



Einsatz einer Anlage zur Spurenstoffelimination unter Berücksichtigung vorhandener technischer Anlagenressourcen auf der Kläranlage Duisburg-Hochfeld

Kurzbericht der Machbarkeitsstudie



Impressum

Auftraggeber: **Wirtschaftsbetriebe Duisburg AöR**

Auftragnehmer: **Grontmij GmbH**

Postfach 30 01 06
50771 Köln

Graeffstraße 5
50823 Köln

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Christian Maus, M.Sc., Dr.-Ing. Heinrich Herbst, Dipl.-Ing. Ralf Hilbig

Laboranalytik: **Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)**

Bliersheimer Straße 58 - 60
47229 Duisburg

Dr. rer. nat. Jochen Türk, Andrea Börgers, M.Sc.

Projektnummer: 0161-13-006

Bearbeitungszeitraum: Oktober 2013 – April 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	1
2	Spurenstoffscreening und Ozonzehrungspotential des Kläranlagenablaufes	2
3	Potenziale zur Spurenstoffelimination durch Maßnahmen zur Verfahrens- und Energieoptimierung	3
4	Verfahren zur Spurenstoffelimination	8
5	Zusammenfassung der Kosten	10
6	Technische Verfahrensempfehlung	11

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Lageplanausschnitt Kläranlage Duisburg Hochfeld – Integration Ozonanlage	9
---	---

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Hydraulische Bemessungswerte	3
Tabelle 3-2: Verfahrenstechnik der biologischen Stufe und Schlammbehandlung	4
Tabelle 3-3: Volumen für die biologische Reinigung mit und ohne Vorklärung	6
Tabelle 3-4: Übersicht der Varianten zur Umstellung des Belebungsverfahrens mit erforderlichem Trockensubstanzgehalt in den Belebungsbecken	6
Tabelle 3-5: Energiebedarf für die Belebungsbecken im Ist-Zustand und für die Varianten	7
Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der Investitions- und Kapitalkosten und Reduzierung der laufenden Kosten sowie die Jahreskostenreduzierung im Vergleich zum Ist-Zustand	10
Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der Investitions- und Kapitalkosten und der laufenden Kosten sowie die Jahreskostenreduzierung für die Spurenstoffelimination	10
Tabelle 6-1: Bewertung der Variante zur Verfahrensumstellung der Belebung	12

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Analytikergebnisse
Anlage 2	klärtechnische Berechnungen (design2treat®)
Anlage 3	Investitionskosten (Vorklärung, MÜSE, BHKW, Belebung)
Anlage 4	Investitionskosten (Ozonung und Optimierung der Nachklärung)

1 Veranlassung

Zur langfristigen Sicherung einer hohen Wasserqualität besteht grundsätzlich Handlungsbedarf zur Reduktion der Einträge von Spurenstoffen in Gewässer. In den letzten Jahren konnte die Ökotoxizität einer Vielzahl von Mikroverunreinigungen (Spurenstoffen) in der Umwelt nachgewiesen werden. Die Spurenstoffproblematik liegt darin begründet, dass persistente Arzneimittel, organische Spurenstoffe und Industriechemikalien nur in begrenztem Maße während der biologischen Behandlung im Abwasserreinigungsprozess eliminiert werden können und deshalb im Ablauf der Kläranlagen noch nachweisbar sind. Eine weitgehende Verbesserung der Ablaufqualität bzw. Elimination der Spurenstoffe ist durch weitergehende (additive) Maßnahmen realisierbar. Hierzu haben sich die Techniken der Ozonung und der Aktivkohleadsorption als am besten umsetzbare Techniken herauskristallisiert.

NRW setzt bei dem Thema der Spurenstoffelimination auf einen ganzheitlichen Ansatz auf unterschiedlichen Ebenen. Spurenstoffe sollen, wenn möglich, direkt an der Quelle eliminiert werden. Zudem sollen aber auch die Kläranlagen ausgebaut und die Trinkwasseraufbereitungstechnik modernisiert werden (euwid Wa Nr. 45, 09.11.2010). Das Umweltministerium des Landes NRW fördert derzeit dazu durch das Investitionsprogramm Abwasser NRW u. a. großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination.

Das Einzugsgebiet der Kläranlage Duisburg Hochfeld und damit das zufließende Abwasser ist überwiegend kommunal geprägt. Im Einzugsgebiet der Kläranlage sind als Indirekteinleiter drei Krankenhäuser mit insgesamt 1.298 Betten, drei Seniorenheime sowie einige Industriebetriebe z. B. aus der Metall- und chemischen Industrie vorhanden.

Aufgrund der derzeitigen Auslastung der Kläranlage Duisburg Hochfeld ist es erforderlich, insbesondere unter energetischen Gesichtspunkten, Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Verfahrenstechniken in der Abwasser- und Schlammbehandlung zu entwickeln und zu planen. Gleichzeitig kann hierdurch ermöglicht werden, kostengünstig eine vierte Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination in die Anlage zu integrieren. Anbieten könnte sich hierzu eine der Nachklärung nachgeschaltete Abwasser-ozonung, da auf der Anlage bereits Rein-Sauerstoff vorhanden ist, der derzeit genutzt wird, um die biologische Stufe mit Sauerstoff zu versorgen (Rein-Sauerstoff-Begasung). Im Rahmen erforderlicher energetischer und verfahrenstechnischer Optimierungen in einzelnen Verfahrensschritten, ist daher die Einbindung einer derartigen Technologie unter energetischen und monetären Gesichtspunkten im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu diskutieren.

2 Spurenstoffscreening und Ozonzehrungspotential des Kläranlagenablaufes

Zur Charakterisierung der Spurenstoffbelastung des Ablaufs der Kläranlage Duisburg-Hochfeld ist ein Screening des Ablaufs der Kläranlage an 2 Tagen auf Spurenstoffe unter anderem aus den Gruppen Arzneimittelwirkstoffe, Pestizide, Röntgenkontrastmittel, Industriechemikalien, endokrine Substanzen und der polyfluorierten Verbindungen mittels LC-MS/MS und GC-MS durchgeführt worden. Auch für die Auslegung der weitergehenden Maßnahmen relevante Basisparameter sind im Screening des Ablaufs betrachtet worden. Des Weiteren ist die endokrine Belastung des Abwassers mittels wirkungsbezogener Analytik (A-YES) erfasst worden. Insgesamt wurden ca. 120 Stoffe im Screening erfasst. Anhand des Screenings wurden Leitparameter für ein fünftägiges Monitoring ausgewählt. Eine detaillierte Aufstellung kann der Langfassung der Machbarkeitsstudie entnommen werden.

