

Leistung gesteigert

Modernisierung der Belüftungs- und Analysesysteme

Judith PATT; Dipl.-Ing. Karl-Hermann SÖHNGEN

Senkung der Jahreskosten: Der Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen hat seine Kläranlage mit einem effizienten und langlebigen Belüftungssystem und mit moderner Online-Analytik ausgerüstet.

Der Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen – ESi – hat die Biologie seiner Kläranlage mit einem hocheffizienten, langlebigen Belüftungssystem und innovativen Online-Nährstoffmessgeräten ausgestattet. Die Auswahl erfolgte konsequent nach den „Lebenszykluskosten“ auf der Basis von Garantiewerten und Referenzen der Bieter. Der Energieverbrauch für die Belüftung der Belebung konnte jährlich um etwa 40 % reduziert und gleichzeitig die jährlichen Kapitalkosten um etwa 25 % verringert werden. Darüber hinaus konnte die Kohlenstofffrachtemission in den Vorfluter um 29 % gemindert und somit aktiver Umweltschutz praktiziert werden. Durch die Möglichkeit zur Verrechnung mit der Abwasserabgabe wurde die Maßnahme quasi zum Nulltarif realisiert.

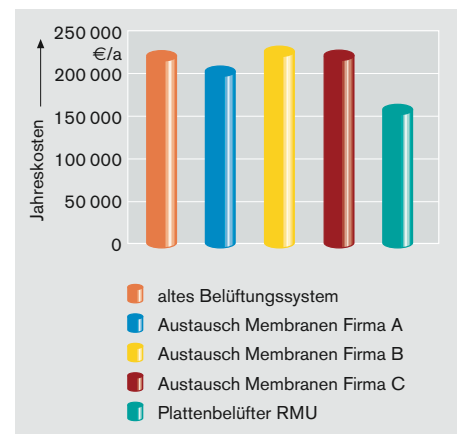
Veranlassung

Die durchgängig sichere Einhaltung der behördlich geforderten Ablaufqualität des Abwassers hat beim Kläranlagenbetrieb die oberste Priorität. Da die biologische Stufe mehr als 2/3 der gesamten Reinigungsleistung beeinflusst und dafür mindestens 70 % der benötigten Energie des gesamten Abwasserreinigungspro-

zesses verbraucht, kommt der Belüftungs- sowie der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik große Bedeutung zu. Auf der Grundlage der in hoher Dichte vorliegenden Betriebs- und Online-Analytik-Daten und der Daten aus dem Prozessleitsystem konnte festgestellt werden, dass die Leistungsfähigkeit und auch die Wirtschaftlichkeit der Belüftungstechnik nach 8 Jahren Dauerbetrieb stark nachgelassen hatte. Aufgrund der durchgeführten Leistungsmessungen war sogar zu befürchten, dass in naher Zukunft die erforderliche Reinigungsleistung nicht mehr aufrecht erhalten werden konnte. Überschreitungen der Überwachungswerte wären dann unvermeidbar gewesen.

Bauherrenvorgaben

Der ESi hatte deshalb ein auf diese Aufgabenstellung spezialisiertes Ingenieurbüro mit der Planung und Abwicklung der Modernisierung der Belüftungs- und MSR-Technik beauftragt. Angeregt durch verschiedene Publikationen (Energiehandbuch des MURL in NRW) und Gespräche mit anderen Betreibern sollte die Planung, Ausschreibung und Auswertung von dem Gedanken geprägt sein, das wirtschaftlichste System mit den nachweis-



BELÜFTUNGSSYSTEME: Bild 1
Vergleich der Jahreskosten

lich geringsten „Lebenszykluskosten“ zu finden.

Ausschreibung

Der Austausch der vorhandenen, verschlissenen Belüfterteller und die Wiederinbetriebnahme wurden öffentlich nach VOB ausgeschrieben. Darüber hinaus wurden jedoch ausdrücklich Sondervorschläge von Bietern zugelassen, die komplett andere, wirtschaftlich günstigere Belüftungssysteme zum Inhalt hatten. Um eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme herstellen zu können, wurden die für die Wirtschaftlichkeit ausschlaggebenden Kennzahlen wie

- jährlicher Sauerstoffverbrauch der Biologie
- spezifische Stromkosten bereits in der Ausschreibung angegeben und
- die garantierte Lebensdauer der Belüfterelemente, ggf. mit jährlichem Abminderungsfaktor
- die Effizienz der Belüfterelemente (Sauerstofftrag) und
- die zu erwartenden Wartungskosten abgefragt.

