

Die Neue Fotooxidation in der Abluftreinigung – Biofilter und UV-Technik im Vergleich anhand des großflächigen Einsatzes im Emscherkanal

Frank Seitz, DNFO Abluftconsulting Seitz, Ludwigshafen a.Rh.

Kurzfassung

Über Jahrzehnte galt für die Abluftbehandlung für geringe bis mittlere Schadstoff- und Geruchsemissionen die Biofiltration und die VDI-Richtlinie 3477 „Biologische Abluftreinigung – Biofilter“ als Stand der Technik und wurde bundesweit zur Einhaltung eines Grenzwerts von < 500 GE/m³ als Verfahren der Wahl eingestuft. Nach Jahren der Entwicklung und Praxiserprobung wurde 2016 mit der VDI-Richtlinie 2441 „Prozessgas- und Abgasreinigung durch Kaltplasmaverfahren ... UV-Strahlung“ u.a. Verfahren die UV-Technologie als Stand der Technik akzeptiert und als Lösung anerkannt. Seither steigt die Nachfrage nach dieser Technologie für die Geruchselimination und VOC-Reduktion rapide an. Die Vorteile für Planer und Betreiber hinsichtlich Platzbedarfs, Kosten, Betriebsstabilität und -flexibilität setzen sich am Markt nach und nach durch.

Gleichwohl unterscheiden sich beide Verfahren hinsichtlich Leistung und Kosten wie auch im Vergleich zu sonstigen Verfahren (RTO, TNV, etc.) und werden in Fachkreisen unterschiedlich wahrgenommen bzw. interpretiert. Das liegt zum Teil an den verschiedenen Herangehensweisen und Blickwinkeln, mit der man an die Thematik herantritt. So wird bei einer Kostenerhebung oftmals der erhebliche Platzbedarf von biologischen Systemen bzw. der Pflegeaufwand im Betrieb unterschätzt. Dieser Beitrag soll einige Anregungen geben, sich mit den Ergebnissen beispielhafter Anwendungen kritisch auseinanderzusetzen.

Es werden einerseits die technischen Parameter und Grenzen der jeweiligen Technologien dargestellt sowie die Berechnung der Kosten für die Umsetzung erläutert. Die Kosten der Gesamt-Investition werden aufgezeigt. Die Betriebskosten werden anhand von realen Betriebszuständen variiert vorgestellt.

1. Verfahren der Biologischen Abgasreinigung

Folgende Verfahren der Biologischen Abgasreinigung werden in der Industrie eingesetzt. Man unterscheidet drei Grundtypen:

Biofilter nach VDI 3477 (Ausgabe 11/2004): Die ersten Biofilter wurden bereits Mitte des letzten Jahrhunderts patentiert und angewendet. Dabei wird ein organisches Trägermaterial wie z.B. Rindenmulch oder Hackschnitzel in ein Filterbett mit ca. 1 – 3 m Schütthöhe gefüllt. Die Abluft durchströmt das Filterbett von unten nach oben, wobei die Schadstoffe biologisch abgebaut werden. Die Biofilter können ebenerdig gebaut oder in Modulbauweise übereinandergestapelt werden. Durch den relativ einfachen konstruktiven Aufbau stellt der Biofilter ein sehr günstiges Abluftreinigungsverfahren dar, das jedoch nur für Anwendungen in kontinuierlicher Betriebsweise mit geringer Lösemittel- oder Geruchsbelastung geeignet ist. [1]