Die Ergebnisse der Leitparameter aus Screening und Monitoring zeigen, dass die gemessenen Konzentrationen sich im üblichen Schwankungsbereich für nicht weitergehend behandelte Kläranlagenabläufe befinden. Die Konzentrationen liegen für einige Stoffe deutlich über den Orientierungswerten bzw. Umweltqualitätsnormen gemäß D4 Liste, die zur Bewertung von Oberflächengewässern herangezogen werden.

Der für eine Ozonung relevante Parameter Bromid, der die Ausgangssubstanz des potentiell kanzerogenen Bromats ist, zeigt ein Schwankungsbereich von 70 bis 150 µg/L auf. Die gemessenen Bromidkonzentrationen sind grundsätzlich für eine oxidative Behandlung mit Ozon als unproblematisch zu bewerten.

Es wurden Ozonzehrungsversuche zur Abschätzung des erforderlichen Reaktionsvolumens und der Leistungsfähigkeit der Ozonung des Abwassers durchgeführt. Ozonprofile wurden bei einer Zugabe von 5, 7,5 und 10 mg O₃/L erstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Dosierung von 10 mg O₃/L nach ca. 6 min kein gelöstes Ozon in der wässrigen Phase mehr vorhanden ist. Bei niedrigerer Dosierung verkürzt sich die Dauer. Für eine effiziente Nutzung des Ozons für den Standort Duisburg-Hochfeld sollte eine minimale Aufenthaltszeit von mindestens 6 min gewährleistet sein.

Fazit

Eine Ozonung ist im Ablauf der Kläranlage Duisburg-Hochfeld einsetzbar. Eine Vielzahl der Spurenstoffe, wie z. B. Diclofenac und Carbamazepin, können weitestgehend mit einer Ozonung eliminiert werden. Einige Stoffe, wie z. B. Röntgenkontrastmittel sind jedoch auch mit einer Ozonung kaum zu eliminieren, sodass hierfür anderweitige Maßnahmen ergriffen werden müssten.

Mit einer Bromidausgangskonzentration von bis zu 150 µg/L und einer erhöhten Bromatbildung beim Einsatz von 10 mg O₃/L ist die Bromatbildung im späteren Betrieb bei vergleichbaren Randbedingungen zu beobachten. Bei den in der Regel niedrigeren Bromidkonzentration und der im späteren Betrieb erforderlichen geringeren Ozondosis ist das Erreichen einer kritischen Bromatkonzentration jedoch unwahrscheinlich. Als Gegenmaßnahme kann bei einer ggf. zu hohen Bromatbildung eine Zugabe von Wasserstoffperoxid in den Ozonungsprozess erfolgen.

3 Potenziale zur Spurenstoffelimination durch Maßnahmen zur Verfahrens- und Energieoptimierung

Die Kläranlage Duisburg-Hochfeld ist in den letzten Jahren aufgrund des Rückgangs des industriellen Anteils unterbelastet betrieben worden. Aus der geringen Belastung der Kläranlage resultieren Potenziale zur Betriebsoptimierung und zur Reduzierung des Energieverbrauchs mit denen die Integration einer Anlage zur Spurenstoffelimination verfahrenstechnisch und wirtschaftlich kombiniert werden können.

Beschreibung des IST-Zustandes

Die Kläranlage Duisburg-Hochfeld wurde in fünf Bauabschnitten bis Mitte der 1990iger Jahren zu einer biologischen Kläranlage ausgebaut. Im letzten Bauabschnitt V wurde die Kläranlage durch eine umfangreiche Erweiterung hinsichtlich der Stickstoff- und Phosphorelimination auf die Anforderungen der Rahmenabwasserverordnung ausgebaut.

Nach den Ergebnissen eines Intensivmessprogrammes wurde im Jahr 2009 die Kläranlage nachbemessen und die Außerbetriebnahme einer Belebungsstraße im Genehmigungsentwurf nach § 58 (2) LWG beantragt und genehmigt [3]. Im Ergebnis des Intensivmessprogrammes konnte festgestellt werden, dass der BSB₅ basierende und für die Einordnung der Anlage wesentliche Anschlusswert bei ca. 76.000 EW liegt und damit deutlich unter dem Bemessungswert von 92.000 EW. Die Anlage ist somit unterbelastet.

Die Kläranlage Duisburg-Hochfeld wurde im Bauabschnitt V hydraulisch auf Basis der folgenden Bemessungswerte dimensioniert. Abweichend davon konnte aufgrund der Ergebnisse des Intensivmonitorings eine höhere Tageswassermenge angesetzt werden.

Tabelle 3-1: Hydraulische Bemessungswerte [2]

Art des Zuflusses	Wassermenge
Tageswassermenge $Q_{d,85}$	23.000 m ³ /d (aus Intensivmonitoring, ursprünglich 21.600 m ³ /d)
Trockenwetterzufluss Q_t	1.350 m ³ /h = 375 L/s
Mischwasserzufluss Q_m	2.700 m ³ /h = 750 L/s

Gegenwärtig wird die Kläranlage Duisburg-Hochfeld nach dem Verfahren der vorgeschalteten Denitrifikation betrieben. Die biologische Stufe besteht aus einer vierstraßigen sauerstoffbegasten Biologie, wovon zurzeit drei Straßen betrieben werden und einer nachgeschalteten zweistraßigen druckluftbegasten Belebung. Die sauerstoffbegasten Becken sind vollständig abgedeckt und werden aus der Sauerstoffpipeline des Ruhrgebietes versorgt. Beide Belebungsbeckeneinheiten sind in Zonen zur Denitrifikation und zur Nitrifikation unterteilt. Zur Trennung des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches sind drei runde Nachklärbecken vorhanden.