Um das Potenzial der neuen Belüftungstechnik voll ausschöpfen zu kön-

Stadt Siegen im Überblick:

Der Entsorgungsbetrieb



Der Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen – ESi – ist eine eigenbetriebsähnliche Einrichtung für Stadtentwässerung und Wasserbau. Mit 73 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern werden etwa 530 km Kanalnetz, 30 Sonderbauwerke und rund 155 km Wasserläufe betreut. Zusammen mit den beiden Kläranlagen des

Abwasserverbands Siegen-Mudersbach-Brachbach und des Zweckverbands Hütental-Netphen werden jährlich etwa 25 Mio. m³ Abwässer von bis zu 300.000 Einwohnern gereinigt. Mit einer Bilanzsumme von etwa 25 Mio. Euro/a investiert der ESi rund 6,5 Mio. Euro/a in die Unterhaltung und den Ausbau der Anlagen.

nen, sollte zusätzlich die zwischenzeitlich veraltete Online-Messtechnik mit Probenaufbereitung durch neue Analytoren für Ammonium $\text{NH}_4\text{-N}$, Nitrat $\text{NO}_3\text{-N}$ und Phosphor $\text{PO}_4\text{-P}$ ersetzt werden, und zwar ebenfalls nach dem Grundgedanken der Wirtschaftlichkeit. Hier waren die Eckwerte für

- die Dauer für Generierung der Messwerte
- die Messtoleranz des Systems
- die Probenaufbereitung
- die Handhabung der Technik mit Wartungs- und Reparaturaufwand
- Chemikalienverbrauch und -kosten
- einen „full-service-Vertrag“ für eine spätere Auswertung abzufragen.

Auswertung der submittierten Angebote

Die Wertung der Angebote erfolgte nach den „Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen“ der LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser). Sie umfasst die kompletten Jahreskosten, die mit dem Betrieb der Belüftungsanlage in Zusammenhang stehen und anlagen- bzw. firmenspezifisch sind.

Belüftungstechnik

Für die alternativen Belüftungssysteme wurden zahlreiche Referenzen kontaktiert, um die Garantiezusagen der Bieter, insbesondere hinsichtlich Nutzungsdauer und Wirtschaftlichkeit, zu verifizieren. Als wirtschaftlichste Ausführung mit den niedrigsten Jahreskosten wurde ein Sondervorschlag ermittelt, der ein komplett neues Belüftungssystem mit Plattenbelüftern vorsah (Bild 1).

Online-Messtechnik

Bei der Auswahl der neuen Online-Messtechnik wurden Insitu-arbeitende Nährstoffmessgeräte als die wirtschaftlichsten Systeme ermittelt. Hier ist zu erwähnen, dass die angebotenen Fabrikate durch teilweise monatelangen Versuchsbetrieb ihre Eignung und Leistungsfähigkeit vorab nachweisen mussten (Bild 2).

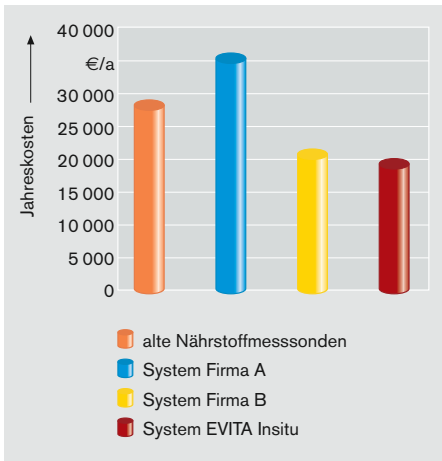
Fachplaner für die ESI

- **Kläranlagenplanung**
- **Kostenoptimiertes Bauen im Bestand**
- **Bauleitung**
- **Erschließungsplanung**
- **Regenwasser-
versickerung**



