neuartige Drehkolbenverdichter ersetzt. Beim Parallelbetrieb beider Aggregatetypen konnte aufgezeigt werden, dass der Energieverbrauch des Drehkolbenverdichters um 22 % geringer ist als der des herkömmlichen Drehkolbengebläses. Zusammen mit den übrigen Maßnahmen, wie neue Sauerstoffeintragsregelung, Umbau der Luftverteilungen, Installation einer Luftwärmepumpe, hat der Austausch der Aggregate dazu geführt, dass der einwohnerwertpezifische Stromverbrauch der Kläranlage nun sogar unter dem im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ des Landes Nordrhein-Westfalen [5] angegebenen Idealwert liegt. Dies wurde durch eine Energieanalyse nachgewiesen.*

## Benchmarking Test of Two Compressed Air Generators in Large Scale Parallel Operation

*The wastewater treatment plant Illingen-Wustweiler was subject to several measures of energetic optimization. The most important of these was the replacement of two rotary piston fans by new rotary piston compressors. A test during which both types of aggregates were run in parallel showed that the energy consumption of the rotary piston compressor is 22 % lower than that of the conventional rotary piston fan. In combination with the other measures, as new control system for oxygen transfer, conversion of air distribution mains, installation of an air heat pump, the exchange of the aggregates made the specific electric energy consumption of the wastewater treatment plant fall below the ideal value given by the manual “Energie in Kläranlagen” of the German federal state North Rhine-Westphalia [5]. An energy analysis gave evidence of this fact.*

## 1. Einleitung

Seit vielen Jahren gehören die Energieanalyse und die Energieoptimierung von Kläranlagen zu den Schwerpunktthemen der Abwasserfachwelt [1]. Spätestens seit dem Beginn der sogenannten Energiewende im Jahr 2011 sind Energiesparmaßnahmen nicht nur ein ökonomisches sondern auch ein ökologisches Gebot. Kläranlagen gehören mit einem Anteil von rund 20 % zu den größten kommunalen Stromverbrauchern [2], sodass die stetig steigenden Energiepreise einen großen Einfluss auf die Kosten der Abwasserreinigung und damit auf die Abwassergebühren haben. Hinsichtlich des Umweltschutzes verursacht der jährliche Stromverbrauch der deutschen Kläranlagen einen Ausstoß von rund 2,36 Mio. Megagramm [3] des Klimagases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>-Äquivalente), der sich ohne große zusätzliche Investitionen, beispielsweise durch eine energiesparendere Belüftung der Belebungsbecken, merklich reduzieren lässt [2]. Denn es ist bekannt, dass die biologische

Reinigungsstufe den größten Anteil am Stromverbrauch einer Kläranlage hat, insbesondere die Belüftung. Wirksame Maßnahmen zur Energieoptimierung sollten dort ansetzen, wo der Energieverbrauch und das Einsparpotenzial am größten sind.

Der Entsorgungsverband Saar (EVS) betreibt als sondergesetzlicher Zweckverband der saarländischen Städte und Gemeinden 137 kommunale Kläranlagen und drei Sickerwasserkläranlagen. Der EVS hat in den letzten Jahren verschiedene Maßnahmen zur energetischen Optimierung auf der Kläranlage Wustweiler (**Bild 1**) vorgenommen.

Im Mittelpunkt der Optimierung steht das Belüftungssystem. Eine Analyse der Wirksamkeit der vorgenommenen Maßnahmen, über die nachfolgend berichtet wird, stand bisher noch aus.

## 2. Grundlagen der Druckbelüftung

Bei Druckbelüftungssystemen erfolgt der Sauerstoffübergang durch die im Wasser aufsteigenden Luftblasen.

Wie viel Sauerstoff übertragen wird, ist von verschiedenen Einflussfaktoren, wie z.B. der Blasengröße, der Einblastiefe, der Abwassertemperatur oder den Abwasserinhaltsstoffen, abhängig [7]. Die in das Belebungsbecken über Rohrleitungen und Belüfterelemente eingetragene Druckluft wird mittels Kompressoren, wie z.B. Drehkolbengebläse, Drehkolben-, Schrauben- oder Turboverdichter, erzeugt. Der jeweilige Einsatz der unterschiedlichen Druckluftherzeuger ist vornehmlich von der vorhandenen Einblastiefe und dem erforderlichen Luftvolumenstrom abhängig.

Beim Drehkolbengebläse, Drehkolben- und Schraubenverdichter wird die Luft durch unterschiedlich geformte Rotoren (Kolbenwellen) verdichtet, siehe **Bild 2**. Die Geräte arbeiten nach dem Verdrängungsprinzip und gehören zur Gruppe der zweiwelligen Rotationsverdichter. Durch eine gegenläufige Drehung der Rotoren wird der Luftstrom von der Saug- zur Druckseite sowie quer und/oder parallel durch das den Rotoren umgebende Gehäuse transportiert und verdichtet. Es erfolgt eine äußere und/oder innere Verdichtung.