Die verfahrenstechnisch relevanten Hauptabmessungen sind tabellarisch in der Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Verfahrenstechnik der biologischen Stufe und Schlammbehandlung

Anlagenteil	Technische Daten - Kennwerte
Anaerobes Mischbecken	Gesamtvolumen: 4.846 m ³ , Wassertiefe: 4,16 m
Belebungsbecken (sauerstoffbegast)	4 Straßen à 1.696 m ³ - je Straße ; <i>davon derzeit eine Straße außer Betrieb</i> 1 Deni-Einheit à 684 m ³ 1 Deni/Nitri-Einheit à 253 m ³ und 3 Nitri-Einheiten à 253 m ³ Gesamtvolumen 6.784 m³ , davon 5.088 m ³ in Betrieb Wassertiefe t = 3,5 m Reinsauerstoffbegasung (LINDOX)
Belebungsbecken (druckluftbegast)	2 Straßen à 4.461 m ³ - je Straße 4 Nitri-Einheiten à 884 m ³ 1 Deni/Nitri-Einheit à 925 m ³ Gesamtvolumen 8.922 m³ Wassertiefe t = 5,4 m
Fällmittellager- und -dosierstation	Fällmittel FeClSO ₄ , 1 Lagertank à 30 m ³ Dosierstelle Zwischenhebewerk
Nachklärbecken	3 Nachklärbecken à 2.932 m ³ Durchmesser D= 36,0 m Randwassertiefe h = 3,0 m 2-seitiger Überfall Gesamtvolumen 8.796 m ³ Saugräumer – horizontale Sohle
Voreindicker	3 Voreindicker, Gesamtvolumen 690 m ³
Masch. Überschussschlammeindickung	nicht vorhanden
Faulbehälter	2 Faulbehälter, Gesamtvolumen 3.000 m ³
Nacheindicker	3 Nacheindicker, Gesamtvolumen 690 m ³
Maschinelle Schlammwässerung	2 Zentrifugen à 10 m ³ /h

Maßnahmen zur Verfahrens- und Energieoptimierung

Auf Grundlage des Ist-Zustandes der Kläranlage wurden darauf aufbauend mögliche Maßnahmen zur Betriebsoptimierung und zur Reduzierung des Energiebedarfs ausgearbeitet. Dabei wurden insbesondere Erkenntnisse aus bereits existierenden Studien berücksichtigt und eingearbeitet. Die wesentlichen ergänzenden Maßnahmen zur Optimierung und Implementierung einer Spurenstoffelimination sind:

- Integration einer Vorklämung in den Klärprozess nach [4]. Dadurch wird die biologische Stufe entfrachtet und es kann freiwerdendes Belebungsvolumen zur Integration einer Anlage zur Spurenstoffelimination genutzt werden. Aus dem energiereichen Primärschlamm wird nach der Faulung in einem neu zu installierenden BHKW elektrische Energie für die Spurenstoffelimination bereitgestellt. Bisher eingesetztes Erdgas zur Wärmeversorgung wird durch die Wärmeerzeugung im BHKW mit dem Faulgas substituiert.
- Neukonzeption und Nachbemessung der biologischen Reinigungsstufe unter Berücksichtigung der durch die Vorklämung weiter sinkenden stofflichen Belastung und energetischen Optimierung. Grundsätzlich wird hierbei die in der Energetischen Feinanalyse (PFI, 2012) vorgeschlagene Verfahrensumstellung auf eine intermittierende Denitrifikation alternativen energetischen Ertüchtigungsmaßnahmen gegenübergestellt. Dabei wird eine Abkehr der zurzeit eingesetzten Sauerstoffbegasung zur Druckluftbegasung untersucht.

- Die Leistungsfähigkeit der mechanischen Voreindicker begrenzt die ÜSS-Entnahme und führt aufgrund hoher Feststoffgehalte und eines hohen Schlammalters zur aeroben Stabilisierung in der Biologie. Die aerobe Stabilisierung in der Biologie erfordert zusätzliche Belüftungsenergie und vermindert zudem den Gas- bzw. Energieertrag aus der Faulung des ÜSS. Die höheren ÜSS-Schlammengen erfordern ferner einen größeren Wärmeeinsatz und reduzieren die Aufenthaltszeit in der Faulung mit der Konsequenz eines geringen Gasertrages. Durch die Einbeziehung einer maschinellen ÜSS-Eindickung kann der Feststoffgehalt in der Biologie eingestellt werden. Der Nutzen für die Spurenstoffelimination ist eine geringere Auslastung der Nachklärung und damit eine weitere Effizienzsteigerung bei geringem Energieeinsatz. Ferner werden die Energiereduzierungspotenziale für die Spurenstoffelimination nutzbar gemacht.

Neben dem Maßnahmenpakt zur Integration einer Vorklärung, einer maschinellen Überschussschlammendickung und eines BHKW wurden verschiedene Varianten zur Verfahrensumstellung der Belebung nach Integration einer Vorklärung entwickelt, da durch die Integration einer Vorklärung zukünftig weniger Belebungsbeckenvolumen erforderlich sein wird. Im Wesentlichen wurden zwei Hauptvarianten zur Verfahrensumstellung der Belebung betrachtet:

Variante 1: Intermittierende Denitrifikation

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Beckenvolumina und –geometrie, ist die intermittierende Denitrifikation für eine Verfahrensumstellung besonders hervorzuheben. Im Gegensatz zur vorgeschalteten Denitrifikation bedarf die intermittierende Denitrifikation keiner Rezirkulationswasserführung und keiner permanenter Umwälzung der Denitrifikationsräume. Für die intermittierende Belüftung sind eine flächendeckende Belüftung der Biologie und eine Erhöhung der spezifischen Belüftungsleistung erforderlich. Durch eine Neuinstallation eines energetisch günstigeren Belüftungssystems können weitere Energiepotenziale gehoben werden.

Variante 2: Umrüstung der sauerstoffbegasten Becken zur vorgeschalteten Denitrifikation

Die zwei vorhandenen Beckeneinheiten der sauerstoff- und druckluftbegasten Belebung lassen sich sehr gut als getrennte Denitrifikations –und Nitrifikationsbecken betreiben. Grundüberlegung ist, dass das zurzeit sauerstoffbegaste Becken mit einer Wassertiefe von 3,50 m für eine Umrüstung auf eine effiziente Druckluftbelüftung sehr flach ist. Es eignet sich jedoch als vorgeschaltetes Denitrifikationsbecken. Das druckluftbegaste Becken weist mit einer Einblastiefe von 5,20 m gute Voraussetzungen für den energieeffizienten Sauerstoffeintrag mittels Druckluft auf, sodass dieses Becken weitestgehend für die Nitrifikation genutzt wird.

Im Auszug aus dem Programm Design2treat[®] (Tabelle 3-3) werden die Bemessungswerte und Ergebnisse der Berechnung nach A 131 [1] zusammengefasst. Die vollständigen Daten sind der Langfassung der Machbarkeitsstudie zu entnehmen.

