

Innovative Mess-, Steuer- und Regeltechnik zur Belüftung in Belebungsbecken

Dirk Gengnagel und Bernadette Godart (Wuppertal)

Zusammenfassung

Der Einsatz moderner Mess-, Steuer- und Regeltechnik kann zu einem stabilen Kläranlagenbetrieb mit niedrigen Ablaufwerten führen bei deutlich reduziertem Energiebedarf. Kern der Optimierungsmaßnahme der Kläranlage Kohlfurth des Wupperverbands ist der Einsatz einer von der Stickstoffkonzentration abhängigen Gleitdruckregelung der Belüftung in Kombination mit einer intermittierenden Gebläseregelung. Diese Kombination der Verfahrenstechniken ist für Abwasserbehandlungsanlagen größer 100 000 EW mit Kaskadenbiologie und Pfropfenströmung bisher unbekannt.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, MSR-Technik, Kläranlage, Betrieb, Optimierung, Energieverbrauch, Stickstoffelimination, Belüftung, Gebläse, Regelung

DOI: 10.3242/kae2010.06.006

Abstract

Innovative Measurement and Control Systems for the Aeration of Aeration Tanks

The use of modern measurement and control systems can contribute to a stable operation of sewage works with low discharge rates and a clearly lower demand for energy. The core element of the optimization efforts at the Kohlfurth wastewater treatment plant, operated by the Wupper River Association, is a variable pressure control system for the aeration of the tank that depends on nitrogen levels in conjunction with an intermittent fan control system. Such a combination of process technologies for wastewater treatment plants with more than 100,000 PE with biological cascades and plug-flow systems.

Key words: wastewater treatment, municipal, measurement and control technology, wastewater treatment plant, operation, optimization, energy demand, nitrogen removal, aeration, fan, control

1 Einleitung

Der Ausbau der Kläranlagen zur weitergehenden Abwasserreinigung in Deutschland ist überwiegend abgeschlossen. Nun folgt die Phase der Anlagenoptimierung. Hier ist es vielfach das Ziel, ein hohes Niveau bei der Reinigungsleistung einzuhalten und dabei die Kosten weitgehend zu senken. Im Hinblick auf die wirtschaftliche Lage der öffentlichen Hand ist es für Betreiber von abwassertechnischen Anlagen absolut notwendig, verfahrenstechnische Prozesse zu ertüchtigen, um so Betriebskosten zu senken. Dieses Ziel wird oft durch innovative Mess-, Steuer- und Regeltechnik erreicht.

Besonders im Fokus steht dabei die biologische Stufe von Kläranlagen. Einerseits liegen hier die größten Einsparpotenziale, da hier allein rund 60% der elektrischen Energie einer Kläranlage verbraucht werden. Andererseits laufen in der biologischen Stufe komplexe Vorgänge ab.

Die lastabhängige Gleitdruckregelung hat sich zur Belüftung von Belebungsbecken größerer Anlagen etabliert. Die intermittierende Fahrweise von Belebungsbecken ist meist bei kleineren Kläranlagen mit einer Anschlussgröße unter 50 000 EW zu finden. Die Kombination beider Verfahren ist noch weit-

gehend unbekannt und in einer Kläranlage des Wupperverbandes umgesetzt worden, die größer als 100 000 EW ist.

2 Die Kläranlage Kohlfurth

Der Wupperverband betreibt in seinem Verbandsgebiet elf Kläranlagen. An die zweitgrößte Anlage, die Kläranlage Kohlfurth, sind Ortsteile der Städte Wuppertal, Solingen und Remscheid angeschlossen. Nennenswerte Einleitungen kommen aus der Galvanik-, Textil-, Chemie- und Papierindustrie. Der Fremdwasseranteil liegt mit rund 50 % verhältnismäßig hoch. Die angeschlossenen Einwohnerwerte sind seit Jahren tendenziell rückläufig.