Bei Drehkolbengebläsen sind die Rotoren geradlinig geformt. Durch die äußere Verdichtung können Druckdifferenzen von höchstens einem Bar erreicht werden. Daher spricht man hier von einem Gebläse [9]. Beim Schraubenverdichter besitzen die Rotoren eine Schraubenform und erzeugen zusätzlich eine innere Verdichtung, da die Verdichtungsräume verkleinert werden. Der Betrieb von Schraubenverdichtern ist energetisch günstiger als der von Drehkolbengebläsen [10,11]. Bei geringen Druckdifferenzen sind Drehkolbengebläse aufgrund der geringen Anschaffungskosten i.d.R. die wirtschaftlichere Variante [10]. Da Schraubenverdichter erst bei größeren Luftvolumenströmen und hohen Druckdifferenzen zum Einsatz kommen, haben sie sich in der Abwassertechnik bisher nicht durchgesetzt [11].

Der Drehkolbenverdichter ist eine Neuentwicklung der vergangenen Jahre. Mithilfe leicht schraubenförmig gedrehter Rotoren verknüpft er die Vorteile aus Drehkolbengebläse und Schraubenverdichter. Dadurch soll die Verdichtung erhöht, eine Druckdifferenz von bis zu 1,5 bar erzeugt und ein Einsatz bei größeren Einblastiefen wirtschaftlich werden [7]. Nach Herstellerangaben soll der Drehkolbenverdichter bei höherer Sauerstoffeintragsleistung weniger elektrische Energie verbrauchen als herkömmliche Drehkolbengebläse [8].

Da der druckspezifische Energieverbrauch von Schraubenkompressoren bei konstantem Luftvolumenstrom mit zunehmender Einblastiefe im Gegensatz zu Drehkolbengebläsen deutlich sinkt [12], ist davon auszugehen, dass Drehkolbenverdichter, die eine Verknüpfung aus beidem darstellen, in tiefen Becken größere energetische Vorteile aufweisen als in flachen Becken.



**Bild 1.** Biologische Reinigungsstufe der Kläranlage Wustweiler, Aufnahme vom Schlammstapelbehälter, Foto: EVS 2009 [4].



**Bild 2.** Beispiele von Modellen der Rotoren bei einem Drehkolbengebläse (links), Drehkolbenverdichter (Mitte) und Schraubenverdichter (rechts) [8].

### 3. Energieoptimierung der Kläranlage Wustweiler

#### 3.1 Merkmale der Kläranlage

Die Kläranlage Wustweiler im Saarland ist für eine Anschlussgröße von  $EW = 41\ 000$  E konzipiert. Die mit einer simultanen aeroben Schlammstabilisierung ausgerüstete Anlage wurde im Herbst 2000 vom Entsorgungsverband Saar in Betrieb genommen. Die Kläranlage liegt an einem Standort im Tal der Ill mit einem sehr begrenzten Flächenangebot. Der schematische Lageplan in **Bild 3** verdeutlicht die wesentlichen Komponenten der Abwasserreinigungs- und Schlammbehandlungsstufen der Kläranlage. Die zweistraßige mechanische Reinigungsstufe der Kläranlage besteht aus einem Grobrechen (1), einem Pumpwerk mit einer Förderhöhe von 10 m (3), einem Feinrechen (3) und einem belüfteten Langsandfang (4).

Die biologische Reinigungsstufe ist ebenfalls zweistraßig und besteht aus zwei runden Kombibecken mit außenliegenden Belebungsbecken (6) und innenliegenden, vertikal durchströmten Nachklärbecken (7).

Die Besonderheit der biologischen Reinigungsstufe ist ihre kompakte und platzsparende Konstruktion. Zur Bereitstellung des erforderlichen Behandlungsvolumens von  $2 \times 7250$  m<sup>3</sup> besitzt das Belebungsbecken eine maximale Tiefe von 9,03 m. Somit sind die Belüftungs-



**Bild 3.** Schematischer Lageplan der Kläranlage Wustweiler (EVS, 2009 [4], modifiziert).

einrichtungen für eine relativ hohe Druckdifferenz von mindestens 1 bar auszulegen. Das bei der Inbetriebnahme installierte Belüftungssystem setzt sich aus zwei Drehkolbengebläsen zur Druckluftherzeugung, einer sogenannten „Poolleitung“ für den Transport der erzeugten Druckluft und Plattenbelüftern für die Verteilung der Druckluft in den beiden Belebungsbecken zusammen.

### 3.2 Vorgenommene Maßnahmen zur Optimierung des Belüftungssystems

In den Jahren 2010 und 2011 wurden aufgrund des hohen Stromverbrauches von über 1500 MWh/a (Stand 2008) mehrere Maßnahmen zur energetischen Optimierung der Kläranlage Wustweiler vorgenommen. Im Einzelnen sind es die folgenden Maßnahmen:

- Installation einer neuen Sauerstoffeintragsregelung,
- Austausch der Drehkolbengebläse gegen Drehkolbenverdichter sowie
- Umbau der Luftverteilungen.