Die Berechnungen zeigen, dass das zurzeit genutzte Belebungs-volumen (14.010 m³) bereits heute nicht voll ausgenutzt wird und zusammen mit dem Anaerobbecken sich für den IST-Zustand bereits eine deutlich Reserven in Höhe von 4.790 m³ beim Gesamtbeckenvolumen ergibt. Im Anaerobbecken steht auch nach Integration einer Vorklärung ausreichend Volumen zur biologischen Phosphorelimination zur Verfügung.

Nach Integration einer Vorklärung ist für beide Varianten ein geringeres Belebungs-volumen erforderlich als ohne Vorklärung. Aus der Differenz von vorhandenem und berechnetem Volumen resultiert die Reserve und damit das Nutzungspotenzial für eine Spurenstoffelimination. Es kann demnach mindestens eine weitere Straße der sauerstoffbegasten Belebung außer Betrieb genommen und für die Spurenstoffelimination genutzt werden.

Tabelle 3-3: Volumen für die biologische Reinigung mit und ohne Vorklärung

Beckenvolumen		IST-Zustand	Variante 1a	Variante 2a	Differenz		Differenz	
		Vorgeschaltete Denitrifikation	Intermittierende Denitrifikation	Vorgeschaltete Denitrifikation	Variante 1 - Ist-Zustand		Variante 2 - Ist-Zustand	
		ohne Vorklärung	mit Vorklärung	mit Vorklärung	absolut	[%]	absolut	[%]
		[m³]	[m³]	[m³]				
Anaerobbecken	vorhanden	4.264	3.264	3.264				
	berechnet	2.697	2.603	2.211				
Vorklärung		keine	1.000	1.000				
Denitrifikation	ber. T=12°C	1.675	3.429	1.652	1.754	105%	- 23	-1%
	vorh. von bis	2.052						
		4.661						
Nitrifikation	ber. T=12°C	9.112	6.986	7.193	- 2.126	-23%	- 1.919	-21%
	vorh. von bis	9.349						
		11.958						
Deni- und Nitrifikationsvolumen	berechnet	10.787	10.415	8.845	- 372	-3%	- 1.942	-18%
	vorhanden	14.010						
Gesamtvolumen	vorhanden	18.274						
	berechnet	13.484	13.018	11.056	- 466	-3%	- 2.428	-18%
	Reserve	4.790	5.256	7.218				

Auf Grundlage der klärtechnischen Berechnung wurden verschiedene Nutzungs- und Umbauvarianten der vorhandenen Becken entwickelt. In Tabelle 3-4 wird eine Übersicht zur Nutzung der vorhandenen Becken der weiterbetrachteten Varianten gegeben. Berücksichtigt ist hierbei, dass zwei Straßen der sauerstoffbegasteten Belebung für die Anlage der Spurenstoffelimination genutzt werden.

Tabelle 3-4: Übersicht der Varianten zur Umstellung des Belebungsverfahrens mit erforderlichem Trockensubstanzgehalt in den Belebungsbecken

Variante	Verfahren	TS _{BB} (g/L)	Anaerobes Mischbecken		Druckluftbegaste Belebungsbecken 8.922 m³ (9.895 m³)	Sauerstoffbegaste Belebungsbecken 1.696 m³ je Straße
			Innenring 1.000 m³	Außenring 3.264 m³		
1a	intermittierende Denitrifikation	2,9	Vorklärung	Bio-P	D/N	D/N (2 Straßen)
1b		3,6		Bio-P	D/N (WSP +0,6 m)	Reserve (2 Straßen)
2a	vorgeschaltete Denitrifikation	2,9		Bio-P	D/N (Kammer 1) N (Kammer 2-5)	D (1 Straße) Reserve (1 Straße)
2b		3,1		Bio-P	D/N (Kammer 1) N (Kammer 2-5) (WSP +0,6 m)	Reserve (2 Straßen)

In Tabelle 3-5 ist der Energiebedarf des Ist-Zustands und der Varianten zusammengestellt. Durch die Umstellung des Belebungsverfahrens sinkt der Sauerstoffbedarf und der Bezug von Reinsauerstoff kann entfallen.

Tabelle 3-5: Energiebedarf für die Belebungsbecken im Ist-Zustand und für die Varianten

Energiebedarf Belebungsbecken	IST-Zustand Vorgeschaltete Denitrifikation	Variante 1a		Variante 1b		Variante 2a		Variante 2b	
		Intermittierende Denitrifikation		Vorgeschaltete Denitrifikation					
	ohne Vorklärung	mit Vorklärung		mit Vorklärung		mit Vorklärung		mit Vorklärung	
Sauerstofftrag [kgO ₂ /kWh]		2,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Sauerstoffbedarf bei T=12°C [kgO ₂ /d]	10.880	9.264	9.264	9.264	9.006	9.006	9.006	9.006	9.006
mittlerer Sauerstoffbedarf *) [kgO ₂ /d]	8.160	6.948	6.948	6.948	6.755	6.755	6.755	6.755	6.755
Energiebedarf Belüftung [kWh/a]	1.566.945	1.268.010	1.152.736	1.152.736	1.120.633	1.120.633	1.120.633	1.120.633	1.120.633
O ₂ -Äquivalent [kWh/a]	1.000.000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rührwerke [kWh/a]	204.809	-	-	-	29.714	36.013	29.714	36.013	36.013
Rezirkulation [kWh/a]	231.514	-	-	-	231.514	34.989	231.514	34.989	34.989
Summe Energiebedarf [kWh/a]	3.003.268	1.268.010	1.152.736	1.152.736	1.381.861	1.191.635	1.381.861	1.191.635	1.191.635
Reduzierung gegenüber Ist-Zustand [kWh/a]	-	1.735.258	1.850.532	1.850.532	1.621.407	1.811.633	1.621.407	1.811.633	1.811.633

*) Annahme: 75 % des Sauerstoffbedarfs aus der klärtechnischen Berechnung (abgemindert im Verhältnis Mittelwert/T85)

Fazit

Durch die Integration einer Vorklärung im vorhandenen Anaerobbecken und der Verfahrensumstellung der Belebung werden Ressourcen für die Spurenstoffelimination erschlossen:

- Das notwendige Belebungsvolumen wird reduziert und es kann somit vorhandenes Beckenvolumen zur Spurenstoffelimination genutzt werden.
- Durch einen höheren Einstau der druckluftbegasten Belebungsbecken kann zusätzliches Volumen aktiviert werden.
- Der Energiebedarf einer Ozonanlage zur Spurenstoffelimination kann durch einen höheren Gasertrag durch die Integration einer Vorklärung und Verstromung des Faulgases in einem BHKW ausgeglichen werden. Ferner wird der Sauerstoffbedarf gesenkt, sodass weniger Energie zur Belüftung erforderlich ist.
- Grundsätzlich kann bei einer gleichzeitigen Optimierung der Nachklärung auf alle vier Becken der sauerstoffbegasten Belebung für die biologische Abwasserbehandlung verzichtet werden, wodurch sich weitere Einsparungen bei den Energie, Wartungs- und Instandhaltungskosten realisieren lassen und Kapazität für die Spurenstoffelimination geschaffen wird.