Büro Vahldorf
Bauernstr. 8a
39345 Vahldorf
Tel. 0 39 20 2/80 15 -1
Fax 0 39 20 2/80 15-8
vahldorf@inplangmbh.de

Büro Hameln
Hastenbecker Weg 2
31785 Hameln
Tel. 0 51 51/55 89 -0
Fax 0 51 51/55 89 -77
Hameln@inplangmbh.de



NÄHRSTOFFSONDEN: Bild 2
Vergleich der Jahreskosten

Projektentwicklung

Der Entsorgungsbetrieb hat eine Fachfirma für Klärwerkstechnik mit der Durchführung des Gesamtauftrags einschließlich der Projektentwicklung bis zur Abnahme und Dokumentation beauftragt. Nach der Auftragsvergabe wurde mit dem Hauptauftragnehmer und den Unterauftragnehmern ein Bau-



BLASENBILD: Bild 3
Der Plattenbelüfter nach der Montage



IM NACHKLÄRBECKEN: Bild 4
Einbau der NO₃-N-Nährstoffsonde

ablauf- und Terminplan erarbeitet und behördlicherseits abgestimmt. Nach diesem Plan war vorgesehen, die Systemumrüstung in den 3 Belebungsbecken mit einem Inhalt von je 9.700 m³ nacheinander von Januar bis Mitte April 2002 durchzuführen.

Aufgrund eines straffen Projekt- und Zeitmanagements durch das leitende Ingenieurbüro und kurzer Entscheidungswege zur Projektsteuerung des Bauherren, konnte die Maßnahme trotz Baufortschrittsverzögerungen durch Hochwasser, Frosteinbrüche und unerwartet große Sandablagerungen in den Belebungsbecken termingerecht fertiggestellt werden. Die behördlich festgelegten Überwachungswerte wurden während des Umbaus sicher eingehalten. Das parallele Kostenmanagement des Ingenieurbüros sorgte dafür, dass jederzeit der Überblick über den Kosten- und Leistungsstand des Projekts gegeben war. Die veranschlagten Kosten des Gesamtprojekts sind im Rahmen der beauftragten Summe geblieben, Unvorhergesehenes blieb dabei unberücksichtigt. Die gesamten Nebenarbeiten wie Beckenentleerung, -reinigung und -wiederinbetriebnahme wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Betrieb der Kläranlage Siegen durchgeführt.

Beschreibung der Ausrüstung

Rohrleitungstechnik

Der Hauptauftragnehmer hatte die gesamte vorhandene Rohrleitungs- und Belüftungstechnik aus den Belebungsbecken nacheinander auszubauen und jeweils anschließend die neuen Luftverteilerleitungen in hochwertigem Edelstahl zu installieren.

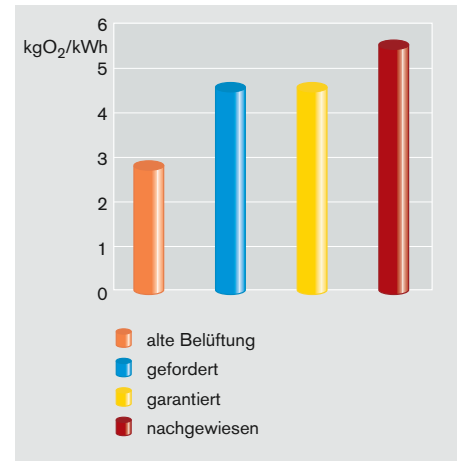
Die Plattenbelüfter wurden mit den firmeneigenen Montagekolonnen des Herstellers sehr zügig und routiniert installiert. Die reinen Demontearbeiten der alten Belüftungstechnik und die Montagearbeiten der neuen Belüftungstechnik wurden je Becken innerhalb von 2 bis 3 Wochen abgewickelt.

Belüftungssystem

Die Wirtschaftlichkeit der Belebungsstufe wird grundlegend bestimmt durch die Aggregate zur Druckluftherzeugung und die Belüfterelemente im Belebungsbecken.