Zudem wurde ein im Bereich der Druckluftherzeugung bis 2011 betriebener Luftwärmetauscher aus energetischen Gründen gegen eine Raumluftwärmepumpe ausgetauscht. Diese Maßnahme wird nachfolgend nicht weiter betrachtet, da sie für die Optimierung des Belüftungssystems unerheblich ist.

#### 3.2.1 Installation einer neuen Sauerstoffeintragsregelung

Ziel der Installation einer neuen Sauerstoffeintragsregelung ist die energetische Optimierung der inter-

mittierenden Belüftung, ohne dass es zu negativen Einflüssen auf die Reinigungsleistung kommt. Als Grundlage der neuen Regelung wurden zu den bereits vorhandenen zwei Sauerstoffsonden je eine Redoxsonde pro Becken angeordnet. Die neue Regelung des Sauerstoffeintrags stellt sicher, dass nicht mehr Luft in die Belebungsbecken eingetragen wird als das Reinigungsziel erfordert.

Vor der Umstellung gab es feste Zeitintervalle für belüftete und unbelüftete Phasen, die Belüftungsintensität wurde über  $O_2$ -Sollwerte geregelt. Heute erfolgt die Phaseneinteilung durch eine Zustandserkennung (Nitrifikation/Denitrifikation) basierend auf dem gemessenen Redoxpotenzial in Verbindung mit einer Regelung der Belüftungsintensität in der Nitrifikationsphase über  $O_2$ -Sonden.

#### 3.2.2 Austausch der Drehkolbengebläse gegen neuartige Drehkolbenverdichter

Eine wesentliche Optimierungsmaßnahme ist der Austausch von zwei der drei vorhandenen Drehkolbengebläse durch zwei neu entwickelte Drehkolbenverdichter im Jahr 2011. Ein Drehkolbengebläse dient weiterhin als Reserve und kann beiden Becken zugeordnet werden.

Da Drehkolbengebläse nur bei einer Druckdifferenz von maximal 1 bar erfolgreich betrieben werden können, führte deren Betrieb bei dem grenzwertigen Einsatzbereich mit einer Einblastiefe von über neun Metern zu einer verschleißintensiven Beanspruchung und einem ungünstigen Wirkungsgrad der Aggregate.

#### 3.2.3 Umbau der Luftverteilungen

Die Belüftung erfolgte ursprünglich über eine gemeinsame Poolleitung mithilfe von Blendenregulierschiebern und den damit verbundenen relativ hohen Druckverlusten. Um diese Energieverluste zu minimieren, erfolgte ein Umbau der Poolleitung in eine direkte (getrennte) Zuordnung eines Drehkolbenverdichters zu einem Belebungsbecken.

### 3.3 Großtechnischer Versuch und Energieanalyse

Zur Überprüfung der Wirksamkeit der vorgenommenen Optimierungsmaßnahmen wurden im Jahr 2013 ein großtechnischer Versuch auf der Kläranlage Wustweiler und eine Energieanalyse der Kläranlage durchgeführt.

Zunächst erfolgte ein Parallelbetrieb mit herkömmlichem Drehkolbengebläse und neuartigem Drehkolbenverdichter. Zur Bewertung der gesamten Kläranlage Wustweiler wurde eine Energieanalyse nach der Methode des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen [5] vorgenommen. Eine Gegenüberstellung gemessener Ablaufkonzentrationen wesentlicher Abwasserparameter dient der Analyse der Reinigungsleistung.

### 3.3.1 Parallelbetrieb von Drehkolbengebläse und Drehkolbenverdichter

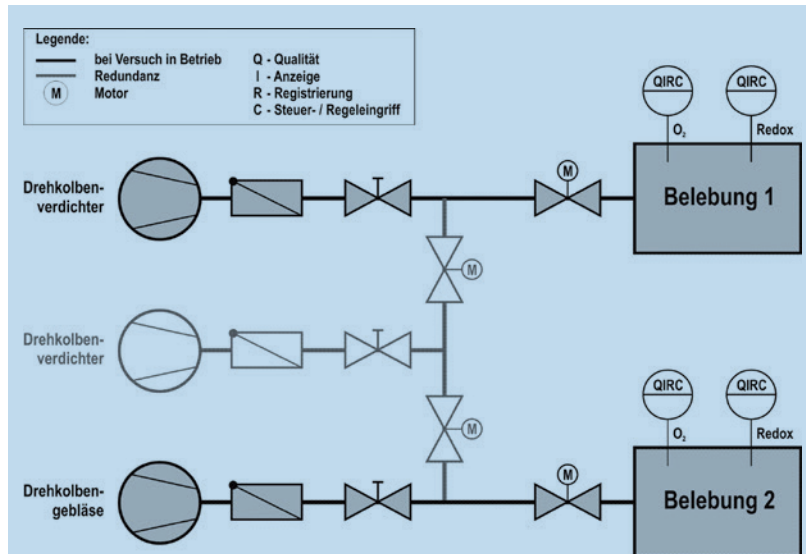
Zur Durchführung des großtechnischen Versuchs wurde auf der Kläranlage Wustweiler unter gleichen Randbedingungen hinsichtlich Beschickung, Sauerstoffeintragsregelung und Druckverlusten in den Luftverteilungen eines der beiden baugleichen Belebungsbecken mit dem Drehkolbengebläse und das andere mit einem Drehkolbenverdichter über einen Zeitraum von fast sieben Wochen (47 Tage) parallel betrieben. **Bild 4** zeigt wesentliche Elemente der Belüftung für den Parallelbetrieb in einem R&I-Schema.