4 Verfahren zur Spurenstoffelimination

Auf der Kläranlage Duisburg-Hochfeld sind folgende für die Maßnahmenwahl relevante Rahmenbedingungen gegeben:

- Es ist bereits eine Rein-Sauerstoff-Versorgung vorhanden, die zur Ozonerzeugung genutzt werden kann.
- Ein nicht mehr benötigtes abgedecktes Becken der vorhanden sauerstoffbegasten Belebung bietet günstige Voraussetzung zur Nutzung als Ozonreaktionsbecken.
- Es ist kein Flockungsfilter vorhanden, der für eine Behandlung mit PAK oder GAK genutzt werden könnte.
- Die beengten Platzverhältnisse der Kläranlage erlauben keine flächenbeanspruchenden Neubauten

Aufgrund dieser Randbedingungen und der in Kapitel 2 beschriebenen Screeningergebnisse und Ozonzehrungsversuche wurde im Rahmen der Machbarkeitsstudie nur die Ozonung als Behandlungsverfahren näher betrachtet.

In Abbildung 4-1 ist die mögliche Integration einer Ozonanlage auf der Kläranlage Duisburg Hochfeld dargestellt. Durch die Verfahrensumstellung der Belebung stehen für die Spurenstoffelimination die dritte und vierte Straße der sauerstoffbegasten Belebungsbecken mit einem Beckenvolumen von 2 x 1.696 m³ zur Verfügung. Es ist geplant, beide Straßen für einen zweistraßigen Aufbau der Ozonanlage zu nutzen.

Jede Beckenstraße wird in zwei Bereiche unterteilt. Zuerst finden in der Zulaufleitung der Eintrag und die Mischung von Ozon in das Abwasser statt. Das Ozon reagiert in der Zulaufleitung und dem anschließenden Kontaktreaktor mit den Abwasserinhaltsstoffen.

Im zweiten Beckenbereich findet die biologische Nachbehandlung des ozonierten Wassers statt. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden folgende Varianten betrachtet.

- **Variante N1:** Nutzung des Volumens als „Nachreaktionsbecken“ und Untersuchung der Ökotoxizität im Ablauf der Anlage mit der Option eine biologische Nachbehandlung nachzurüsten
- **Variante N2:** Biologisches Wirbelbett (KA Duisburg Vierlinden)
- **Variante N3:** Biologisches Festbett mit Füllkörpern

Das Ozon wird durch Ozonerzeuger aus technischem Sauerstoff hergestellt. Die Kläranlage Hochfeld wird über eine vorhandene Leitung mit technischem Sauerstoff versorgt, sodass kein Sauerstofftank notwendig ist. Die erforderliche Produktionskapazität der Ozonerzeuger richtet sich nach der maximal benötigten Ozonmenge, die vom Abwasseranfall und der Abwasserqualität, wie z.B. DOC und Nitrit, abhängt. Für die Auslegung der Ozonerzeuger und des Pumpe-Injektor-Systems wird für den Trockenwetterabfluss von 1.350 m³/h die maximale Dosis mit ca. 7 mgO₃/L abgeschätzt. Für den Mischwasserabfluss ist demnach noch eine Basisdosierung von 3,5 mgO₃/L möglich.

Für den Betrieb der Anlage ist eine Regelung der Ozondosis in Abhängigkeit von der DOC-Fracht vorzusehen. Notwendig sind hierfür eine DOC-Onlinemessung und eine Durchflussmessung. Zur Überwa-

chung des Ablaufs wird zur Messung des Ozons in der gelösten Phase eine O₃-Orbisphere installiert. Die Abluft der Anlage ist mit einem Ozonwarngerät zu kontrollieren und die Räume in denen potenziell Ozon oder Sauerstoff austreten könnte, sind mit Ozon- und Sauerstoffwarngeräte auszustatten.

Als O₃-Eintragungssysteme für die Kläranlage-Hochfeld wird das Pumpe-Injektor-System gewählt, da ein O₃-Eintrag mit Diffusoren bei einer vorhanden Eintragstiefe von 3,30 m eine nur geringe Eintragungseffizienz erwarten lässt. Ferner muss für die Integration der Ozonanlage auf der Kläranlage Hochfeld der Zulauf gepumpt werden, sodass sich die Druckleitung für den Zulauf ideal als Misch- und Reaktionstrecke anbietet.

Für den effizienten Einsatz des Ozons zur Spurenstoffelimination ist die organische Hintergrundbelastung gering zu halten. Ferner sind Schlammablagerungen in der Ozonanlage und Nachbehandlung zu minimieren. Daher ist eine Optimierung der Nachklärung erforderlich.

Der wesentliche Energiebedarf der Spurenstoffelimination ergibt sich aus dem Zulaufpumpwerk zur Ozonanlage, der Ozonerzeugung und dem Pumpe-Injektor-System. Insgesamt kann auf der Kläranlage Duisburg Hochfeld der zusätzliche Energiebedarf für die Spurenstoffelimination, je nach Behandlungswassermenge zwischen 362.000 und 408.000 kWh/a, durch eine Verfahrensumstellung der Belebung und Integration einer Vorklärung mehr als gedeckt werden.

