

»Sonderdruck«

KA

Korrespondenz Abwasser · Abfall

4/15

www.dwa.de/KA

Grundwasser-
infiltration in un-
dichte Kanalnetze

Regenwasser-
bewirtschaftung

Bypassführung
von Mischwasser

Klärwerke als
Kraftwerke

Hydrothermale
Carbonisierung
von Klärschlamm



Foto: Tiefbauamt/Stadtentwässerung Stuttgart

Klärwerke als Kraftwerke der Zukunft

Bilanzierung am Beispiel des Hauptklärwerks Mühlhausen in Stuttgart

Lothar Krätzig-Ahlert und Derek Eisert (Köln)

Zusammenfassung

Das Hauptklärwerk Mühlhausen (HKW) in Stuttgart verfügt über alle technischen Anlagenteile, um die durch den Klärwerksprozess herausgefilterten organischen Brennstoffe durch Verbrennung zu verstromen. Die eingesetzte Technik ist im Wesentlichen auf dem neuesten Stand bzw. bedarf in Teilbereichen der Klärschlammverbrennung noch der Betriebsoptimierung. Damit ist die Stromproduktion des HKW an ihrem Optimum angelangt. Darüber hinaus sind noch Anstrengungen notwendig, um den Stromverbrauch weiterhin zu reduzieren. Die Stromautonomie des Klärwerks kann somit langfristig durch die Anwendung neuer Technik und die gewonnenen Erkenntnisse der letzten 50 Jahre Wirklichkeit werden.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, Klärschlamm, energetische Verwertung, Faulung, Biogas, Energieanalyse, Energiebilanz, DWA-A 216, Elektrizität, Optimierung

DOI: 10.3242/kae2015.04.004

Abstract

Wastewater Treatment Works as Power Station of the Future Producing a Balance Using the Example of the Mühlhausen Main Wastewater Treatment Works in Stuttgart

The Mühlhausen main wastewater treatment works (HKW) in Stuttgart possesses all technical system parts in order to convert into electricity the organic combustible materials filtered out by the wastewater treatment works process. The technology employed is essentially state-of-the-art or still requires operative optimisation in subareas of the sewage sludge incineration system. With this, the electricity generation of the HKW has reached is optimum. However, efforts are still required in order to reduce further the power consumption. The electrical autonomy of the wastewater treatment works can thus become reality in the long-term through the application of new technology and the findings gained over the last 50 years.

Key words: wastewater treatment, municipal, sewage sludge, energetic utilisation, digestion, biogas, energy analysis, energy balance, Standard DWA-A 216, electricity, optimisation

1 Einleitung

Nach dem Atomunfall in Fukushima im Jahr 2011 hat sich die Vorstellung der Energiepolitik in der Bundesrepublik Deutschland deutlich verändert. Die stromproduzierende und -verteilende Branche ist im Umbruch begriffen. Die Umstrukturierung der Stromherstellung erfolgt von den atom- und fossilgefeuerten Großkraftwerken hin zu kleineren, dezentralen, durch erneuerbare Energie betriebenen Kraftwerken. Dieser Wandel ist mit erheblichem Aufwand verbunden, wodurch der Strompreis zukünftig weiter steigen wird. Somit gewinnt Strom als wertvolles Wirtschaftsgut zunehmend an Bedeutung.

Es stellt sich die Frage, ob ein Klärwerk, das unter anderem Abwasser von mineralischen und organischen Belastungen befreit, mehr Strom produzieren kann, als es für seine Prozesse verbraucht, und damit als Kraftwerk Teil dieser Energiewende werden kann. Dies soll hier am Beispiel des Hauptklärwerkes Mühlhausen (HKW) der Landeshauptstadt Stuttgart dargestellt werden.

Diese Fragestellung ist für sich betrachtet nicht neu, wie auch die beispielhaft in Kapitel 5 unter [1] und [2] angeführten Literaturquellen zeigen. Neu ist in diesem Zusammenhang jedoch der heutige wirtschaftliche Druck, Strom zu moderaten Preisen zu produzieren, womit die Fragestellung an Aktualität gewinnt.