Beide Belebungsbecken sind baugleich. Sie werden von einem symmetrischen Verteilerbauwerk über gleich lange und gleich hohe Wehrschwellen mit annähernd gleich großen Rücklaufschlammvolumina beschickt (im Untersuchungszeitraum: 7090 m<sup>3</sup> bzw. 7099 m<sup>3</sup>). Zudem schwanken die Trockensubstanzkonzentrationen in den Becken zwischen 4,1 und 4,3 g/l nur sehr gering. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die hydraulischen und stofflichen Belastungen beider Becken nahezu identisch sind.

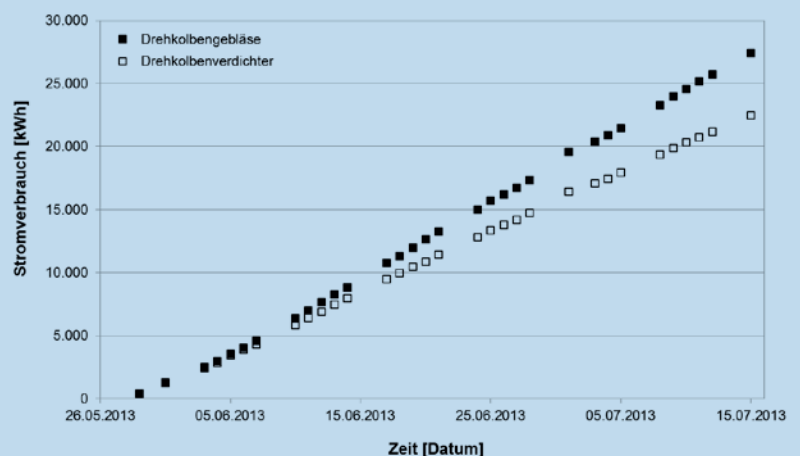
Im Untersuchungszeitraum vom 29.5. bis 15.7.2013 wurden die für den Betrieb der Aggregate benötigten Strommengen und die jeweiligen Laufzeiten registriert. In **Bild 5** ist der kumulierte Stromverbrauch und in **Bild 6** die kumulierte Laufzeit von Drehkolbengebläse und Drehkolbenverdichter für den Untersuchungszeitraum gegenübergestellt.

Die kumulierten Werte zeigen, dass der Drehkolbenverdichter gegenüber dem Drehkolbengebläse im Untersuchungszeitraum einen über 4900 kWh geringeren Stromverbrauch (**Bild 5**) und eine um rund zehn Stunden höhere Betriebslaufzeit (**Bild 6**) hatte. Bezogen auf die Stromverbrauchssumme des Drehkolbenverdichters ist das eine Reduzierung von rund 22%. Da während des Parallelbetriebs sehr unterschiedliche Zulaufbelastungen auftraten, können die prozentuale Reduzierung des Stromverbrauchs und die täglichen Laufzeiten mit guter Näherung auf ein gesamtes Betriebsjahr übertragen werden. Bei einer jährlichen Laufzeit von 2810 Stunden beim Drehkolbengebläse und 2887 Stunden beim Drehkolbenverdichter verringert sich der jährliche Stromverbrauch pro Becken bzw. Aggregat um rund 37 420 kWh und insgesamt um rund 74 840 kWh. Das bedeutet eine einwohnerwertspezifische Reduzierung von rund 1,57 kWh/(E-a). Bei einem Strompreis von 17,59 ct/kWh (Stand 2012) entspricht das einer jährlichen Kostenersparnis von über 13 100 €. Damit ist der Erfolg des Austauschs der Aggregate hinsichtlich eines signifikant geringeren Stromverbrauches operativ nachgewiesen.