Die Kläranlage wurde im Jahr 1972 zunächst als mechanische, seit 1978 als mechanisch-biologische Anlage für 200 000 EW in Betrieb genommen und sukzessive im Bereich der Belebungsbecken und Schlammbehandlung erweitert. 1993 wurde eine Flockungsfiltrationsanlage errichtet. Im Zuge der letzten Ertüchtigung wurde das Klärwerk seit 1996 in gut zehn Jahren stufenweise ausgebaut. Dabei wurde die vorhandene Bausubs-

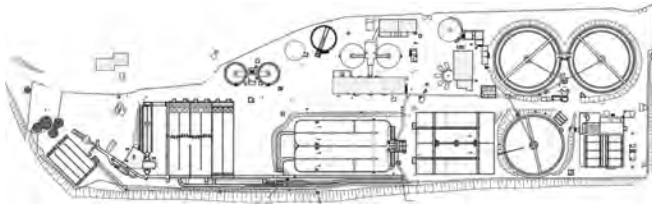


Abb. 1: Lageplan der Kläranlage (aktueller Ausbauzustand)

tanz weiter genutzt und eine Überdimensionierung vermieden. Besonders die Belebungsstufe wurde in verschiedenen Abschnitten ertüchtigt.

Zusätzlich wurde eine Kohlenstoffdosieranlage errichtet, mit der bei Bedarf leicht abbaubare, organische Stoffe dosiert werden können, um die Denitrifikation zu unterstützen. Damit die biologische Stufe nicht überlastet wird, wurde zur Reduktion der Stickstofffracht eine Prozesswasserbehandlungsanlage erstellt. Abbildung 1 zeigt einen Lageplan der Kläranlage zum derzeitigen Ausbauzustand.

3 Der schrittweise Ausbau der Belebungsstufe

Ende der 1980er-Jahre wurden die Mindestanforderungen an die Reinigung von Abwasser in kommunalen Kläranlagen neu definiert; Hintergrund war der sich verschlechternde Zustand von Nord- und Ostsee. Zudem wurde von der Bezirksregierung Düsseldorf der Bewirtschaftungsplan „Untere Wupper“ aufgestellt, der diese Anforderungen nochmals verschärfte.

Im Jahr 1990 wurde der erste Genehmigungsentwurf zur Erweiterung der Kläranlage Kohlfurth erstellt mit einer Anschlussgröße von 190 000 EW. Im Jahr 1998 wurde bei einer Überplanung die Anschlussgröße auf 156 000 EW reduziert und ein simultanes Belebungsverfahren festgeschrieben.

Verfahrenstechnisches Kernelement war hierbei der Einsatz von Lamellenabscheidern direkt in den Belebungsbecken. Dadurch sollten vermehrt Feststoffe in den Becken zurückgehalten und die Nachklärung entlastet werden. Die Nachklärbecken, die nicht den Anforderungen von Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 genügten, sollten so ohne Umbau weiter betrieben werden können.

Im Juli 2002 trat schließlich die fünfte Verordnung zur Änderung der Abwasserverordnung in Kraft, in der der Parameter N_{anorg} auf 13 mg/l bei Anlagen größer 100 000 EW festgesetzt wurde.

In der ersten Bauphase wurden zwei Belebungsbecken mit 15 600 m³ errichtet, und die beiden Belebungsbecken der Altanlage mit 8000 m³ wurden saniert, so dass ein Gesamtvolumen der Belebungsstufe mit 23 600 m³ zur Verfügung stand. Die Belebungsbecken wurden mit Lamellen ausgerüstet und sollten mit simultaner Denitrifikation gefahren werden. Nach der Inbetriebnahme wurde jedoch festgestellt, dass es unter den gegebenen Randbedingungen nicht möglich war, den zu dieser Zeit noch gültigen Bescheidwert für N_{anorg} von 18 mg/l gesichert einzuhalten, abgesehen davon einen Wert von 13 mg/l überhaupt erreichen zu können.