Plattenbelüfter

In der Fachliteratur bekannt als „Plattenbelüfter aus Folienmaterial“ unterscheidet sich der hier eingesetzte Membranbelüfter von den weit verbreiteten Alternativprodukten, bekannt als Rohr-



PLATTENBELÜFTER: Bild 5
Energetische Effizienz

Teller- und Plattenbelüfter mit perforierter EPDM- bzw. Silikon-Membrane, in einigen wesentlichen Punkten:

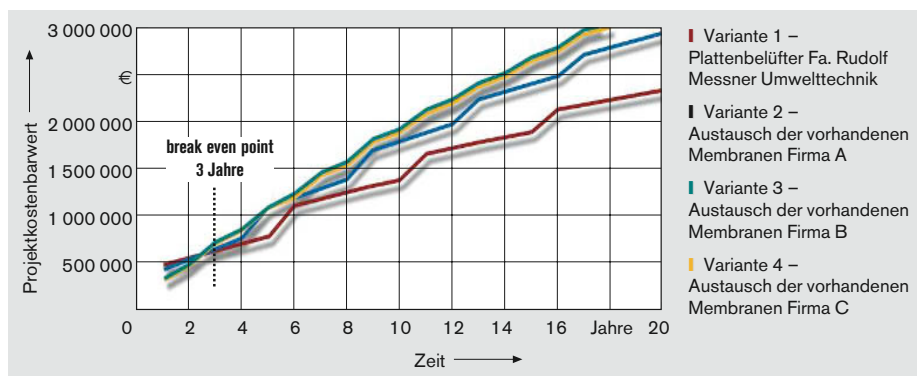
1. Die dauerelastische Membrane, eine Polyurethan-Folie mit gestochener Lochperforation, besitzt gegenüber den EPDM- bzw. Silikon-Membranen eine wesentlich größere Dehn- und Weiterreißfestigkeit und damit höhere Beständigkeit.
2. Durch die vollkommene Weichmacherfreiheit wird eine außerordentlich lange Betriebsfestigkeit erreicht. Diese Membranen sind teilweise seit mehr als 15 Jahren ohne Austausch im Einsatz.
3. Das Prinzip einer feinblasigen, großflächigen Belüftung, direkt vom Beckenboden ausgehend, mit einer bis zu einem Drittel der spezifischen Luftbeaufschlagung (etwa 20 Nm³/m²Bel.h) der Alternativprodukte, gewährleistet über den gesamten Regelbereich eine gleichmäßig effiziente Sauerstoffversorgung der aktiven Biomasse im Belebungsbecken.

Die oben erwähnten Eigenschaften der Membrane und ihre Montage auf einem Grundkörper aus korrosionsfestem Edelstahl in Verbindung mit dem Einsatz von sehr effizienten, langlebigen Turboverdichtern stellt für den Betreiber eine dauerhaft betriebsstabile Belüftungstechnik auf einem zudem ökonomisch sehr kostengünstigen Niveau dar und ermöglicht dadurch dem Betreiber Freiräume für weitere Aktivitäten (Bild 3).

Nährstoffsonden

Markantes Merkmal der hier eingesetzten Online-Messgeräte zur Steuerung der Sauerstoffeintragsleistung ist die Anordnung der Messgeräte direkt im Belebtschlamm der Belebungsbecken (Insitu).

Das hier verwendete colorimetrische Messprinzip, bei dem die zu messenden Ionen durch eine einzigartige Membra-



VERGLEICH:
Projektkostenbarwerte der angebotenen Belüftungssysteme

Bild 6

bereits bei der Erstausrüstung projiziert und eingebaut worden, hätte die Rentabilitätsschwelle bei 0 bis 2 Jahren gelegen.

Der Hersteller der Plattenbelüfter kann etwa 650 Referenzen im In- und Ausland aufweisen, davon einige mit mehr als 15-jähriger Betriebsdauer ohne Membranwechsel (Bild 6).

INSITU Online-Nährstoffgeräte

Die Betriebskosten der bestehenden Online-Messtechnik mit Probenstromaufbereitung sind über die letzten 4 Betriebsjahre ausgewertet und mit den Jahreskosten der neuen In-Situ-Messtechnik verglichen worden. Hier liegt die Rentabilitätsschwelle bei 4,5 Jahren; genauere Berechnungen sind aufgrund der Unvorhersagbarkeit der Reparaturmaßnahmen am Altbestand nicht vertrauenswürdig.