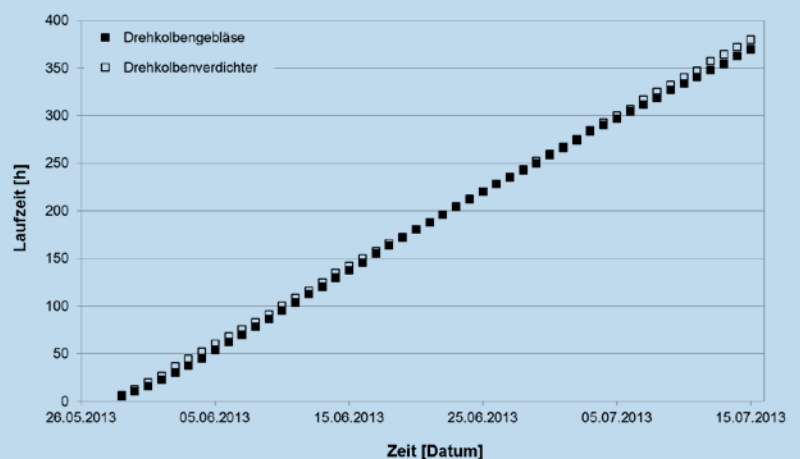
Für eine abschließende wirtschaftliche Bewertung sind die Investitions-, Betriebs-, Instandhaltungs- und Reinvestitionskosten zu bestimmen. Die Investitionskosten für die Drehkolbenverdichter liegen bei rund 48 000 €.



**Bild 4.** R&I-Schema der Belüftung bei der Versuchsdurchführung.



**Bild 5.** Kumulierter Stromverbrauch von Drehkolbengebläse und Drehkolbenverdichter während des Parallelbetriebs vom 29.05.–15.07.2013, Daten aus [13] entnommen.



**Bild 6.** Kumulierte Laufzeit von Drehkolbengebläse und Drehkolbenverdichter während des Parallelbetriebs vom 29.05.–15.07.2013, Daten aus [13] entnommen.

Auf der Kläranlage Wustweiler konnten mit dem Einsatz von Drehkolbengebläse über 12 Jahre und mit dem Einsatz der neuartigen Drehkolbenverdichter über zwei Jahre Betriebserfahrungen gewonnen werden. Ein fundierter Vergleich von Instandhaltungsmaßnahmen und Standzeiten ist aufgrund der unterschiedlichen Betriebsdauern nicht möglich.

### 3.3.2 Ergebnisse der Energieanalyse der Kläranlage Wustweiler

Die Energieanalyse der Kläranlage Wustweiler wurde mit der Methode des Energiehandbuchs Nordrhein-Westfalen [5], die die Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs bezogen auf den Einwohnerwert fordert, vorgenommen. Grundlage der Analyse sind die Betriebsdaten des Jahres 2012, die nach Abschluss der zuvor beschriebenen energetischen Optimierungsmaßnahmen erfasst wurden.

Aus den vornehmlich wöchentlich bestimmten Konzentrationen des biochemischen Sauerstoffbedarfs in fünf Tagen ( $BSB_5$ ) im Kläranlagenzulauf wurde ein Einwohnerwert von  $EW = 47\,763\text{ E}$  ermittelt. Da diese Einwohnerwertermittlung aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist, wurden zusätzlich noch die vorliegenden Analysewerte des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) herangezogen, die arbeitstäglich bestimmt werden. Der auf Grundlage der CSB-Konzentrationen im Kläranlagenzulauf ermittelte Einwohnerwert beträgt  $EW = 44\,429\text{ E}$ . Das Konzentrationsverhältnis der Parameter  $BSB_5$  und CSB ist größer als 1:2 und für das ländlich geprägte Einzugsgebiet mit geringem gewerblich-industriellem Schmutzwasseranfall plausibel.

Der spezifische Energieverbrauch der Kläranlage lässt sich auf Grundlage des Gesamtenergieverbrauches von 1268 MWh zu  $26,5\text{ kWh}/(E_{BSB_5}\cdot a)$  bzw.  $28,5\text{ kWh}/(E_{CSB}\cdot a)$  bestimmen. Zur Bewertung der energetischen Situation sind in **Tabelle 1** die wesentlichen Betriebsdaten den Richt- und Idealwerten des NRW-Energiehandbuchs [5] gegenübergestellt.

Richt- und Idealwerte des NRW-Energiehandbuchs [5] beinhalten keine energetischen Aufwendungen für ein Zulaufpumpwerk, so wie es beispielweise auf der Kläranlage Wustweiler betrieben wird. Der Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage berücksichtigt jedoch den Stromverbrauch des Zulaufpumpwerks. Demzufolge dürfen gemäß NRW-Energiehandbuch [5] Richt- und Idealwert mit einem Zuschlag für das Hebewerk von  $0,5\text{ kWh}/(E\cdot a)$  pro Höhenmeter versehen werden. Bei einer Förderhöhe von 10 m dürfen Richt- und Idealwert der Kläranlage Wustweiler somit um je  $5\text{ kWh}/(E\cdot a)$  erhöht werden.