Die wesentlichen Gründe für die erhöhten Ablaufwerte waren zum einen der nicht bedarfsgerechte Sauerstoffeintrag durch eine Konstantdruckregelung in die Belebungsbecken und zum anderen die ungünstige räumliche Installation der Belüfterelemente, besonders in den neu errichteten Becken. Aufgrund dieser Anordnung und der Verschleppung von Sauerstoff



Abb. 2: Anordnung der Belüfterplatten nach Umbaumaßnahme

durch überdimensionierte Rührwerksleistungen war eine klare räumliche Abgrenzung von belüfteten und unbelüfteten Zonen unmöglich. In weiten Beckenabschnitten waren indifferente Verhältnisse mit Sauerstoffgehalten zwischen 0,4 und 1 mg/l auszumachen, so dass die Bakterien dort weder Bedingungen für eine Nitrifikation noch für eine Denitrifikation vorfanden. Das spiegelte sich in einem eingeschränkten Stickstoffabbau und erhöhten N_{anorg} -Werten im Ablauf wider. Hinzu kam, dass die Anforderungen an die Abscheideleistung der Lamellen nur unzulänglich erfüllt wurden. Vor diesem Hintergrund musste die Kläranlage erneut überplant werden, indem nach entsprechenden Optimierungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen gesucht wurde, um den künftigen Anforderungen von N_{anorg} 13 mg/l im Ablauf sicher zu genügen.

4 Die Optimierung der Belüftungsstrategie

In der ersten Optimierungsphase wurden daher die Lamellenabscheider komplett rückgebaut. Zusätzlich wurde das vorhandene Belüftersystem in den vier Belebungsbecken durch Plattenbelüfter mit Membranen aus thermoplastischem Polyurethan (TPU) ergänzt, die komprimiert angeordnet wurden (Abbildung 2), um eine eindeutige Abgrenzung zwischen Nitrifikations- und Denitrifikationszonen zu erreichen. Ein weiterer Vorteil der eingesetzten Membran-Plattenbelüfter ist neben der höheren Effizienz auch ein günstiges Langzeitleistungsverhalten.

Die eingebaute Konstantregelung wurde durch eine Gleitdruckregelung ersetzt. Ein wesentlicher Vorteil der Gleitdruckregelung ist, dass der für den Lufteintrag maßgebende Sauerstoff-Sollwert nicht mehr manuell vorgegeben wird, sondern auf Basis aktueller Stickstoff- und Sauerstoffbelastungswerte errechnet wird. Somit kann schnell auf geänderte Sollwertanforderungen reagiert und der Sauerstoff bedarfsgerecht eingetragen werden. Das Grundprinzip ist, dass mit steigender Konzentration an Ammoniumstickstoff im Belebungsbecken mehr Sauerstoff für die nitrifizierenden Bakterien in den belüfteten Zonen zur Verfügung gestellt wird. Gegenläufig wird mit steigendem Gehalt an Nitratstickstoff der Sauerstoffgehalt reduziert, wodurch je nach Belastung die unbelüfteten Zonen gleitend vergrößert werden. Innerhalb der Gleitdruckregelung sind für die beiden Nährstoffparameter NH_4 -N und NO_x -N die in Abbildung 3 beschriebenen Berechnungsvorschriften in einer Matrix hinterlegt.