2 Der Klärwerksprozess

Der Brennstoff, den ein Kraftwerk benötigt, wird zum Beispiel bei Kohlekraftwerken durch Tage- oder Bergbau gewonnen. Jedes Kraftwerk verfügt weiterhin über eine Brennstoffaufbereitung. Beispielsweise wird bei fossil befeuerten Braun- und Steinkohlekraftwerken die Kohle fein zermahlen, um eine hohe Reaktionsoberfläche für die Verbrennung im Feuerraum zu schaffen. Anschließend wird über Staubbrenner der so aufbereitete Brennstoff in den Feuerraum zur Verbrennung eingeblasen.

Betrachtet man den Klärwerksprozess des HKW zunächst aus abwassertechnischer Sicht, so lässt sich das abwassertechnische Konzept gemäß Abbildung 1 darstellen.

Betrachtet man das HKW aus Sicht der Brennstoffgewinnung und -aufbereitung, so ergibt das Herausfiltern der organischen Masse als Brennstoff aus dem Abwasser folgende zwei wesentliche Verfahrensschritte:

1. Die Abwasserreinigung entspricht dem Schritt der Brennstoffgewinnung. Der Brennstoff wird dem Abwasser entnommen, das vom Brennstoff gereinigte Abwasser wird in die Vorflut abgegeben.
2. Die Schlammbehandlung entspricht dem Schritt der Brennstoffaufbereitung. Der ausgefaulte Klärschlamm als organi-

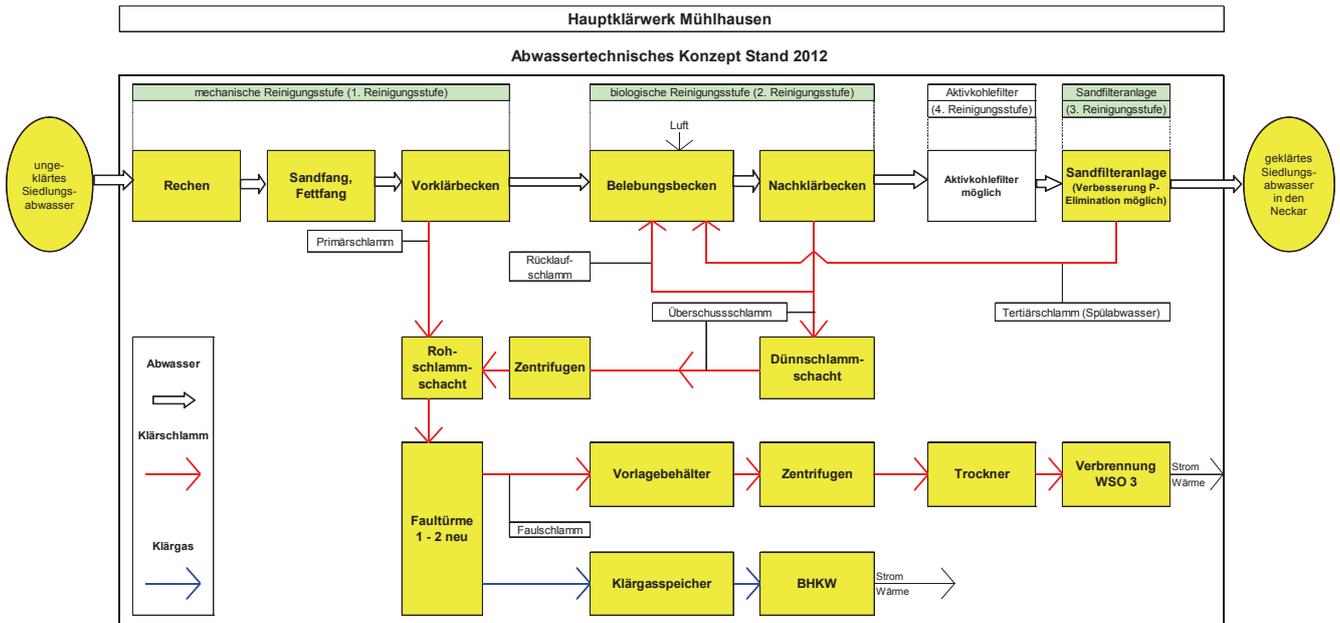


Abb. 1: Abwassertechnisches Konzept des HKW (Stand 2012)

sche Masse wird stabilisiert und als Brennstoff aufbereitet. Ein weiterer Teilschritt ergibt sich mit der Gewinnung des Klärgases beim Faulungsprozess des Klärschlammes.