Die Entscheidung zu einem neuen System wurde hier auch unter anderen Aspekten wie Messgenauigkeit, Generationsdauer des Messwerts, Betriebsstabilität und Handhabung der Technik mit höherer Priorität als der Rentabilität getroffen (Bilder 7, 8).

Betriebliche Auswirkungen

Luftverdichtertechnik

Die Ergebnisse der Nachweismessungen für die Belüftung konnten in der Praxis bestätigt werden, da vor der Umrüstung im Regelbetrieb bis zu 2 Turboverdichter mit je 6.000 Nm³/h die Belegung mit Luft versorgten; seit Abschluss der Umrüstung reicht 1 Turboverdichter auch in Spitzenbelastungszeiten aus, um die erforderlichen Luftmengen zur Verfügung zu stellen.

Aufgrund dieser mehrmonatigen Betriebs Erfahrung werden die Maschinen zur Herstellung eines möglichst großen Regelbereichs für die optimale Luftversorgung der Biologie nach Maßgabe des Herstellers durch Umrüstung verkleinert. Damit werden die breiten Anpassungsmöglichkeiten der Verdichter an die neuen Leistungsparameter ausgeschöpft, um die größtmögliche Wirtschaftlichkeit anstreben zu können (Bild 9).

Betriebsstabilität

Durch die Erneuerung der Belüftungs- und Messtechnik konnte ein wesentlicher Beitrag zur betrieblichen Optimierung und zur sicheren Einhaltung der Überwachungswerte geleistet werden. Die positive Entwicklung zeigt sich beispielhaft an der Auswertung der CSB-Ablaufwerte aus der Betriebsanalytik

ne aus dem Medium in eine konditionierte Trägerflüssigkeit diffundieren, um hier nach der Reaktion photometrisch ausgewertet zu werden, hat einige überzeugende Vorteile:

Die Membrane als entscheidendes Bauteil verhindert sicher den Durchtritt von Bakterien oder Schlammteilchen, so dass Messwertverfälschungen nicht auftreten können.

Durch die entbehrliche Probenstromaufbereitung wird eine sehr kurze Generation der Analysenergebnisse (10 min.) erreicht.

Aus der Insitu-Messung resultieren geringe Wartungskosten durch die überschaubare Ersatzteilverhaltung und geringe Betriebskosten, da lediglich kartuschengebundene, standardisierte Chemikalien eingesetzt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Überwachung der kompletten Sensorik über das TMS-Modul mit Funkkontakt zum Hersteller einzurichten.

Das Bild 4 zeigt den Einbau der NO₃-N-Nährstoffsonde im Quellverteiler zur Nachklärung. Im Hintergrund ist die Verdichterstation zu sehen.

Ergebnisse

Nachweisführung

Die Nachweisführung der zugesagten Eigenschaften des neuen Systems, nämlich die Sauerstoffeintragsleistung in kg O₂/h und der Sauerstofftrag (Ökonomie,

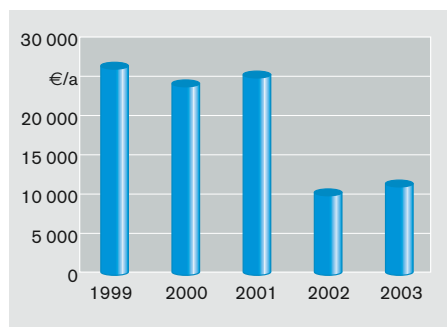
energetische Effizienz) in kg O₂/kWh, wurde vom Bauherrn an ein unabhängiges Labor vergeben und nach den einschlägigen Richtlinien der ATV (Merkblatt 209) durchgeführt. Die Parameter wurden in Abwasser ermittelt und ausgewertet. Zusätzlich wurde zur Bestimmung der Reinwasserwerte eine α -Wert-Bestimmung durchgeführt und der für kommunale Kläranlagen typische Wert 0,63 ermittelt.