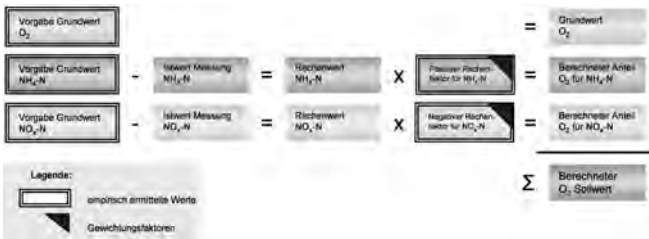


Abb. 3: Berechnungsmatrix der Gleitdruckregelung

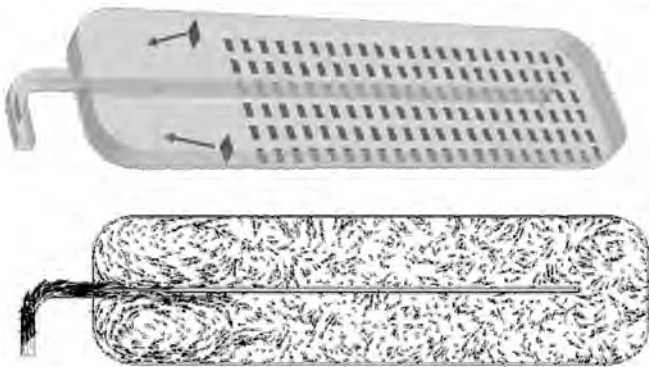


Abb. 4: Strömungssimulation der Belebungsbecken

Hierbei sind die drei Grundwerte und die beiden Gewichtungsfaktoren empirisch ermittelt worden. In diese Werte gehen die Beckengeometrie, biologische Faktoren sowie physikalische Bedingungen ein. Anhand der Gewichtungsfaktoren kann bestimmt werden, ob vorrangig nitrifiziert oder denitrifiziert werden soll. Weicht der berechnete O_2 -Sollwert deutlich vom gemessenen Sauerstoffwert ab, steigt der Differenzdruck in der Rohrleitung an. Dadurch wird erreicht, dass unverzüglich mehr Sauerstoff in die Belebungsbecken eingetragen wird. Allerdings darf dabei in keinem Fall der maximal zulässige Differenzdruck in der Leitung überschritten werden. Alle Bedingungen wurden in den Rechenvorschriften der Regeltechnik abgebildet. Durch die Umstellung der Belüftungsregelung konnte erreicht werden, dass die zu der Zeit noch festgesetzten $18 \text{ mg/l } N_{\text{anorg}}$ sicher eingehalten wurden.

Allerdings galt es nun, die Anlage so zu ertüchtigen, dass die Ablaufwerte stabil unter $13 \text{ mg/l } N_{\text{anorg}}$ liegen, um die Vorgaben der novellierten Abwasserverordnung einzuhalten. Mit dynamischer Simulation wurden verschiedene Varianten erprobt, um das geeignete Verfahren zu ermitteln. Das Volumen der Belebungsbecken wurde auf $31\,200 \text{ m}^3$ innerhalb der vorhandenen Bauwerkskubatur erweitert. Es wurde eine vorgeschaltete Denitrifikation errichtet, und die simultane Belebungsbecken wurde von Umlaufbecken auf Pfropfenströmung umgestellt. Zur Errichtung von zwei Denitrifikationsbecken wurde ein Teil der vorhandenen Vorklärung umgebaut. Nachteil dieser Becken ist, dass sie eine sehr geringe Tiefe aufweisen und dadurch entsprechend viel Rührwerksleistung erfordern, um den belebten Schlamm in der Schwebe zu halten.

Bei der Überplanung wurde die Leistung der Rührwerke deutlich reduziert und deren Anordnung verändert. In den vier Belebungsbecken waren ursprünglich 20 Rührwerke mit jeweils 4 kW Leistung eingebaut worden. Die neue Anordnung wurde in einer Strömungssimulation ermittelt (Abbildung 4). Ziel war es, die Energiekosten zu senken und eine verfahrens-