Der spezifische Energieverbrauch der Kläranlage Wustweiler liegt mit  $26,5$  bzw.  $28,5\text{ kWh}/(E\cdot a)$  deutlich unter dem Richtwert von  $40\text{ kWh}/(E\cdot a)$  und dem Idealwert von  $33\text{ kWh}/(E\cdot a)$  für Kläranlagen einer Anschlussgröße von 30000 bis 100000 E mit einer vergleichsweise energiesparenden anaeroben Schlammbehandlungskonzeption. Das NRW-Energiehandbuch [5] berücksichtigt keine Kläranlagen der Anschlussgröße über 30000 E, die eine energieintensive simultane aerobe Schlammstabilisierung betreiben. Dennoch liegt der spezifische Energieverbrauch der Kläranlage Wustweiler hier ebenfalls unter dem Idealwert von Kläranlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung und einer Anschlussgröße bis 30000 E von  $31^{3)}$  bzw.  $36^{4)}$   $\text{kWh}/(E\cdot a)$ .

### 3.3.3 Prüfung der Reinigungsleistung

Zur Prüfung der Reinigungsleistung der Kläranlage Wustweiler wurden die gemessenen Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB,  $BSB_5$ , Ammonium- und Nitrat-Stickstoff ( $NH_4\text{-N}$ ,  $NO_3\text{-N}$ ) vor und nach der Durchführung der Optimierungsmaßnahmen in den Jahren 2009 und 2010 sowie im Jahr 2012 jeweils als Mittel- und 85-Perzentil-Werte in **Tabelle 2** gegenübergestellt. Grundlage der Datenauswertung sind Stichproben von mindestens 71 Messtagen pro Jahr.

Der Vergleich der Mittel- und 85-Perzentil-Werte der erfassten Messdaten zeigt, dass das Ziel einer weitgehenden Beibehaltung der bisherigen Reinigungsleistung erreicht wurde.

**Tabelle 1.** Betriebsdaten der Kläranlage Wustweiler aus dem Jahr 2012, Richt- und Idealwert des NRW-Energiehandbuchs [5].

| Kennwert   | Kläranlage Wustweiler | Richtwert nach [5]                  | Idealwert nach [5]                  |
|--|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Energieverbrauch in [MWh]                                  | 1268                  |                                     |                                     |
| Mittlere $BSB_5$ -Zulauffracht in [kg/d]                   | 2866                  |                                     |                                     |
| Mittlere CSB-Zulauffracht in [kg/d]                        | 5332                  |                                     |                                     |
| Bemessungsgröße in [E]                                     | 41 000                |                                     |                                     |
| Einwohnerwert bezogen auf $BSB_5$ in [E]                   | 47 763 <sup>1)</sup>  |                                     |                                     |
| Einwohnerwert bezogen auf CSB in [E]                       | 44 429 <sup>2)</sup>  |                                     |                                     |
| Spezifischer Energieverbrauch in $[\text{kWh}/(E\cdot a)]$ | 26,5 <sup>1)</sup>    | 35 <sup>3)</sup> / 40 <sup>4)</sup> | 28 <sup>3)</sup> / 33 <sup>4)</sup> |
| Spezifischer Energieverbrauch in $[\text{kWh}/(E\cdot a)]$ | 28,5 <sup>2)</sup>    |                                     |                                     |

1) mittlere  $BSB_5$ -Zulauffracht; 2) mittlere CSB-Zulauffracht

3) Vergleichswert ohne Zulaufpumpwerk, 4) Vergleichswert mit Zulaufpumpwerk

### 3.4 Bewertung

Das gute Ergebnis der Energieanalyse der Kläranlage Wustweiler ist vornehmlich auf den sehr geringen spezifischen Stromverbrauch des Belüftungssystems der biologischen Stufe von 14,2 kWh/(E<sub>BSB<sub>5</sub></sub>·a) bzw. 15,3 kWh/(E<sub>CSB</sub>·a) zurückzuführen. Zudem liegt die betriebliche Schmutzbelastung über der Bemessungsgröße der Kläranlage. Das NRW-Energiehandbuch [5] gibt für Kläranlagen mit Anschlussgrößen zwischen 30 000 und 100 000 E und anaerober Schlammbehandlung einen Idealwert von 18 kWh/(E·a) vor. Dieser Idealwert wird deutlich unterschritten, obwohl hier aufgrund der simultanen aeroben Schlammstabilisierung ein zusätzlicher Energieaufwand erforderlich ist.

Die großen Einblastiefen der Belebungsbecken bewirken im Wesentlichen den geringen spezifischen Stromverbrauch des Belüftungssystems. Sie fordern zwar einen höheren Vordruck als geringere Einblastiefen, bieten aber eine höhere Gesamtsauerstoffausnutzung und geringere erforderliche Luftvolumenströme [14]. Laut Pöpel et al. [14] erreicht der Brutto-Sauerstofftrag gemessen in kg O<sub>2</sub>/kWh bei einer Einblastiefe von etwa 9,50 m sein Maximum.