Ergebnisse der Nachweisführung

Alle zugesagten Eigenschaften konnten von dem Nachweis führenden Labor bestätigt werden. Bemerkenswert ist der hohe Sauerstofftrag (Ökonomie) des neuen Belüftungssystems, der im nachfolgenden Diagramm vergleichend dargestellt wird. Nach Vorliegen der Messergebnisse konnte die Gesamtmaßnahme beanstandungsfrei abgenommen werden, zumal auch die komplette Rohrinstallation nicht zu bemängeln war. Da der Auftragnehmer eine 5-jährige Garantie für sein System abgegeben hat, wird die Messung der zugesagten Eigenschaften im Frühjahr 2007 zu wiederholen sein.

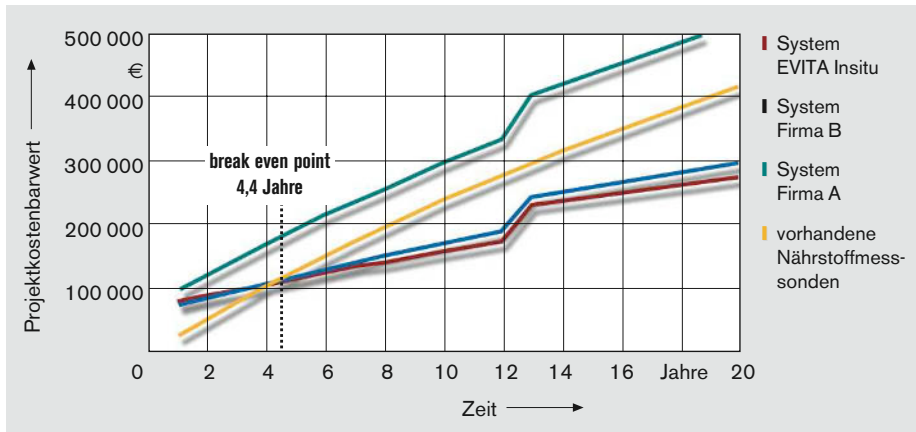
Rentabilität der Maßnahme Plattenbelüfter

Unter Berücksichtigung der eingegangenen Angebote für den reinen Teller-austausch und Weiterverwendung der restlichen Maschinenteknik lässt sich unter Einbeziehung der höheren Ökonomie der Plattenbelüfter eine Rentabilitätsschwelle von ca. 3 Jahren ermitteln, die im nachfolgenden Kostenverlaufdiagramm dargestellt ist. Durch die nachweislich deutlich längere Nutzungsdauer dieses Produkts mit fast gleichbleibenden Eigenschaften und der hohen Wirtschaftlichkeit ist der Systemwechsel für den Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen im Gegensatz zu den anderen Systemen rentabel gewesen. Wäre das ausgewählte System



ONLINE-MESSTECHNIK:
Jährliche Betriebskosten

Bild 7



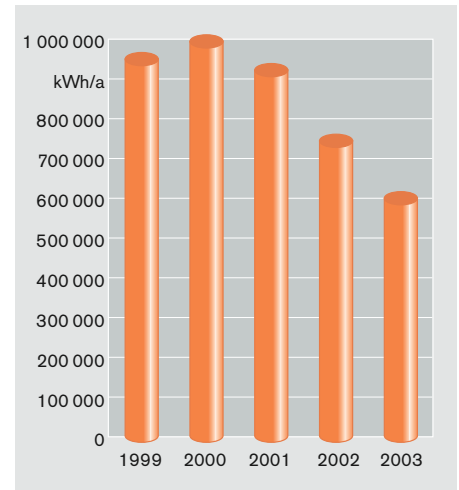
BEWERTUNG:
Projektkostenbarwerte der angebotenen Online-Messtechnik

Bild 8

nach Bild 10. Es ist zu erkennen, dass sich die Ablaufqualität von 1999 auf 2000 wesentlich verschlechtert hatte und von daher Handlungsbedarf bestand. Nach dem Umbau der Vorklärung Anfang 2001 hat sich die Häufigkeit der CSB-Ablaufwerte über 35 mg CSB/l wesentlich reduziert. Nach Fertigstellung der neuen Belüftungstechnik zum Ende März 2002 sind Werte über 40 mg CSB/l nicht mehr gemessen worden.