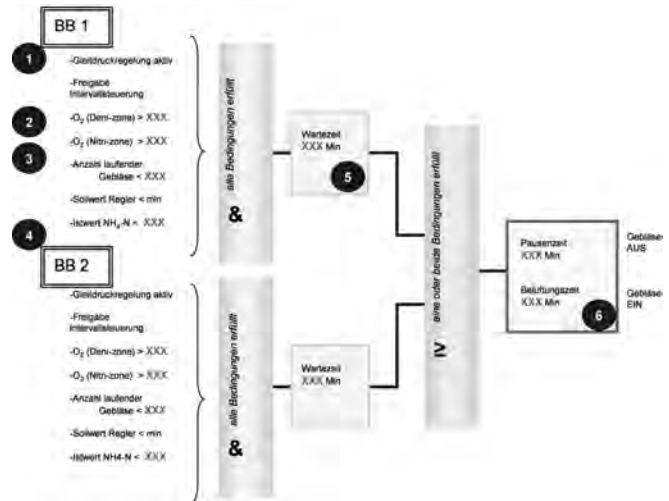


Abb. 5: Festlegung der Pausenzeiten bei intermittierender Betriebsweise

technisch optimale Positionierung der Aggregate zu finden. Letztendlich reichte die Hälfte der Rührwerke aus, deren Drehfrequenz noch durch Frequenzumrichter gedrosselt wird. Ungewöhnlich war, dass die Rührwerke im Gegenstrom zur Fließrichtung angeordnet wurden. Anhand der Simulation und auch im praktischen Betrieb zeigte sich, dass dadurch Rohabwasser und belebter Schlamm gut durchmischt werden und es nicht zu wesentlichen Ablagerungen kommt.

Im Zuge einer weiteren Optimierung wurde noch während der Baumaßnahme die beschriebene Gleitdruckregelung um eine intermittierende Gebläsesteuerung ergänzt. Die Festlegung der Pausenzeiten der Belüftung erfolgte gemäß Abbildung 5.

Die intermittierende Fahrweise wird angestoßen wenn:

- (1) die Gleitdruckregelung aktiv ist und
- (2) Sauerstoff in die Denitrifikationszone verschleppt wird und
- (3) in der belüfteten Zone der Sauerstoffgehalt aufgrund einer zu geringen Zehrung ansteigt.

Die Abfragen (2) und (3) können auch deaktiviert werden. Die Bedingung (4) lässt die intermittierende Fahrweise nur bis zu einem kritischen Ammoniumgehalt zu und sichert so die Einhaltung des Überwachungswertes für $NH_4\text{-N}$ bei hohen Zulaufmengen, beispielsweise bei hydraulischen Stößen. Die Wartezeit (5) soll klare Schaltzustände sicherstellen.

Sind alle Bedingungen erfüllt, erfolgt nach der vorgegebenen Wartezeit eine Belüftungspause (6). Ihre Dauer ist empirisch ermittelt worden und liegt in Kohlfurth zwischen 30 und 40 Minuten. Auch wenn noch alle Bedingungen erfüllt sind, wird nach Ablauf der Pausenzeit immer eine Belüftungsphase (6) erzwungen.

Bei niedrigen Ammoniumkonzentrationen im Ablauf der Belebungsbecken kann, besonders in den Nachtstunden und aufgrund der eingestellten Regelung, zeitlich begrenzt das gesamte Beckenvolumen als Denitrifikationszone gefahren werden. Das führt zu einem merklichen Rückgang der Nitratkonzentrationen. Da in den belüfteten Beckenbereichen keine zusätzliche Rührwerksleistung installiert wurde, sedimentiert während der Belüftungspause der belebte Schlamm auf der Beckensohle und legt sich auf die bodennah installierten Belüfterplatten. Die Belüfter-

leistung wurde ausreichend dimensioniert, um zu Beginn der Belüftungsphasen den abgesetzten belebten Schlamm wieder vollständig aufzuwirbeln und zu durchmischen. Dies erfordert zudem, dass die nicht mit Rührwerken ausgerüsteten Beckenzonen flächig mit Belüfterelementen ausgerüstet sind.

5 Auswirkungen der optimierten Belüftungsstrategie

Die Kombination der beiden Verfahren ist bisher für Abwasserbehandlungsanlagen mit mehr als 100 000 EW und Kaskadenbiologie mit Pfropfenströmung so bislang noch nicht umgesetzt worden. Auf der Kläranlage Kohlfurth konnten mit dieser Neuerung gute Abbauergebnisse und ein sicherer sowie kostengünstiger Betrieb erreicht werden.