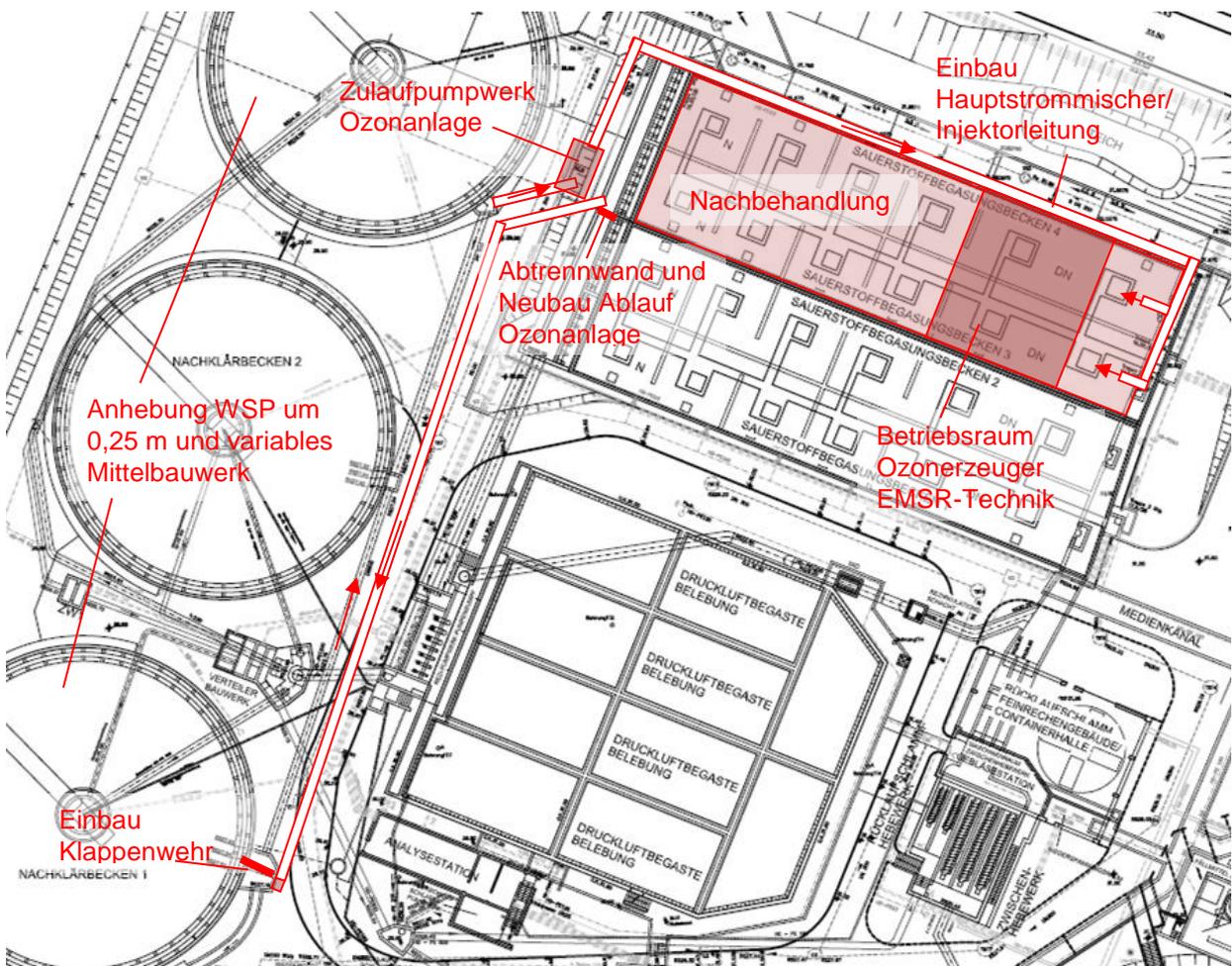


Abbildung 4-1: Lageplanausschnitt Kläranlage Duisburg Hochfeld – Integration Ozonanlage

5 Zusammenfassung der Kosten

Für die Betrachteten Varianten wurden die Investitions- und Betriebskosten geschätzt. Die Jahreskosten wurden analog gemäß dynamischer Kostenvergleichsrechnung [7] mit einem Zinssatz von 3 % p. a. ermittelt. Für die Bautechnik wurde ein Nutzungszeitraum von 30 Jahre, für die Maschinentechnik 15 Jahre und für die EMSR-Technik von 10 Jahren angesetzt. Ferner wurde angenommen, dass die realen Reinvestitionskosten den Erstinvestitionen entsprechen.

In der nachfolgenden Tabelle 5-1 sind die Kosten für die einzelnen im Vorfeld beschriebenen Varianten zur Verfahrensumstellung der Belebung nach Integration einer Vorklärung gegenübergestellt.

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der Investitions- und Kapitalkosten und Reduzierung der laufenden Kosten sowie die Jahreskostenreduzierung im Vergleich zum Ist-Zustand

Variante Vorklärung und Umstellung Belebung	V 1a Intermittierende Denitrifikation mit Druckluftbegasung in beiden Beckengruppen	V 1b Intermittierende Denitrifikation in der druckluftbegasten Belebung (+0,60 m)	V 2a Vorgeschaltete Denitrifikation in einem Becken der sauerstoffbegasten Belebung	V 2b Vorgeschaltete Denitrifikation und Nitrifikation in der druckluftbegasten Belebung (+0,60 m)
Investitionskosten (netto)	2.870.500 € 116%	2.736.500 € 111%	2.475.500 € 100%	2.889.500 € 117%
Kapitalkosten	219.639 € 117%	203.011 € 108%	188.516 € 100%	214.681 € 114%
Reduzierung laufende Kosten	-415.572 € 106%	-432.863 € 110%	-393.418 € 100%	-421.951 € 107%
Jahreskostenreduzierung (netto)	-195.933 € 100%	-229.852 € 117%	-204.901 € 105%	-207.270 € 106%

In Tabelle 5-2 sind die Kosten der erforderlichen Optimierung der Nachklärung und einer Ozonanlage aufgelistet. Für die Kostenabschätzung wurde eine mittlere Ozon-Dosis von 5 mg O₃/L, Kosten für Reinsauerstoff mit 0,12 €/Nm³ O₂ und Stromkosten mit 0,15 €/kWh netto angenommen.

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der Investitions- und Kapitalkosten und der laufenden Kosten sowie die Jahreskostenreduzierung für die Spurenstoffelimination

Varianten der Behandlungswassermenge und Nachbehandlung	Nachklärung, Ozonanlage (Qm), Nachbehandlung (Variante N1)	Nachklärung, Ozonanlage (Qt), Nachbehandlung (Variante N1)	Nachklärung, Ozonanlage (Qm), Nachbehandlung (Variante N2)	Nachklärung, Ozonanlage (Qm), Nachbehandlung (Variante N3)
Investitionskosten (netto)	3.719.000 € 102%	3.629.000 € 100%	3.799.000 € 105%	3.779.000 € 104%
Kapitalkosten	269.638 € 67%	262.754 € 68%	276.340 € 67%	274.664 € 67%
mit 70 % Förderung der Erst-Investition	136.820 €	133.150 €	140.664 €	139.703 €
laufende Kosten	134.798 € 33%	123.406 € 32%	137.055 € 33%	135.548 € 33%
Jahreskosten (netto)	404.436 € 105%	386.161 € 100%	413.395 € 107%	410.212 € 106%
mit 70 % Förderung der Erst-Investition	271.618 €	256.556 €	277.719 €	275.251 €
Spezifische Jahreskosten (JAM) 5.400.000	0,075 €/m ³	0,072 €/m ³	0,077 €/m ³	0,076 €/m ³
mit 70 % Förderung der Erst-Investition	0,050 €/m ³	0,048 €/m ³	0,051 €/m ³	0,051 €/m ³
Spezifische Jahreskosten (JSM) 4.600.000	0,088 €/m ³	0,084 €/m ³	0,090 €/m ³	0,089 €/m ³
mit 70 % Förderung der Erst-Investition	0,059 €/m ³	0,056 €/m ³	0,060 €/m ³	0,060 €/m ³

6 Technische Verfahrensempfehlung

Nachfolgend wird getrennt für die Umstellung der Belebung und zur Integration einer Ozonanlage eine Bewertung der Varianten vorgenommen.