Darüber hinaus zeigen auch die durchgeführten Optimierungsmaßnahmen positive Effekte beim Stromverbrauch (siehe Kapitel 3.2 und **Tabelle 2**). Die neue Sauerstoffeintragsregelung, der Austausch von Drehkolbengebläsen gegen Drehkolbenverdichter, der Umbau der Verteilleitungen und der Austausch des Luftwärmetauschers tragen zur Energiereduzierung bei. Die Gegenüberstellung der gemessenen Ablaufkonzentrationen der Parameter BSB<sub>5</sub>, CSB, NH<sub>4</sub>-N und NO<sub>3</sub>-N für den Kläranlagenbetrieb vor und nach der Durchführung der Optimierungsmaßnahmen, zeigt keine signifikante Veränderung der Reinigungsleistung. Nitrifikation und Denitrifikation liegen weiterhin stabil auf einem hohen Niveau.

## 4. Zusammenfassung und Fazit

Die saarländische Kläranlage Illingen-Wustweiler ist mit einer Bemessungsgröße von EW = 41 000 E und einer simultan aeroben Schlammstabilisierung konzipiert. Ihr besonderes Merkmal sind zwei parallel angeordnete Belebungsbecken mit Einblastiefen von über 9 Metern. Mit dem Ziel wirtschaftliche und ökologische Vorteile zu generieren und die Reinigungsleistung der Kläranlage

nicht negativ zu beeinflussen, wurden in den Jahren 2010 und 2011 mehrere Maßnahmen zur Optimierung des Belüftungssystems vorgenommen. Zur Verifizierung der Wirkung der Optimierungsmaßnahmen wurden ein großtechnischer Parallelbetrieb von zwei Aggregaten für die Druckluftherzeugung und eine Energieanalyse der Kläranlage nach der Methode des NRW-Energiehandbuchs [5] durchgeführt.

Im Einzelnen wurden eine neue Sauerstoffeintragsregelung entwickelt und installiert, vorhandene konventionelle Drehkolbengebläse durch neuartige Drehkolbenverdichter ersetzt, ein vorhandener Luftwärmetauscher gegen eine Raumluftwärmepumpe ausgetauscht und ein Umbau der Luftverteilleitungen vorgenommen.

Drehkolbengebläse und Drehkolbenverdichter wurden in einem großtechnischen Versuch auf der Kläranlage Wustweiler über fast sieben Wochen unter gleichen Randbedingungen parallel betrieben, um den energetischen Vorteil des neuen Aggregates zu quantifizieren. Die Versuchsergebnisse weisen für den Untersuchungszeitraum einen um 22% geringeren Stromverbrauch des Drehkolbenverdichters gegenüber dem Drehkolbengebläse aus.

Das Gesamtergebnis der Energieanalyse der Kläranlage Wustweiler liegt mit einem spezifischen Energieverbrauch von 28,5 kWh/(E·a) unter dem Idealwert des NRW-Energiehandbuchs [5] für Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung von 33 kWh/(E·a). Dieses Resultat ist bemerkenswert, da auf der Kläranlage Wustweiler eine energetisch ungünstige simultane aerobe Schlammstabilisierung betrieben wird.

Für den Sauerstoffeintrag in die Belebungsbecken liegen auf der Kläranlage Wustweiler energetisch nahezu optimale Bedingungen vor. Die sehr große Einblastiefe bietet eine höhere Sauerstoffausnutzung als kleine Einblastiefen. Zudem gewährleistet die neue Sauerstoffeintragsregelung, dass nicht mehr belüftet wird als das Reinigungsziel erfordert.

Die wirksamste Optimierungsmaßnahme ist der Austausch der beiden Drehkolbengebläse gegen zwei neuartige Drehkolbenverdichter. Die neuen Aggregate sind in Verbindung mit der großen Einblastiefe für den sehr geringen spezifischen Stromverbrauch des Belüftungssystems der biologischen Stufe von 14,2 kWh/(E<sub>BSB<sub>5</sub></sub>·a) bzw. 15,3 kWh/(E<sub>CSB</sub>·a) verantwortlich.

**Tabelle 2.** Gemessene Ablaufkonzentrationen ausgewählter Parameter beim Betrieb der alten (2009/2010) und neuen (ab 2012) Sauerstoffeintragsregelung.

| Zeitpunkt/-raum  | Parameter     | Ablaufkonzentrationen [mg/L] |                  |                    |                    |
|------------------|---------------|------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|
|                  |               | CSB                          | BSB <sub>5</sub> | NH <sub>4</sub> -N | NO <sub>3</sub> -N |
| vor Optimierung  | Mittelwert    | 15,9                         | 2,8              | 0,85               | 0,92               |
| 2009 und 2010    | 85. Perzentil | 18,8                         | 4,0              | 1,22               | 1,23               |
| nach Optimierung | Mittelwert    | 16,6                         | 2,7              | 0,60               | 0,99               |
| 2012             | 85. Perzentil | 19,0                         | 4,0              | 0,97               | 1,26               |

Eine wesentliche Voraussetzung für den fundierten Nachweis von Energieeinsparungen beim Einsatz neuer technischer Aggregate in einem großtechnischen Vergleich ist, dass alle Randbedingungen beim Betrieb der Geräte gleich sein müssen. Dies ist in der Praxis nicht immer vollständig zu gewährleisten, da die Belastungssituation einer Kläranlage insbesondere bei einem Einzugsgebiet mit Mischkanalisation ständig schwankt. Bisher gemachte Angaben zu Stromeinsparungen durch den Einsatz der noch nicht sehr lange am Markt verfügbaren Drehkolbenverdichter, wie z. B. in [15] und [16], sind nach Meinung der Autoren nur bedingt übertragbar.