5.1 Stabiler Betrieb

Trotz der langen, unbelüfteten Phasen wird die Flockenstruktur nicht beeinträchtigt. Es sind vorwiegend kräftige, abgerundete Strukturen auszumachen. Auch der Schlamminde liegt ohne weitere Hilfsmittel mit 140 ml/g im Jahresmittel ausreichend niedrig. Die Ablaufwerte der Parameter NH₄-N, N_{anorg} und CSB sind dabei stabil auf niedrigem Niveau (Abbildung 6, Tabelle 1).

5.2 Kosteneinsparungen

Die optimierte Fahrweise der biologischen Stufe führt zu einer deutlichen Reduzierung des Energieverbrauchs. Das ist vorwiegend der geänderten Belüftungsregelung und der Umstellungen der Umwälzung zu zurechnen. Ein weiterer Effekt wurde durch die Reduzierung des Rücklaufverhältnisses erreicht. Während der periodischen Sedimentationsphasen des Schlammes in den Belebungsbecken werden weniger Feststoffe in die Nachklärbecken ausgetragen. Dies hat einen periodisch schwankenden Schlamm Spiegel in den Nachklärbecken zur Folge. Durch Einstellung eines geringeren Rücklaufverhältnisses (RV = 0,5) wird gewährleistet, dass der „Schwebefilter“ in der Trennzone der Nachklärbecken erhalten bleibt.

Gegenüber dem Stromverbrauch der Gesamtanlage von 4 857 706 kWh im Jahr 2003 mit Konstantregelung, sank der Strombedarf im Jahr 2005 deutlich durch die Einführung der Gleitdruckregelung ab. Die 2006 durchgeführten Optimierungsmaßnahmen verminderten den Strombedarf nochmals merklich, trotz der Inbetriebnahme eines zusätzlichen Pumpwerks, mit dem zwei Drittel des Wassers in die aufgehöhten Nachklärbecken gehoben werden müssen. 2008 lag der Stromverbrauch nur noch bei 3 769 301 kWh (Abbildungen 7 und 8). Das entsprach einer Reduzierung von 22,4 % und einer jährlichen Kosteneinsparung von rund 175 000 €.

In der Energieanalyse von 2008 wurde zudem festgestellt, dass der spezifische Energieverbrauch der Belüftung in Kohlfurth

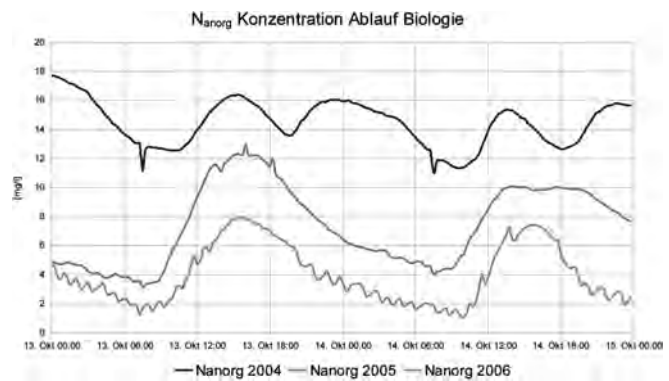


Abb. 6: Vergleich der Nanorg-Konzentrationen nach abschnittsweiser Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen

Kostenfaktor	Betriebskosteneinsparung [€/a]
keine Zugabe einer C-Quelle	80 000
keine Zugabe von Kalkmilch	54 000
Einsparung Abwasserabgabe	43 000
Einsparung Energiekosten	175 000
Summe	352 000

Tabelle 2: Einsparungen der Betriebskosten

bei 14,9 kWh/(EW × a) lag. Der Richtwert liegt laut Handbuch „Energie in Kläranlagen“ bei 21 kWh/(EW × a), der Idealwert bei 16 kWh/(EW × a) für Anlagen größer als 100 000 EW.