3 Energiezufluss zum HKW

Das Abwasser, das dem HKW zufließt, beinhaltet drei Energiekomponenten:

- E₁: biochemische Energie
- E₂: Wärmeenergie
- E₃: kinetische Energie

Das in Abbildung 1 vorgestellte abwassertechnische Konzept ist vor diesem Hintergrund in Abbildung 2 als Bilanzgrenze HKW für die folgende theoretische Prognoserechnung überarbeitet dargestellt.

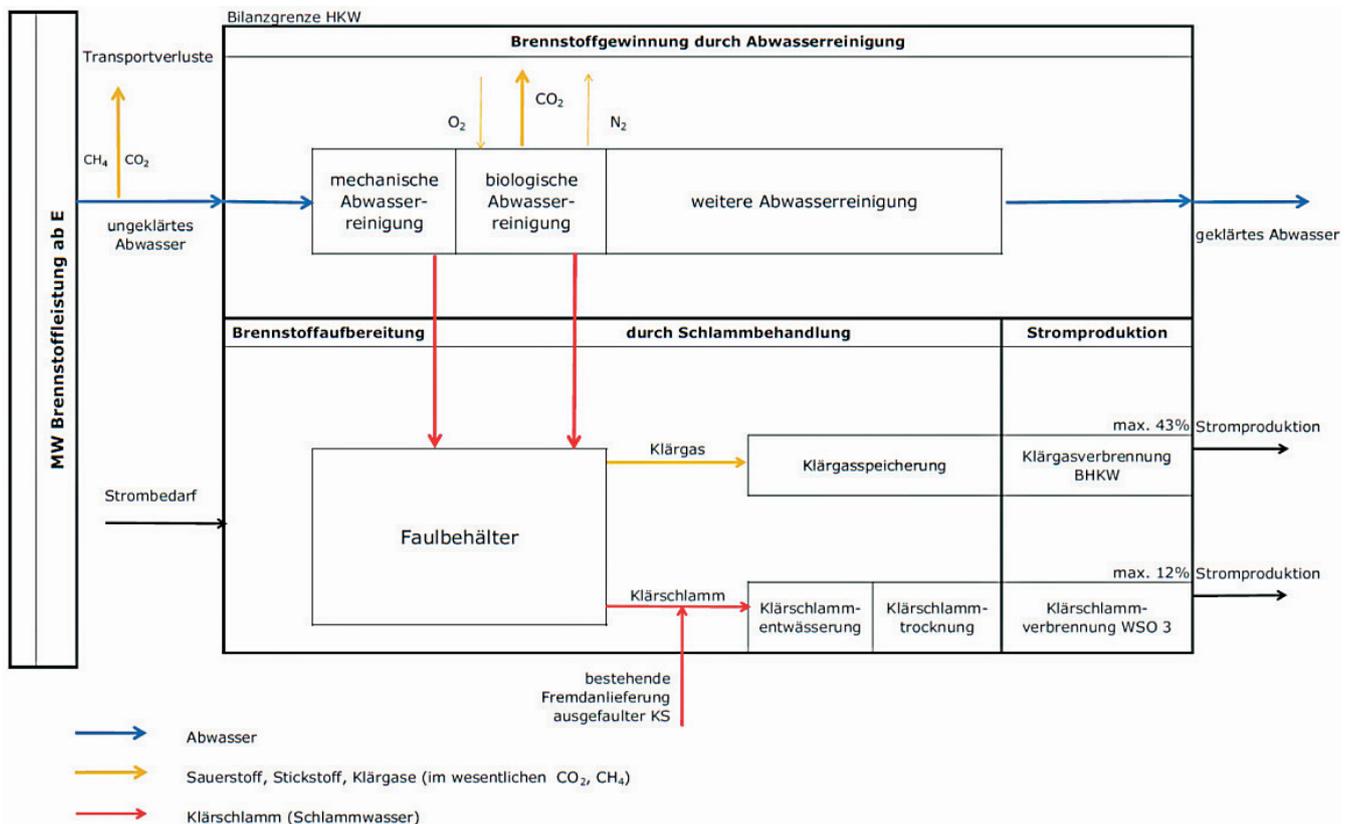


Abb. 2: Bilanzgrenze HKW

Für den durchschnittlichen Abwasserzufluss zum HKW ergeben sich damit für die drei Energiekomponenten folgende Eingangswerte:

$$\begin{aligned} V &= 2,1 \text{ m}^3/\text{s} \\ T_{\text{zu Winter}} &= 13 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{\text{Winter Vorflut Neckar}} &= 6 \text{ }^\circ\text{C} \\ V_{\text{zu}} &= 0,3 \text{ m/s} \\ V_{\text{ab}} &= 0,1 \text{ m/s (Verzögerung von 0,3 auf 0,1 m/s angenommen)} \end{aligned}$$