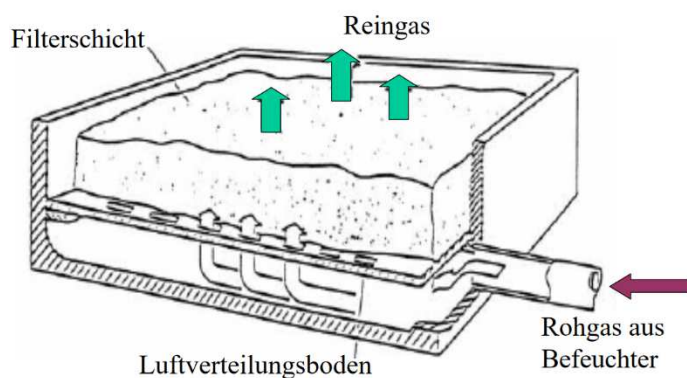


Bild 1: Verfahrensschema Biofilter

Biowäscher nach VDI 3478 (Ausgabe 07/1996): Der Biowäscher stellt eine Kombination eines physikalischen Wäschers und einer Belebungsseinheit dar. Die Schadstoffe werden physikalisch aus dem Wasser ausgewaschen und danach in der wässrigen Phase biologisch abgebaut. Dabei unterscheidet man Biowäscher mit biologischem Abbau durch die im Wasser suspendierten oder auf dem Füllkörpermateriale fixierten Mikroorganismen und Biowäscher mit separater externer Belebungsseinheit. Diese ist notwendig bei höher beladenem Waschwasser. Das durch den biologischen Abbau regenerierte Wäscherwasser kann dadurch im Kreislauf gefahren werden. Die zum biologischen Abbau notwendigen Nährstoffe müssen in die Waschflüssigkeit zugegeben werden. Der Biowäscher eignet sich gut für wasserlösliche Abluftinhaltsstoffe mittlerer Konzentrationen. [2]

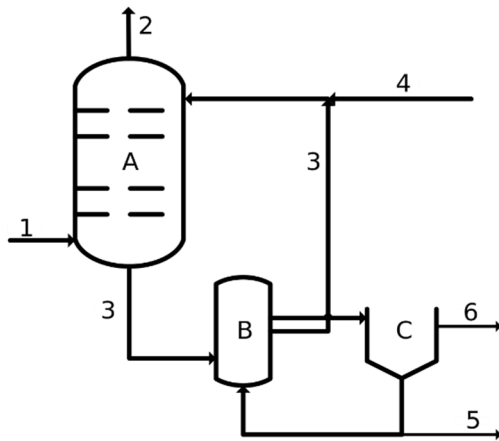


Bild 2: Verfahrensschema Biowäscher: (A) Absorber (B) Regenerierreaktor (C) Absatzsetzbecken Das zu reinigende Abgas (1) durchströmt den Absorber von unten nach oben und verlässt ihn als sogenanntes Reingas (2). Waschflüssigkeit (3) wird zum großen Teil im Kreislauf durch den Regenerierreaktor gefahren. Dabei ergänzt Frischwasser (4) den Teil der Waschflüssigkeit, der als Abwasser (5) ausgeschleust wird. Ebenso wird ein Teil der Biomasse, die sich im Absatzsetzbecken sammelt, ausgeschleust (6).

Biorieselbettreaktor nach VDI 3478 Blatt 2 (Ausgabe 12/2005): Der Biorieselbettreaktor (auch als Biotropfkörper oder Biotrickling Filter bezeichnet) kann als eine Sonderform des Biowäschers betrachtet werden und unterscheidet sich vom herkömmlichen Biofilterverfahren dadurch, dass anstatt des biologischen Trägermaterials (wie Rindenmulch oder Hackschnitzel) ein inertes Trägermaterial verwendet wird. Auf diesem Trägermaterial werden die Mikroorganismen angesiedelt, die den biologischen Abbau der Abluftinhaltsstoffe durchführen. Die beladene Abluft durchströmt das inerte Trägermaterial im Gegen- oder im Gleichstrom, wird im Trägermaterial gereinigt und tritt dann am Abluftkamin als gereinigte Abluft wieder aus. Die Feuchtigkeit und die notwendigen Nährstoffe, die beim Biofilter aus dem organischen Trägermaterial entnommen werden und so zum Zersetzen dessen führen, werden beim Biotropfkörper über das Berieselungswasser zugeführt. Der Biotropfkörper eignet sich sowohl zur Reinigung lösemittel- als auch geruchsbeladener Abluft mit Konzentrationen bis zu 1 g/m^3 .