Abwasserabgabereduzierung nach § 4, Abs. 5 AbwAG

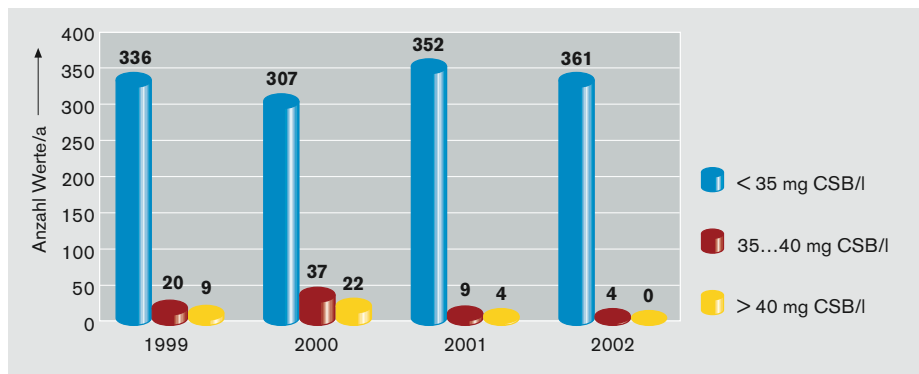
Unter diesen neuen Voraussetzungen hat sich der Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen erstmals nach fast 10jährigem Betrieb dazu entschlossen, die Ablaufwerte für CSB nach § 4, Abs. 5 AbwAG von 65 mg/l auf 40 mg/l niedriger zu erklären. Da die Abwasserabgabe unmittelbar und als wesentlicher Anteil in die Kalkulation der Abwas-



BELÜFTUNG:
Energieverbrauch

Bild 9

sergebühren eingeht und die Niedrigererklärung des CSB im Wesentlichen mit dem hier beschriebenen Maßnahmenpaket auf eine solide Erfolgsbasis gestellt werden konnte, wird dadurch die bereits beschriebene Rentabilitätsschwelle für die Belüftungstechnik auf deutlich unter 2 Jahre verkürzt.



AUSWERTUNG:
CSB-Ablaufwerte aus der Betriebsanalytik

Bild 10

Wirtschaftlichkeitsberechnungen etwa 80.000 Euro/a langfristig gespart worden.

Die größten Auswirkungen auf die Kostensituation und damit auf die Abwassergebühren hatten aber die Reduzierung der jährlichen Abwasserabgabe durch Niedrigerklärung der Ablaufwerte und die Verrechnung der Abwasserabgabe mit den Investitionen, weil die Kläranlage eine um 29 % geminderte Fracht seit der Verbesserung des Primärschlammabzugs aus der Vorklärung und der Erneuerung der Belüftung in den Vorfluter emittiert. Dieses Ergebnis wäre aber sicherlich auch mit den alternativ angebotenen Produkten erzielt worden.

Die durch Niedrigerklärung eingesparte Summe von etwa 95.000 Euro/a und die Rückerstattung der Abwasserabgabe der letzten 3 Jahre von etwa 960.000 Euro, über 10 Jahre Abschreibungsdauer kapitalisiert zu 100.000 Euro/a, addieren sich zu den Einsparungen bei den Kapital- und Betriebskosten zu 275.000 Euro/a. Dieser Betrag wird schließlich gebührenrelevant in der Größenordnung von 1,25 % (= 2,5 Ct/m³).

Jedem Betriebsverantwortlichen kann aufgrund der vorliegenden Untersuchungen empfohlen werden, Wirtschaftlichkeitsanalysen (qualifizierte Ermittlung der Lebenszykluskosten) für diejenigen Funktionseinheiten durchzuführen, die neben den Investitionskosten auch erhebliche Betriebskosten auslösen, um einen kostenoptimierten Kläranlagenbetrieb sicherzustellen.

Beteiligte Firmen

Der Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen möchte sich an dieser Stelle bei den beteiligten Firmen für die kompetente Beratung und die reibungslose Realisierung des Projekts bedanken.