Energieinhalt = 175 kWh/(E · a) nach Pinnekamp [4]

Energieinhalt = 159 kWh/(E · a) nach Kroiss, zitiert in [3]

spezifischer Abwasseranfall = 0,22 m³/(d · E)

(Normierung des spezifischen Abwasseranfalles je Einwohner auf erhöhten Regen- und Fremdwasserzufluss)

Mit den genannten Eingangswerten lassen sich die drei Energiekomponenten wie folgt berechnen (Tabelle 1):

$$\begin{aligned} E_1 &= \text{biochemische Energie } E_1 \text{ ab Einwohner } E \\ &= \left(\frac{175+159}{2} \frac{\text{kWh}}{\text{E} \cdot \text{a}} \cdot 2,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \right) / \left(365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 0,22 \frac{\text{m}^3}{\text{d} \cdot \text{E}} \right) \\ &= 15723 \text{ kW} = 15,7 \text{ MW Brennstoffleistung als Mittelwert} \end{aligned}$$

In diesem Fall wird der Leistungswert in der Einheit kWh/(E · a) zur besseren Vergleichbarkeit auf die Einheit kW umgerechnet. Dazu werden der Zufluss und der spezifische Abwasseranfall je Einwohner verwendet.

$$\begin{aligned} E_2 &= \text{Wärmeenergie } E_2 \text{ im Winterhalbjahr} \\ &= m \cdot c_p \cdot \Delta T \\ &= 2,1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (13 - 6) \text{ K} \\ &= 61446 \text{ kW} \cong 61,4 \text{ MW thermisch} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_3 &= \text{kinetische Energie } E_3 \\ &= \frac{1}{2} m v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 2,1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left[(0,3^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}) - (0,1^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}) \right] \\ &= 84 \text{ kW} \cong 0,1 \text{ MW kinetisch} \end{aligned}$$

| Energiekomponente | Leistung [MW] | Anteil [%] |
|------------------------------|---------------|------------|
| E ₁ , biochemisch | 15,7 | 20,3 |
| E ₂ , thermisch | 61,4 | 79,5 |
| E ₃ , kinetisch | 0,1 | 0,1 |
| Summe | 77,2 | 100,0 |

Tabelle 1: Zusammenfassung der Energiekomponenten

Ungefähr 20 % der vom Abwasser gespeicherten Energie entfallen auf biochemische Anteile. Dieses Potenzial wird in dem vorliegenden Beitrag näher betrachtet.

Aus den Berechnungen wird das numerisch hohe Wärmepotenzial E₂ des Abwassers sichtbar. Es wurde hier für das Winterhalbjahr eine Abkühlung auf das Temperaturniveau des Neckars als Vorflut angesetzt. Das thermische Energiepotenzial wäre im HKW nicht verwertbar, da hier bereits genügend Abwärme aus den Verbrennungsprozessen E₁ zur Verfügung steht. Der Energieanteil E₂ könnte zum Beispiel durch Fernwärmeleitungen zu

nahegelegenen Wohngebieten zur Raumheizung transportiert werden. Damit der Energieanteil dazu nutzbar wird, müsste er mittels Wärmepumpe auf ein Niveau zur Raumheizung von ca. T_{Vorlauf} 30–55 °C angehoben werden. Dabei sind allerdings dann noch entsprechende Verluste zu berücksichtigen.

Die kinetische Energie E₃ ist vernachlässigbar.

4 Prognose der Strombilanz

Die in Tabelle 2 aufgeführte Energiebilanz als theoretische Prognoserechnung des HKW beruht im Wesentlichen auf der Bilanzierung, die im Schlussbericht des Forschungsvorhabens „Kläranlage der Zukunft“ [3], auf Seite 34 ff., aufgeführt ist.

Bei der Bilanzierung wird stets zwischen einem Best Case und einem Worst Case unterschieden. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen, werden alle klärwerksspezifischen Leistungswerte der Dimension kWh/(E × a) umgerechnet in Leistungswerte Brennstoff der Dimension MW_{Br} bzw. Stromproduktion MW_{el}.