[3]

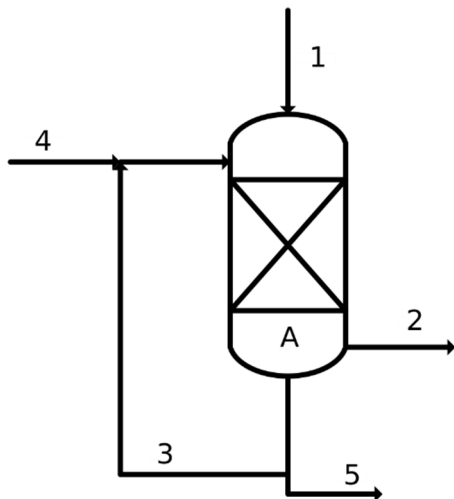


Bild 3: Verfahrensschema Biorieselbettreaktor: Das zu reinigende Abgas (1) durchströmt den Reaktor (A) von oben nach unten und verlässt ihn als sogenanntes Reingas (2). Beregnungsflüssigkeit (3) wird zum großen Teil im Kreislauf gefahren. Dabei ergänzt eine Nährsalzlösung (4) den Teil der Flüssigkeit, der als Abwasser (5) ausgeschleust wird.

Unter den Biologischen Verfahren zur Luftreinigung stellt der klassische Biofilter nach VDI 3477 das einfachste Verfahren dar. Im Gegensatz zu Biowäschern und Biorieselbettreaktoren. Hierbei gilt grundsätzlich: je aufwendiger die Regelung des Prozesses, desto besser aber auch umso komplexer wird das Verfahren. Dies spiegelt sich in Fragen zum Wartungsaufwand, -kosten und Stabilität des Prozesses wider.

Ein Biofilter besteht aus einer großflächigen Filterschicht (Druckverlust), die meist von unten nach oben durchströmt wird. Das Filtermaterial besteht aus Rindenmulch oder Hackschnitzeln. Dieses stellt eine organische Besiedlungsoberfläche für Mikroorganismen dar, welche die Geruchsstoffe in der durchströmenden Abluft aufnehmen, sofern wasserlöslich, und umwandeln. Mikroorganismen können nur Substanzen aus der Wasserphase aufnehmen und verarbeiten. Erforderliche Cosubstrate für den biologischen Abbau werden dem Filtermaterial entnommen.

Voraussetzung für eine gute Funktionalität sind:

- Geruchs-/Schadstoffe sind wasserlöslich, nicht zu komplex im Aufbau (BTEX)
- Die Konzentrationen sind in einem moderaten Bereich. Zu hohe Peaks vergiften die Biozönose, bei zu geringen Konzentrationen verhungern die einmal adaptierten MO.
- Die Adaption der MO an die Abluftzusammensetzung benötigt Zeit, Tage bis Wochen. Schnelle Schwankungen oder Betriebsunterbrechungen sollten vermieden werden.

- Es muss ein Optimum zwischen Filteranströmfläche und Druckverlust gefunden werden. Aus diesem Grunde werden große Grundflächen für die Anlagen benötigt. Es besteht die Gefahr von Kurzschlussströmungen. Diese führen potenziell zum Absterben in Randzonen und Durchbrüchen an zu schnell durchströmten Bereichen.
- Es muss genügend Grundfläche zur Verfügung stehen.
- Auch der Anteil an Staub und Aerosolen muss gering sein, damit es nicht Verblockung des Trägermaterials kommt.
- Die zu behandelnde Luft darf weder zu kalt, zu heiß oder zu trocken sein.
- Durch den sukzessiven Abbau des Trägermaterials kompaktiert dieses und der Druckverlust steigt mit der Zeit an.
- Ein regelmäßiger Austausch des Trägermaterials ist erforderlich.

2. Fotooxidationsverfahren zur Abluftreinigung

Diese Verfahren werden in geschlossener Bauform gehalten. Mehrere periphere Stufen (Vorfilter, Ventilator) werden oft integriert. Die Stufe mit UV-Strahlern wird gerne mit einem CIP (cleaning in place) ausgestattet, welche die Betriebsstabilität erhöht. Oft wird ein Katalysator zur Unterstützung der Abbauprozesse sowie zur Restozonvernichtung nachgeschaltet: hier speziell dotierte Aktivkohle.