Verrechnung der Abwasserabgabe mit Investitionen nach § 10, Abs. 3 AbwAG

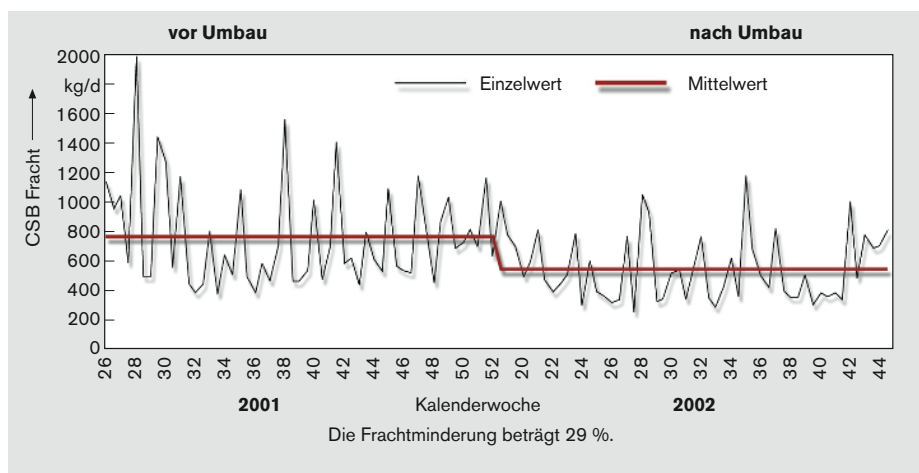
Gemäß § 10, Abs. 3 des Abwasserabgabengesetzes (AbwAG) eröffnet der Gesetzgeber die Möglichkeit, Investitionen des Betreibers in Maßnahmen zur Verbesserung der Ablaufqualität der Anlage mit den gezahlten Abwasserabgaben rückwirkend zu verrechnen. Bedingung ist, dass antragsgemäß eine Schadstoffreduzierung um mindestens 20 % nach der Inbetriebnahme der Maßnahme bei mindestens 1 Parameter über einen Zeitraum von 6 Monaten gegenüber dem Zeitraum davor nachgewiesen werden kann. Die Kläranlage Siegen hat zwischen dem 2. Halbjahr 2000 und dem Mai bis Oktober 2002 eine Frachtreduzierung für den Parameter CSB um 29 % erreicht und damit die Verrechnungskriterien erfüllt. Die Maßnahme des Umbaus des Primärschlammabzugs aus der Vorklärung, die zeitlich vor der Erneuerung der Belüftungstechnik abgewickelt wurde, und diese Maßnahmen führen zur vollständigen Rückerstattung der Abwasserabgabe von 1999 bis 2001, so dass die Projektkosten beider Maßnahmen dadurch fast

vollständig refinanziert werden konnten (Bild 11).

Fazit

Der Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen musste aufgrund der nachlassenden Leistungsfähigkeit der Belüfterelemente und der zunehmenden Kostenintensität der Online-Geräte Maßnahmen ergreifen, um Überschreitungen der Überwachungswerte dauerhaft und sicher zu verhindern. Obwohl die Energiekosten für die Belüftung der Belebungsbecken nur mit etwa 0,4 % (= 0,7 Ct/m³) die Abwassergebühren bestimmen, hatte sich der ESI zum Ziel gesetzt, das Belüftungssystem und die Online-Messtechnik nach möglichst niedrigen „Lebenszykluskosten“ auszuwählen.

Bei den laufenden Kosten konnten etwa 30.000 Euro/a Stromkosten und rund 15.000 Euro/a Unterhaltungskosten für die Online-Messungen eingespart werden. Durch den Einkauf von sehr hochwertigen und langlebigen Produkten (Absicherung durch langfristigen Wartungsvertrag) ist zusätzlich der Kapitaldienst für die Ausrüstung der Belebungsbecken langfristig um etwa 35.000 Euro/a gesunken. Insgesamt sind als Folge aus den



WERTE FALLEN:
CSB-Ablauffracht der Kläranlage Siegen

Bild 11

KONTAKT

Judith PATT
Dipl.-Ing. Karl-Hermann SÖHNGEN
c/o Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen
Goldammerweg 30, 57080 Siegen
Tel.: 0271/3145-5 · Fax: 0271/3145-680
E-Mail: j_patt@esi-siegen.de
E-Mail: h_soehngen@esi-siegen.de
Internetadresse: www.esi-siegen.de

LITERATUR

- /1/ MUNLV NRW: Handbuch „Energie in Kläranlagen“, September 1999
- /2/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) „Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen“ 5. Auflage 1994