Im Ergebnis lässt sich Folgendes feststellen:

Die Prognoserechnung (Tabelle 2) ergibt im Best Case eine Stromproduktion von ca. 2,7 MW_{el} aufgrund der Verwertung des biochemischen Energiepotenzials E₁. Wird noch Fremdschlamm, sprich Fremdenergie, hinzugerechnet, so lässt sich die Eigenerzeugung in der Größenordnung von ca. 3 MW_{el} annehmen.

Für den Stromverbrauch wird der aktuelle durchschnittliche Stromverbrauch, wie er sich aus dem 39. Leistungsvergleich der kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg für 2012 [5] für Kläranlagen der Größenklasse (GK) 5 ergibt, mit 33,6 kWh/E/a angesetzt. Damit liegt er bei ca. 3,2 MW_{el}. Bei dem genannten Durchschnittswert für die GK 5 muss allerdings berücksichtigt werden, dass nur wenige Kläranlagen in Baden-Württemberg mit einer Klärschlammverbrennung ausgestattet sind. Vor dem Hintergrund eventuell noch möglicher, weiterer Einsparpotenziale lässt sich das Ziel Stromautonomie durchaus postulieren.

4.1 Stromproduktion

Zur Verstromung des Faulgases werden zwei Blockheizkraftwerke (BHKW) mit einer jeweiligen Stromproduktion von ca. 0,8 MW_{el}, also insgesamt maximal 1,6 MW_{el}, eingesetzt. Die neuen Faulbehälter mit den beiden BHKW-Modulen wurden Mitte des Jahres 2012 in Betrieb genommen. Sollten sich die Faulgasmengen und -qualitäten wie geplant realisieren lassen, so wird der Best Case der Prognoserechnung von 1,8 MW_{el} nahezu erreicht. Die ersten Betriebserfahrungen bestätigen die oben beschriebenen Annahmen.

Bei der Verstromung des Klärschlammes durch die Wirbelschichtverbrennung im Wirbelschichtofen (WSO) 3 des HKW ergibt sich eine ähnlich positive Situation wie bei der Faulgasverbrennung. Als Mittelwert (0,6 bis 0,9 MW_{el}) der Prognoserechnung wird eine Leistung von ca. 0,75 MW_{el} ermittelt. Der WSO 3 erreicht diese Leistung ohne Zufeuerung von Fremdschlamm und sonstigen Brennstoffen (zum Beispiel Stützfeuerung) nahezu exakt.

Wird die zu verbrennende Klärschlammmenge durch Fremdschlammannahme erhöht und die Klärschlammqualität durch die neuen Faulbehälter verbessert, so kann die Vollaus-

| | | |
|--|------------------|-----------------------|
| theoretischer Energieinhalt je Einwohner (E) und Jahr | Pinnekamp 2008 | 175 kWh/(E · a) |
| | Kroiss 2006 | 159 kWh/(E · a) |
| spezifischer Abwasseranfall je Einwohner und Tag: Standardwert · 1,1 = 0,2 m ³ /(E · d) · 1,1 = 0,22 m ³ /(E · d) | | |
| Zufluss HKW | | 2,1 m ³ /s |
| Berechnung Brennstoffleistung ab E | MW _{Br} | kW _{Br} |
| 175 kWh/E/a/365 d/a/0,22 m ³ /E/d · 2,1 m ³ /s · 3600 s/h | Best Case (BC) | 16 476 |
| 159 kWh/E/a/365 d/a/0,22 m ³ /E/d · 2,1 m ³ /s · 3600 s/h | Worst Case (WC) | 14 969 |
| Transportverluste vom E zum HKW durch Veratmung, Vergärung | | |
| Brennstoffleistung Zufluss HKW | BC [%] | 5 |
| | WC [%] | 10 |
| Filterrate Gesamtkläranlage HKW | BC [%] | 99 |
| | WC [%] | 95 |
| Primär- und Überschussschlamm aus mechanischer und biologischer Stufe werden dem Faulbehälter (FB) zugeführt. | | |
| Brennstoffleistung Ansatz nach Schlussbericht | | |
| 120/159 = 0,75 = 75 % | BC [%] | 75 |
| | WC [%] | 70 |
| Klärgasverbrennung | | MW _{el} |
| Ansatz 37 % aus FB | | Wirkungsgrad [%] |
| | 37 % | Verstromung BHKW |
| | 4,3 | BC [%] |
| | 3,3 | WC [%] |
| Klärschlammverbrennung | | |
| Ansatz 63 % aus FB, ohne Fremdschlammzufuhr | | Wirkungsgrad [%] |
| | 63 % | Verstromung WSO 3 |
| | 7,3 | BC [%] |
| | 5,6 | WC [%] |
| Stromproduktion als Summe aus Klärgas- und Klärschlammverstromung | BC | 2,7 |
| | WC | 1,8 |
| Stromverbrauch 2012 für GK 5 in BW = 33,6 kWh/(E · a) | | 3,2 |