Durch die optimierte Belüftungsstrategie wird sehr weitgehend denitrifiziert. Deshalb kann auf eine Kalkdosierung zum Säurekapazitätsausgleich vollkommen verzichtet werden. Der pH-Wert im Ablauf der Belebung liegt mit geringen Schwankungen bei 6,8 bei einem Säurekapazitätswert von ca. 2,5 mmol/l. Vor der Optimierung der Fahrweise wurden jährlich rund 400 Tonnen Kalkmilch dosiert, was heutigen Kosten von rund 54 000 € entspricht (Tabelle 2).

Die Planungsstudien und im Vorfeld durchgeführte Simulationen hatten ergeben, dass ein N_{anorg}-Wert im Ablauf von 13 mg/l nur mithilfe von externen Kohlenstoffträgern einzuhalten wäre. Doch hat es sich gezeigt, dass durch die kombinierte Verfahrensweise von Gleitdruckregelung und intermittierender Belüftung der Stickstoffabbau so weitgehend ist, dass auf eine Kohlenstoffdosierung gänzlich verzichtet werden kann. Das spart Kosten in Höhe von rund 80 000 € jährlich bei Verwendung von 70-prozentiger technischer Essigsäure ein.

Im Zuge des Messprogramms gemäß § 4 (5) AbwAG wird für den Parameter N_{anorg} in den Winterquartalen auf 9 mg/l und in den Sommerquartalen auf 8 bzw. 7 mg/l erklärt. Das spart gegenüber einem Wert von 13 mg/l jährlich rund 43 000 € an Abwasserabgabe ein. Daneben wird im Zuge der Abwasserabgabe der CSB auf 20 mg/l und damit abgabefrei erklärt.

Parameter	2004		2005		2006	
	Mittelwert	85%-Quantil	Mittelwert	85%-Quantil	Mittelwert	85%-Quantil
NH ₄ -N	0,5	1,1	0,8	1,4	1,6	2,9
N _{anorg}	11,5	17,7	8,2	14,9	6,7	11,7
CSB	16	20,0	16	19,3	16	20,3

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Ablaufkonzentrationen nach abschnittsweiser Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen

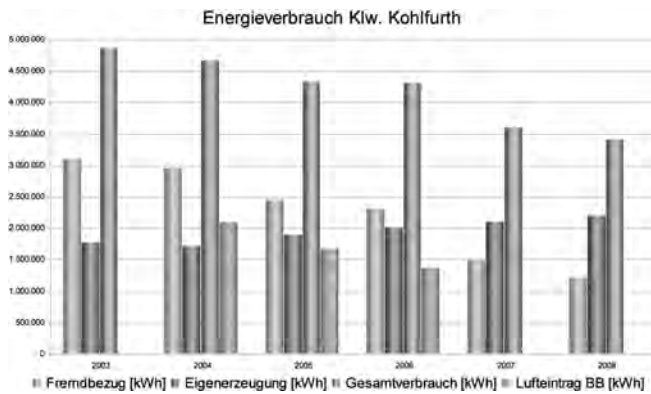


Abb. 7: Stromverbrauch der Jahre 2004 bis 2008

6 Fazit

Die Optimierungen im Klärwerk Kohlfurth haben gezeigt, dass sich mit pragmatischen Ansätzen, unter Nutzung vorhandener Bausubstanz und der Kombination unterschiedlicher, bisher einzeln eingesetzter Verfahren neue, effiziente Systeme entwickeln lassen. Wichtig hierbei war es, die Erkenntnisse realistisch zu bewerten, Fehlentwicklungen einzugestehen und sofern notwendig wieder zu revidieren. Vielversprechende Tendenzen wurden herausgearbeitet und gemeinsam mit dem Betriebspersonal schrittweise weiter optimiert. Es hat sich gezeigt, dass es sich lohnt, unkonventionelle Betriebsweisen auszuprobieren. So wird beispielsweise in Kohlfurth phasenweise die gesamte Belebung als Denitrifikationsraum gefahren.