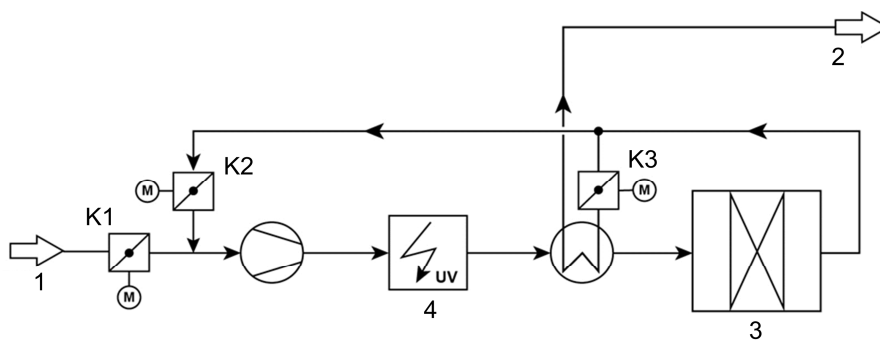


Bild 3: Verfahrensschema Direkte Fotooxidation [4]: Rohgas (1), Reingas (2), Katalysator (3), UV-Reaktor (4)

Voraussetzung für eine gute Funktionalität sind:

- Bestrahlungsstärke und Lampenrezepturen können und sollten gezielt an die Aufgabe angepasst werden. Die Auswahl von geeigneten Strahlern und Katalysatormaterialien erfolgt im Vorfeld durch Expertise und/oder Versuche.

- Bestimmte in der Abluft gelöste Verbindungen können beim Abbau zur Belagsbildung auf den UV-Lampen, was durch geeignete CIP-Vorrichtungen minimiert werden kann.
- Auch der Anteil an Staub und Aerosolen muss gering sein, damit es nicht zur Belagsbildung auf den Lampen oder Verblockung des Katalysators kommt.

3. Vergleich der Verfahren

Ein Vergleich von Biofiltern und UV-Anlagen ist nicht immer einfach, da sehr unterschiedliche heterogene und manchmal monetär schwer zu quantifizierende Kriterien hineinspielen. Es wurden zahlreiche Vergleiche zu Investitions- und Betriebskosten angestellt. An verschiedenen Projekten wurden hierzu unabhängige Studien durchgeführt (Tabelle 1 und Bild 4).

Tabelle 1: Wertstoffhof mit Kompostierung, Norddeutschland [5]

		Biofilter	Fotooxidation	Biofilter	Fotooxidation
Anlagengröße	m ³ /h	30.000		53.000	
CAPEX (ohne Fundamente)	€	287.000 €	168.000 €	470.000 €	379.000 €
OPEX	€/a	21.000 €	18.000 €	34.634 €	28.428 €
Grundflächenbedarf	m ³	200	45	350	65
	%	100%	23%	100%	19%

Die hier gezeigten Beispiele vernachlässigen samt den zusätzlichen Aufwendungen für Flächenverbrauch und Fundamenterstellung. Und stammen aus der Kompostierung und Vergärung. Neben den im Vergleich geringeren Kosten bei CAPEX und OPEX beeindruckt besonders der geringere Flächenverbrauch.

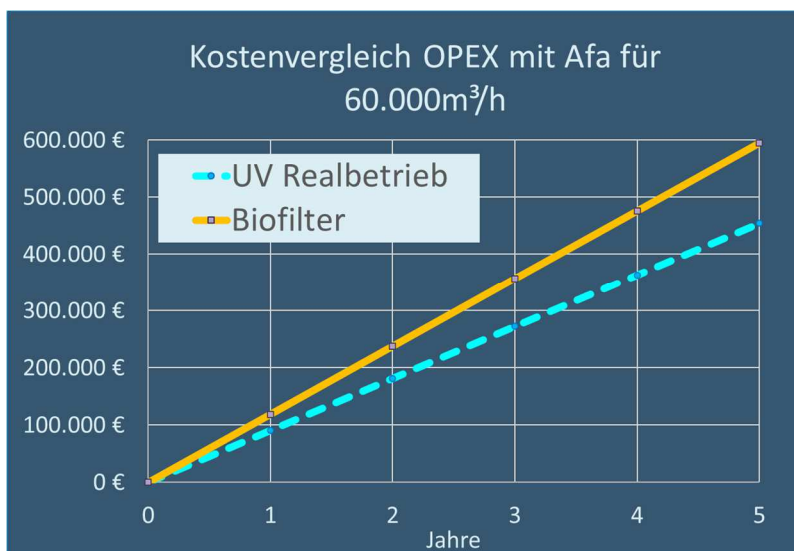


Bild 4: Vergärungsanlage, Süddeutschland [6]