Als Grundvoraussetzung unabhängig von den Varianten sind folgende Aspekte zu beachten:

- Die Verfahrensumstellung in der biologischen Stufe und die Nutzung von zwei Beckenstraßen der sauerstoffbegasten Belebung für die Spurenstoffelimination setzt die Integration einer Vorklärung in den Klärprozess voraus.
- Für die Ozonung des Kläranlagenablauf ist eine möglichst geringe Feststofffracht / organische Hintergrundbelastung und somit eine optimierte Nachklärung erforderlich. Ferner ist für die Umsetzung von Belebungsbeckenvolumen zur Spurenstoffelimination eine Optimierung der Nachklärung angebracht.
- Zur Reduzierung der laufenden Kosten wird eine Abkehr der Reinsauerstoffbegasung zur biologischen Abwasserbehandlung vorgesehen.
- Die konkurrierende Zielsetzung der Spurenstoffelimination einerseits und die Verringerung des Energiebedarfs der Abwasserbehandlung andererseits werden durch eine ganzheitliche Betrachtung berücksichtigt.
- Für eine verbesserte Energieeigenversorgung und Deckung des Energiebedarfs der Ozonanlage wurde eine Erhöhung der Faulgasmenge durch energiereichen Primärschlamm und Nutzung des Faulgases in einem BHKW angenommen.

Umstellung der Belebung

Auf Basis der Kostenschätzung sowie betrieblicher und baulicher Aspekte wurden die unterschiedlichen Varianten zur Umstellung der Belebung der Kläranlage Duisburg Hochfeld in Tabelle 6-1 bewertet. Von großer Bedeutung sind die Kapitalkosten und die laufenden Kosten, die insgesamt zu 70 % gewichtet wurden und die betrieblich/baulichen Aspekte, die mit 30 % gewichtet wurden.

Hinsichtlich der Kosten wurde die erzielbare Senkung der laufenden Kosten deutlich stärker gewertet als die Kapitalkosten, da diese insbesondere durch die Energiekosten beeinflusst werden und eine weitere Steigerung der Energiekosten wahrscheinlich ist.

Die betrieblichen und baulichen Aspekte der Varianten wurden wie folgt bewertet:

- Nutzung des vorhandenen Beckenvolumens im Standardbetrieb und erforderlicher Trockensubstanzgehalt in der Belebung
- späte insgesamt verfügbares Beckenvolumen und Anpassungsmöglichkeit an unterschiedliche Betriebszustände
- Betriebs- und Wartungsaufwand für die im Standardbetrieb genutzte Becken und Maschinenteknik, wie zusätzliche Gebläse, Rührwerke, Rezirkulationspumpen und Anzahl der Betriebspunkte
- Umsetzung der Verfahrensumstellung im laufenden Betrieb

Tabelle 6-1: Bewertung der Variante zur Verfahrensumstellung der Belebung

Variante	Wichtung [%]	V 1a Intermittierende Denitrifikation mit Druckluftbegasung in beiden Beckengruppen		V 1b Intermittierende Denitrifikation in der druckluftbegasteten Belebung (+0,60 m)		V 2a Vorgeschaltete Denitrifikation in einem Becken der sauerstoffbegasteten Belebung		V 2b Vorgeschaltete Denitrifikation und Nitrifikation in der druckluftbegasteten Belebung (+0,60 m)					
		Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung				
Investitionskosten		2.870.500 €		2.736.500 €		2.475.500 €		2.889.500 €					
Kapitalkosten	20%	219.639 €	12,9	2,6	203.011 €	13,9	2,8	188.516 €	15,0	3,0	214.681 €	13,2	2,6
Senkung der laufenden Kosten	50%	-415.572 €	14,4	7,2	-432.863 €	15,0	7,5	-393.418 €	13,6	6,8	-421.951 €	14,6	7,3
Wertungspunkte Monetär (gerundet)	70%	9,8		10,3		9,8		9,9					
Nutzung vorh. Beckenvolumen im Standardbetrieb (Schulnoten 1 (15 PKT) bis 3 (5 Pkt))	10%	sehr gut	15,0	1,5	befriedigend	5,0	0,5	sehr gut	15,0	1,5	gut	10,0	1,0
Beckenvolumen insgesamt und Anpassung an Betriebszustände (Schulnoten 1 (15 PKT) bis 3 (5 Pkt))	5%	gut	10,0	0,5	sehr gut	15,0	0,8	gut	10,0	0,5	sehr gut	15,0	0,8
Betriebs- und Wartungsaufwand/ Betriebspunkte (sehr gering (15 Pkt) bis mittel (5 Pkt))	10%	mittel	5,0	0,5	sehr gering	15,0	1,5	mittel	5,0	0,5	gering	10,0	1,0
Umsetzung der Verfahrensumstellung (sehr einfach (15 Pkt) bis komplex (5 Pkt))	5%	einfach	10,0	0,5	komplex	5,0	0,3	sehr einfach	15,0	0,8	komplex	5,0	0,3
Wertungspunkte Technik (gerundet)	30%	3,0		3,0		3,3		3,0					
Gesamtpunkte (gerundet)	100%	12,8		13,3		13,1		12,9					

Aus monetärer Sicht ist die **Variante 1b** - intermittierender Denitrifikation in der druckluftbegasteten Belebung und Anhebung des Wasserstands um 0,60 m - die vorteilhafteste. Aus technischer Sicht ist das Nutzvolumen im Standardbetrieb ist vergleichsweise gering und wird zurzeit nur mit 5 Punkten bewertet. Durch die Optimierung der Nachklärung und Nachweis der Separationsleistung mittels CFD-Simulation kann ggf. der erreichbare Trockensubstanzgehalt in der Belebung noch deutlich gesteigert werden, sodass das vorhandene Beckenvolumen ausreichend Reserven im Standardbetrieb aufweist und folglich diese Kategorie später noch höher bewertet werden könnte. Die Umsetzung insbesondere der Anhebung des Wasserspiegels in der Belebung im laufenden Betrieb ist in Variante 1b komplex. Aus technischer Sicht stellt daher Variante 1b nicht die beste Variante dar. Unter Berücksichtigung der monetären und technischen Aspekte wird Variante 1b am höchsten bewertet.