Die Weiterentwicklungen brachten einen stabilen Betrieb und Kosteneinsparungen mit sich. Der Energiebedarf ging zurück, da der Sauerstoffeintrag nach dem tatsächlichen Bedarf erfolgte. Die N_{anorg} -Werte im Ablauf sanken deutlich, auch bei ungünstigem C/N-Verhältnis. Das bot die Grundlage einer deutlichen Niedrigererklärung gemäß § 4 (5) AbwAG und damit für die Reduktion der Abwasserabgabe. Durch die verbesserte Denitrifikation konnte auf die Zugabe von Kalkmilch zum Säurekapazitätsausgleich ganz oder teilweise verzichtet werden.

Auf dem Klärwerk Kohlfurth werden so jährlich Kosten von rund 352.000 € eingespart.

Literatur

- [1] Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): *Handbuch „Energie in Kläranlagen“*, Düsseldorf, 1999
- [2] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131: *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*, Hennef, 2000
- [3] G. Kolisch: *Überplanung Klärwerk Kohlfurth*, Studie der WiWmbH im Zuge des Ausbaus der Kläranlage Kohlfurth, unveröffentlicht (2004)

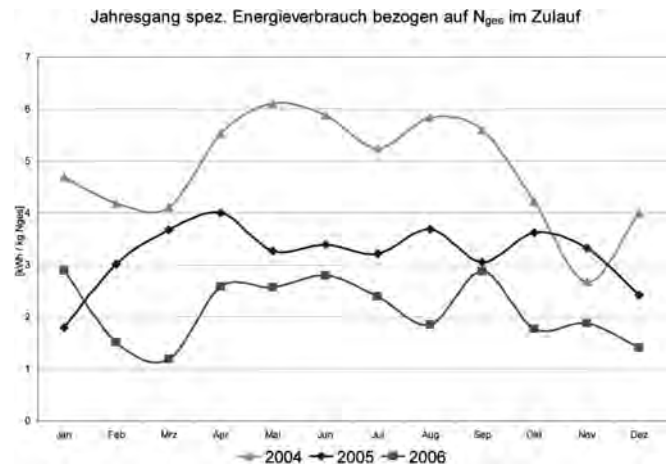


Abb. 8: Gegenüberstellung der spezifischen Energieverbräuche nach abschnittsweiser Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen

- [4] Tuttahs & Meyer: *Erläuterungsbericht Klärwerk Kohlfurth*, unveröffentlicht (2005)
- [5] Rudolf Mesner Umwelttechnik: Die Auswirkung moderner Belüftungstechnik auf die biologische Abwasserreinigung, Beitrag zur Fachkonferenz „Die transparente Kläranlage“, 6./7. September 2006, Düsseldorf
- [6] F. Schmidt, D. Gengnagel, N. Biebersdorf, J. Alda: Aufbau und Realisierung eines Regelungs- und Steuerungskonzeptes zur Betriebsoptimierung der biologischen Hauptstufe am Beispiel des Klärwerkes Kohlfurth, DWA-Tagung „Mess- und Regeltechnik in abwassertechnischen Anlagen“, 20./21. November 2007, Wuppertal
- [7] V. Erbe, G. Kolisch, F. Schmidt: A Decade of Kohlfurth WWTP Upgrade under Operation – High lights and Drawbacks, Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, IWA-Tagung Large Wastewater treatment plants, 9. September 2007, Wien
- [8] G. Kolisch, J. Hansen, I. Hobus, K. Wu: *Ergebnisse von Referenzanlagen in Rheinland-Pfalz*, Schriftenreihe FG Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern. Fachtagung Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Energieoptimierung von Kläranlagen, 19. November 2007, Kaiserslautern
- [9] PFI Planungsgemeinschaft GbR: *Energetische Feinanalyse Kohlfurth*, unveröffentlicht (2009)
- [10] M. Friedrich; G. Kolisch: Energieeffizienz auf Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern, DWA-Landesverbandstagung Nord-Ost, 28./29. Mai 2009, Selin

Autoren

Dirk Gengnagel
Dipl.-Ing./Betriebswirtin (IWW) Bernadette Godart
Wuppertal
Untere Lichtenplatzer Straße 100
42289 Wuppertal

E-Mail: ge@wuppertal.de