Damit ergeben sich einige Vorteile der Fotooxidationsverfahren:

- Platzersparnis gegenüber Biofiltern ca. 80%
- Stabiler Betrieb bei Emissions- und Wetterschwankungen
- Flexibel betriebsbereit innerhalb von Minuten
- Vollautomatischer, wartungsarmer Betrieb
- Geringe Invest- und Betriebskosten
- Stand der Technik seit 2016 (VDI 2441)

4. Einsatz am Emscherkanal

Die als Ruhrgebiet oder Kohlenpott bekannte Region im Herzen Nordrhein-Westfalens ist geprägt von zwei Jahrhunderten der Ansiedlung von Bergbau und Schwerindustrie. Mit dem Strukturwandel der letzten Jahrzehnte sind jedoch Zechen und Hochöfen größtenteils verschwunden. Ein prominentes Beispiel für einen verantwortungsvollen Umgang mit den Folgen der Industrialisierung ist der Abwasserkanal Emscher, der zur Entlastung und Renaturierung des Flusses beiträgt. Die Maßnahmen helfen dabei, für die Region eine wirtschaftliche Zukunft durch Transformation in eine Dienstleistungsgesellschaft zu schaffen. Der seit dem 18. Jahrhundert zunehmend als Abwasserkanal genutzte und für diese Verwendung schrittweise begradigte und eingeschaltete Fluss Emscher, zwischen Dortmund und Oberhausen, steht seit Beginn der 1990er Jahre im Zentrum eines über die Region hinaus beachteten Renaturierungsprojekts. Der Umbau des Emscher-Systems bestand in erster Linie aus der Trennung des Abwassersystems vom oberirdischen Fluss, durch den Aufbau eines unterirdischen Kanalsystems. [7]

Eine der größten technischen Herausforderungen der weitreichenden Umbaumaßnahmen bestand in der Zwangsbelüftung des neuen Leitungssystems mit Hilfe einer Abluftabsaugung. Der in den stehenden und fließenden Abwässern entstehende Schwefelwasserstoff (H_2S) muss aus Gründen des Arbeits-, Korrosions- und Explosionsschutzes dem geschlossenen System entzogen werden. Das Gas-Gemisch einfach in die Umgebungsluft abzuleiten, ist dabei nicht möglich. Neben einer potenziellen Gesundheitsgefährdung zeichnen sich die enthaltenen Gase vor allen Dingen durch ihren abwassertypischen, intensiv unangenehmen Geruch aus.

So wurden beim Abwasserverband Emscher genossenschaft in Essen nach einem langjährigen Prozess der Projektentwicklung im Rahmen des Generationenprojektes „Emscherkanal“ die bereits vorliegende Genehmigung für Biofilterverfahren zugunsten der UV- Bestrahlungstechnologie geändert und realisiert.

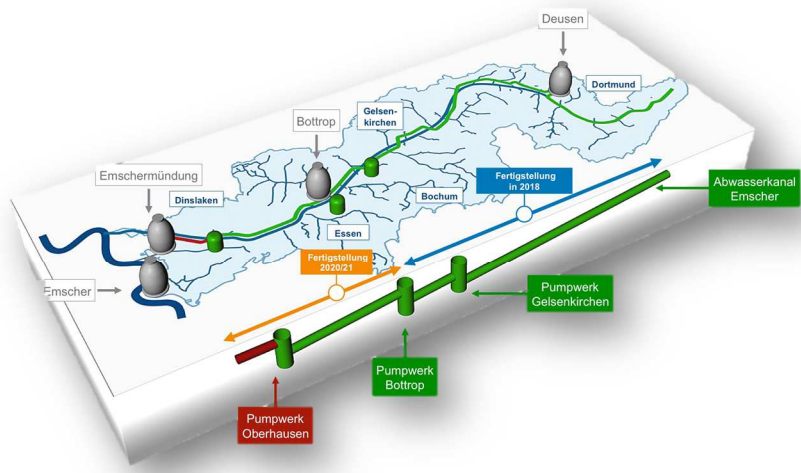


Bild 5: Generationenprojekt Emscherkanal [7]

U.a. entschieden hier neben der Betriebsstabilität und Wartungsfreundlichkeit auch der geringere Flächenverbrauch. Exemplarische Standort-Berechnungen zeigten den enormen Flächenverbrauch entlang der Emscher in Naturschutzzonen und Gewerbegebieten auf.