Aus technischer Sicht hat die **Variante 2a** – vorgeschaltete Denitrifikation in einer Straße der sauerstoffbegasteten Belebung und Nitrifikation in der druckluftbegasteten Belebung - die höchste Bewertung erzielt. In dieser Variante wird insbesondere das relativ flache Becken der sauerstoffbegasteten Belebung sehr gut durch die Nutzung als Denitrifikationsbecken in den Klärprozess eingebunden. Die Umsetzung der Variante im laufenden Betrieb ist sehr einfach, da der Wasserweg und die Einstauhöhen nicht verändert werden. Durch die Rezirkulation und Rührwerke entsteht jedoch ein höherer Betriebsaufwand im Vergleich zur intermittierenden Denitrifikation der Varianten 1b. Diese spiegeln sich auch in den laufenden Kosten wider, sodass diese Variante aus monetärer Sicht vergleichsweise niedrig bewertet wurde.

Auf Grundlage der Bewertung können **Variante 1b** oder **Variante 2a** zur Umsetzung empfohlen werden. Eine abschließende Wahl der Variante zur Umsetzung kann durch eine CFD-Simulation der optimierten Nachklärung gestützt werden.

Integration einer Ozonanlage

Aufgrund der örtlichen Rahmenbedingungen auf der Kläranlage Duisburg-Hochfeld wurde sich im Vorfeld der Studie auf eine Ozonung der Kläranlagenablaufs festgelegt und die Behandelbarkeit mit Ozon durch das Spurenstoffscreening und den Ozonzehrungsversuchen (vgl. Kapitel 2) bestätigt. Gründe für die Wahl der Ozonung sind:

- Es ist bereits eine Rein-Sauerstoff-Versorgung vorhanden, die zur Ozonerzeugung genutzt werden kann.
- Ein nicht mehr benötigtes abgedecktes Becken der vorhanden sauerstoffbegasten Belebung bietet günstige Voraussetzung zur Nutzung als Ozonreaktionsbecken.
- Es ist kein Flockungsfilter vorhanden, der für eine Behandlung mit PAK oder GAK genutzt werden könnte.
- Die beengten Platzverhältnisse der Kläranlage erlauben keine flächenbeanspruchenden Neubauten

Aufgrund der geringen Tiefe des für die Ozonung nutzbaren, vorhanden Beckens und der erforderlichen Hebung des Abwasser vor der Ozonung ergab sich ferner eine verfahrenstechnische Festlegung auf einen Ozoneintrag mittels Pumpe-Injektorsystem.

Für die Integration der Spurenstoffelimination ergeben sich Diskussionspunkte im Hinblick auf die Bemessungswassermenge und der erforderliche Nachbehandlung.

Für die Ozonanlage auf der Kläranlage Duisburg Hochfeld steht ausreichend Beckenvolumen für die Behandlung bis zum maximalen Mischwasserzufluss der Kläranlage zur Verfügung. Zusätzliche Kosten entstehen insbesondere durch ein leistungsfähigeres Zulaufpumpwerk. Die Ozonerzeugungskapazität und die damit verbundenen Anlagentechnik zum Ozoneintrag wurden auf den maximalen Trockenwetterzufluss ausgelegt. Bei Mischwetterzufluss verringert sich durch Verdünnung die organische Belastung, sodass sich insgesamt die erforderliche maximale Ozonmenge nicht erhöht. In Anbetracht der geringen Mehrkosten wird eine Auslegung der Ozonanlage (Zulaufpumpwerk) auf den Mischwasserzufluss empfohlen.

Hinsichtlich der Nachbehandlung wurden drei Varianten detailliert betrachtet. Die Wahl und Erfordernis der biologischen Nachbehandlung nach einer Ozonung ist zurzeit noch nicht eindeutig geklärt. In der Praxis zeigte sowohl eine biologische Nachbehandlung im Wirbelbett als auch ein Schönungsteich einen positiven Effekt auf die Ökotoxizität des Ablaufs einer Ozonung [6]. Auf der Kläranlage Hochfeld ist eine vergleichsweise lange Nachreaktionszeit im vorhandenen Beckenvolumen gegeben. Es wird daher empfohlen, das Beckenvolumen als „Nachreaktionsbecken“ zu nutzen und die Ökotoxizität im Ablauf im Rahmen einer Inbetriebnahmephase zu untersuchen und optional eine biologische Nachbehandlung in der Planung und Vergabe zu berücksichtigen.

Köln, den 04.07.2014

Dr.-Ing. Heinrich Herbst

Christian Maus, M.Sc.

Literaturverzeichnis

[1]	ATV-DVWK-A 131 (2000): ATV-DVWK-Arbeitsblatt 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Hennef
[2]	Grontmij AEW Plan GmbH (2008): Kläranlage Duisburg-Hochfeld – Intensivmessprogramm 2008, im Auftrag der Wirtschaftsbetriebe Duisburg
[3]	Grontmij AEW Plan GmbH (2009): Kläranlage Duisburg-Hochfeld, Außerbetriebnahme einer Belebungsstraße Genehmigungsentwurf nach § 58 (2) LWG
[4]	Grontmij AEW Plan GmbH (2009): Kläranlage Duisburg-Hochfeld – Wirtschaftlichkeitsuntersuchung – Konzept Vorklärung
[5]	PFI (2012): Kläranlage Duisburg Hochfeld, Energetische Feinanalyse, Oktober 2012
[6]	Arge Spurenstoffe NRW (2013): Elimination von Arzneimittelrückständen und organischen Spurenstoffen: Entwicklung und Konzeptionen und innovativen kostengünstigen Reinigungsverfahren, Teilprojekt 6: Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen, Abschlussbericht zur Phase 2, Vergabenummer 08-058-/1, gefördert durch MKULNV NRW
[7]	DWA (2012): Leitlinie zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinie) 8. überarbeitete Auflage, Hrsg. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, ISBN 978-3-941897-55-7