Tabelle 2: Theoretische Prognoserechnung

lastung der Dampfturbine, die auf 1,2 MW_{el} ausgelegt ist, erreicht werden.

Zusammenfassung: Das HKW verfügt, bezogen auf die technische Ausstattung, über alle Verstromungstechniken, die notwendig sind, um die im Klärwerk entstehenden Brennstoffe zu verarbeiten. Dabei ist nach aktueller Einschätzung bei optimaler Betriebsführung eine Stromleistung von

1,6 MW_{el} (durch die Klärgasverbrennung) + 1,2 MW_{el} (durch die Klärschlammverbrennung (einschließlich Fremdschlamm)) = 2,8 MW_{el}

als Zielwert erreichbar.

4.2 Stromverbrauch

Das HKW Mühlhausen hat in den Jahren 2011, 2012 und 2013 erhebliche Anstrengungen bei der Reduktion des Stromverbrauchs unternommen. Durch die Modernisierung der Steuerungs- und Leittechnik in der Biologie konnte hier zum Beispiel

| Anlagenteil | Anteil [%] | Stromverbrauch [kWh/(EW · a)] |
|--|--------------|-------------------------------|
| Rechen und Sandfang Mühlhausen inkl. Hebewerk für Teilstrom, H ca. 6 m | 8,9 | 4 |
| Rechen und Sandfang Hofen | 2,9 | 1 |
| Biologie Süd | 25,0 | 11 |
| Biologie Nord | 27,7 | 12 |
| Sandfiltration inkl. Hebewerk für Gesamtstrom, H ca. 5,5 m | 8,0 | 3 |
| Schlammfäulung | 3,5 | 1 |
| Schlammwässerung, -trocknung, -verbrennung | 15,1 | 7 |
| Sonstiges | 8,9 | 3 |
| Gesamtstromverbrauch (hochgerechnet auf 2013) | 100,0 | 42 |

Tabelle 3: Teilanlagenspezifischer Stromverbrauch hochgerechnet auf das Jahr 2013 (Einwohnerwerte (Mittel-CSB₁₂₀) hochgerechnet 2013 ca. 874 100 EW)

| Quellenangabe | Stromverbrauch | | Bemerkung |
|--|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| | spezifisch [kWh/(E · a)] | absolut [MW _{el}] | |
| Ist-Verbrauch HKW 2013, 1. Hj. 2013 hochgerechnet | 42 | 4,0 | |
| Durchschnittswert Baden-Württemberg, GK 5 (2011 = 2012) [5, 8] | 33,6 | 3,2 | |
| Stromautonomie | 29 | 2,7 | Stromproduktion = Stromverbrauch |
| Idealwert Schlussbericht 2009 [3] | 25 | 2,4 | Vision: das HKW als Kraftwerk |

Tabelle 4: Übersicht einer möglichen Reduzierung des Stromverbrauchs

der spezifische Stromverbrauch um ca. 20–25 % reduziert werden.

Lag der durchschnittliche Stromverbrauch 2011 noch bei ca. 52 kWh/(E × a), kann der entsprechende Wert für 2013, hochgerechnet aus dem ersten Halbjahr 2013, mit ca. 42 kWh/(E × a) angenommen werden. Der hochgerechnete Stromverbrauch für 2013 kann gemäß Tabelle 3 aufgeteilt werden.