	Schachtstandort	Filtervolumen [m³]	max. Filterfläche [m²]	Schornsteinhöhe [m]
1	Absturzbauwerk	324	270	-
2	Absturzbauwerk	1.125	938	22,5
3	Durchleitung/Absturz	916	763	40
4	Durchleitung	773	644	17,5

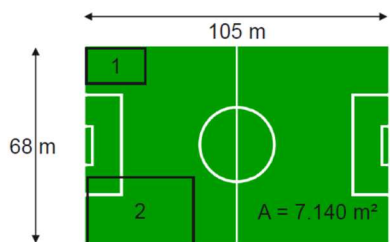


Bild 6: Vergleich Flächenbedarf Biofilter [7]

In Bild 6 sind hierzu nur beispielhaft 2 bzw. 4 von insgesamt knapp 40 Standorten im Vergleich zu einem Fußballfeld dargestellt. Zusätzlich zu beachten sind auch die mit dem Flächenverbrauch zusätzlich anfallenden Baukosten für Fundamente, Einhausung, etc.

2018 und 2021 wurden in zwei Bauabschnitten rund 50 Anlagen zur Geruchsbehandlung der Bewetterungsabluft aus dem ca. 50 km langen Kanal in Betrieb genommen. In Summe werden hier über 1 Million m³/h Abluft von unangenehmen Gerüchen befreit. Dieses Projekt bei einem der größten Wasserwirtschaftsverbände Deutschlands zwischen Dortmund und Duisburg besitzt Leuchtturmcharakter. Viele weitere Wasserverbände stellen sich an ebenfalls von den Vorteilen der Fotooxidation zu profitieren.



Bild 7: Beispielstandort mit Fotooxidationsanlagen zur Geruchselimination für 70.000m³/h Kanalbewetterungsluft [8]

4. Reinigungsergebnisse

In den Pilotversuchen wurden verschiedene Anbieter unter härtesten Bedingungen getestet. So wurden die Pilotanlagen in mehrwöchigen Testphasen von akkreditierten Messinstituten überwacht und beprobt. Hierbei wurden die Systeme Geruchsemissionen von 10.000 bis 400.000 GE/m³ ausgesetzt. Die hierbei dauerhaft erzielten Reinigungsergebnisse lagen zwischen 97 und 99,9% (Tabelle 2). Die gemäß Gutachten bzw. Leistungsverzeichnis zu erwartenden Geruchskonzentrationen entlang des Emscherkanals sollten dagegen lediglich zwischen 500 bis 2.000 GE/m³ liegen, nur an einzelnen Standorten sind Emissionen bis ca. 70.000 GE/m³ zu erwarten. Durch eine Gesamtabmung von rund 600.000 m³/h Abluft im ersten Bauabschnitt resultiert eine Gesamtfracht von 750 Millionen GE/m³. Die geforderten Grenzwerte wurden mit 200 GE/m³ vorgegeben.

Tabelle 2: Messergebnisse Pilotversuchsphase Fotooxidation 2013, Klärwerk Dinslaken [9]