### Literatur

- [1] *Dohmann, M. und Schröder, M.*: Energie in der Abwasserentsorgung – Rückschau und Ausblick. Korrespondenz Abwasser, Abfall 58 (2011) Nr. 6, S. 536–541.
- [2] *Fricke, K.*: Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Herausgeber: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2009.
- [3] DWA-A 216: Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, Entwurf 2013. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- [4] EVS: Kläranlage Illingen-Wustweiler. Informationsbroschüre des Entsorgungsverbandes Saar (EVS), Saarbrücken, 2009.
- [5] *Müller, E. A., Kobel, B., Pinnekamp, J. und Böcker, K.*: Handbuch – Energie in Kläranlagen. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 1999.
- [6] *Hasselbach, R.*: Energiekostenmanagement beim Entsorgungsverband Saar (EVS), Fachtagung des DWA-Landesverbands Hessen/Rheinland-Pfalz/Saarland „Optimierungspotenziale auf Kläranlagen“ am 01.10.2013 in Emmelshausen.
- [7] DWA-M 229: Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen – Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung. Ausgabe 05/2013. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- [8] *N.N.*: Modelle der Rotoren von Drehkolbengebläsen, Drehkolbenverdichtern und Schraubenverdichtern. Aertzner Maschinenfabrik GmbH, <https://www.aertzner.de/Produkte>, abgerufen am 16.04.2014.
- [9] *Ruppelt, E.*: Druckluft Handbuch, 4. Ausgabe, Vulkan-Verlag, Essen, 2003.
- [10] *Frey, W.*: Gebläse für Belebungsanlagen. Leobendorf, 2012.
- [11] *Surek, D.*: Rotierende Verdrängermaschinen (Pumpen, Verdichter und Vakuumpumpen) 2. Ausg. (W. Faragallah, & D. Surek, Hrsg.) Sulzbach: W. H. Faragallah, 2004.
- [12] *Wagner, M.R. and Pöpel, H.J.*: Influence of the diffuser submergence and density on oxygen transfer and aeration efficiency. Proceedings of the Water Environment Federation 69<sup>th</sup> Annual Conference & Exposition, Dallas, Texas, October 5–9, 1996, Volume 1, p. 437–448.
- [13] *Leick, S.*: Energieanalyse und -optimierung der Kläranlage Illingen-Wustweiler im Saarland. Masterarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Saarbrücken, 2013.
- [14] *Pöpel, H.J., Wagner, M. und Weidmann, F.*: Sauerstoffeintrag und -ertrag in tiefen Belebungsbecken – Theoretische Grundlagen und Versuchsergebnisse. gwf- Wasser|Abwasser 139 (1998) Nr. 4, S. 189–197.
- [15] *Barlmeyer, N.*: Der Umwelt zuliebe – Kläranlage Kaiserslautern spart durch Pioniertat 71 % elektrische Energie. Wasser Luft Boden 02/2012, S. 10–12.
- [16] *Brand, S.*: Über 70 Prozent weniger Stromverbrauch. Umwelt-Magazin 41 (2011) Nr. 12, S. 30–33.

Eingereicht: 30.05.2014  
 Korrektur: 11.09.2014  
 Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

### Autoren

Dr.-Ing. **Ralf Hasselbach**

E-Mail: [ralf.hasselbach@evs.de](mailto:ralf.hasselbach@evs.de) |  
 Entsorgungsverband Saar (EVS) |  
 Mainzer Straße 261 |  
 D-66121 Saarbrücken

Prof. Dr.-Ing. **Joachim Dettmar**

(Korrespondenz-Autor)  
 E-Mail: [joachim.dettmar@htwsaar.de](mailto:joachim.dettmar@htwsaar.de) |  
 Hochschule für Technik und  
 Wirtschaft des Saarlandes |  
 University of Applied Sciences |  
 Goebenstraße 40 |  
 D-66117 Saarbrücken

Dipl.-Ing. **Tina Vollerthun**

Entsorgungsverband Saar (EVS) |  
 Mainzer Straße 261 |  
 D-66121 Saarbrücken

M.Eng. **Stefanie Leick**

ENROTEC Holding GmbH & Co. KG |  
 Untere Bliesstraße 13-15 |  
 D-66538 Neunkirchen