4.3 Energieautonomie als erreichbares Ziel

Das Ziel eines energieautonomen Klärwerks erfordert eine Stromproduktion in gleicher Höhe wie der des Stromverbrauches. Um das Ziel zu erreichen, können folgende Maßnahmen unterstützend wirken:

1. Die Betriebsführung in Richtung einer maximalen Faulgasproduktion steuern, da Klärgas mit dem höchsten technischen Wirkungsgrad von ca. 43 % verstromt wird.
2. Die Fremdannahme von Klärschlamm oder anderen Brennstoffen erhöhen.
 - 2.1. Die Klärschlamm-Fremdannahme zur Wirbelschichtverbrennung WSO 3 ist bereits vorhanden.
 - 2.2. Es sollte geprüft werden, ob auch nicht ausgefallter Klärschlamm angenommen und in die Faulbehälter zugegeben werden kann. So kann die Brennstoffmenge an Klärgas und ausgefalltem Klärschlamm deutlich erhöht werden.
 - 2.3. Ist eine Co-Vergärung denkbar? Diese Möglichkeit sollte geprüft werden.

Bei den genannten letzten zwei Positionen ist die Rückbelastung nicht berücksichtigt.

3. Die Analyse des Stromverbrauchs mithilfe einer Grob- und Feinanalyse entsprechend dem „Handbuch Energie in Kläranlagen“ [6] bzw. dem als Entwurf vorliegendem Arbeitsblatt DWA-A 216 [7]. Durch die systematische Auswertung kann weiteres Einsparpotenzial aktiviert werden.
4. Der Aufbau eines Energiemanagementsystems mit dem Ziel, auch die Anlagenverfügbarkeiten zu erhöhen.

Mit den zuvor genannten Maßnahmen wären eine Erhöhung der Stromproduktion auf der einen Seite und eine Reduzierung des Stromverbrauchs auf der anderen Seite möglich.

Der Anspruch einer verbesserten Reinigungsleistung (zum Beispiel Spurenstoffentnahme) der Kläranlage wird nicht ohne zusätzliche elektrische Energie machbar sein. Ziel muss hier

sein, durch intelligente Lösungen den zusätzlichen Energiebedarf so gering wie möglich zu halten und gleichzeitig die Kläranlagenprozesse weiter zu optimieren.

Das HKW Mühlhausen könnte das Ziel Stromautonomie aus heutiger Sicht in den nächsten 10 bis 15 Jahren erreichen.

Die mögliche Reduzierung des Stromverbrauchs mit der Definition einer Vision für das HKW ist in Tabelle 4 dargestellt. Bei fallendem Stromverbrauch würde ab einem spezifischen Verbrauch von 29 kWh/E/a, entsprechend einem Stromverbrauch von 2,7 MW_{el}, das HKW Mühlhausen zu einem Kraftwerk bei der Best-Case-Betrachtung. Es würde also dann mehr Strom produziert als verbraucht.

Literatur

- [1] Gredigk-Hoffmann, S.: Energieautarke Kläranlagen – Vision oder Fiktion? 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 2.–4. April 2008, Essen, Schriftenreihe GWA, Bd. 211, RWTH Aachen, 2008
- [2] Lindtner, S.: Energieautarke Kläranlagen – Kläranlagen-Wunschtraum oder Wirklichkeit? Erfahrungen aus der österreichischen Praxis, *KA-Betriebs-Info* 2010, 40 (2), 1722–1727
- [3] *Schlussbericht – Endversion: Forschungsvorhaben „Kläranlage der Zukunft“ – Themenbereiche Faulgasproduktion, Anaerobtechnik und Deammonifikation*, 76 e 97, 14. Dezember 2009, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft der TU München (H. Horn, S. Rapp-Fiegle), Professur für Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft der Universität der Bundeswehr München (F. W. Günthert, M. S. Holtorff), Labor angepasste Wassertechnologien Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik Hochschule Amberg-Weiden (F. Bischof, M. Chwistek)
- [4] Pinnekamp, J.: Energie in der Wasser- und Abfallwirtschaft, Vortrag auf der IFAT 2008
- [5] Schwentner, G.: 39. *Leistungsvergleich der kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg (2012)*, DWA-Landesverband Baden-Württemberg, 2013
- [6] Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): *Energie in Kläranlagen – Handbuch*, Düsseldorf, 1999
- [7] DWA-A 216 „Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen“ (Entwurf), Hennef, 2013
- [8] Schwentner, G.: 38. *Leistungsvergleich der kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg (2011)*, DWA-Landesverband Baden-Württemberg, 2012

Autoren

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Lothar Krätzig-Ahlert

Dr.-Ing. Derek Eisert

Grontmij GmbH

Graeffstraße 5, 50823 Köln

E-Mail: Lothar.Kraetzig-Ahlert@grontmij.de