H ₂ S-Messungen										
Datum	12.12.2012		19.12.2012		23.01.2013		30.01.2013		05.02.2013	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
H ₂ S-Emissionskonzentration [mg/m ³]										
Messung 1	0,846	< 0,235	3,798	< 0,359	5,247	< 0,325	0,437	< 0,327	1,488	< 0,090
Messung 2	1,811	< 0,196	5,130	< 0,443	3,771	< 0,325	0,296	< 0,304	1,294	< 0,090
Messung 3	2,732	< 0,321	5,358	< 0,357	2,976	< 0,320	0,277	< 0,289	1,178	< 0,090
Mittelwert	1,830	< 0,251	4,762	< 0,386	3,998	< 0,323	0,337	< 0,307	1,320	< 0,090
Volumenstrom; Norm _{trocken} [m ³ /h]	76	113	107	155	89	122	235	273	208	245
H ₂ S-Emissionsmassenstrom [mg/h]										
Messung 1	65	< 27	406	< 56	468	< 40	103	< 89	310	< 22
Messung 2	146	< 22	549	< 69	336	< 40	70	< 83	269	< 22
Messung 3	209	< 36	573	< 55	265	< 39	65	< 79	245	< 22
Mittelwert	140	< 28	510	< 60	356	< 39	79	< 84	275	< 22
Wirkungsgrad der Abgasreinigung [%]										
Messung 1	> 59		> 86		> 92		> 13		> 93	
Messung 2	> 85		> 87		> 88		n.b.		> 92	
Messung 3	> 83		> 90		> 85		n.b.		> 91	
Mittelwert	> 80		> 88		> 89		n.b.		> 92	
Geruchs-Messungen										
Datum	12.12.2012		19.12.2012		23.01.2013		30.01.2013		05.02.2013	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
Geruchsstoffkonzentration [GE/m ³]										
Messung 1	57.000	21	98.000	68	380.000	1.500	22.000	190	41.000	270
Messung 2	28.000	25	91.000	320	170.000	3.300	13.000	270	27.000	200
geo. Mittel	39.000	27	100.000	170	210.000	1.700	15.000	260	27.000	220
Volumenstrom; Norm _{trocken} [m ³ /h]										
Geruchsstoffstrom [MGE/h]										
Messung 1	4,72	< 0,01	11,46	0,01	36,58	0,20	5,67	0,06	9,24	0,07
Messung 2	2,32	< 0,01	10,65	0,05	16,37	0,44	3,35	0,08	6,09	0,05
Messung 3	3,14	< 0,01	12,87	0,04	12,51	0,13	3,35	0,10	4,06	0,05
geo. Mittel	3,23	< 0,01	11,70	0,03	20,22	0,22	3,86	0,08	6,09	0,06
Wirkungsgrad der Abgasreinigung [%]										
Messung 1	99,8		99,9		99,5		99,0		99,2	
Messung 2	99,6		99,5		97,3		97,6		99,1	
Mittelwert	99,7		99,8		98,9		98,0		99,0	
n.b. nicht zu bestimmen										

Jede Anlage ist mit einer akkreditierten Probenahmestelle versehen. Inzwischen liegen erste offizielle Messungen vor, welche die Einhaltung aller Grenzwerte bestätigen (Tabelle 3). Damit die Effektivität auch zuverlässig dauerhaft und stabil eingehalten wird, werden die Betriebskosten vom Anlagenlieferanten garantiert.

Tabelle 3: Messergebnisse Fotooxidation am Emscherkanal 2021, Bauabschnitt 1 [10]

Quelle	Probe	Datum	Start Probenahme Ende Probenahme [MEZ]	Geruchsstoffkonzentration [GE/m ³]	Geruchscharakteristik	
Doppelanlage	QBS010	27.04.2021	10:59	11:29	525	Abwasser
			10:03	10:33	332	Abwasser
			Geometr. Mittel		420	
	QBS10A		10:59	11:29	<NWG	Lösungsmittel
			11:34	12:04	18	Lösungsmittel, süßlich
			12:06	12:36	26	Lösungsmittel, süßlich
	Geometr. Mittel		<NWG			
	QBS10B		10:59	11:29	19	Lösungsmittel, süßlich
			11:30	12:00	19	Lösungsmittel, süßlich
12:02		12:32	<NWG	Lösungsmittel, süßlich		
Geometr. Mittel		<NWG				
Doppelanlage	QBS040	18.05.2021	08:05	08:35	353	Abwasser
			09:06	09:36	266	Abwasser
			Geometr. Mittel		310	
	QBS040A		08:00	08:30	41	muffig
			08:32	09:02	27	muffig
			09:04	09:34	38	muffig
	Geometr. Mittel		35			
	QBS040B		08:00	08:30	77	faulig, muffig
			08:32	09:02	91	faulig, muffig
09:04		09:34	64	faulig, muffig		
Geometr. Mittel		77				
QS045	Roh P1	27.04.2021	08:30	09:00	1.169	Abwasser
			09:36	10:06	589	Abwasser
			Geometr. Mittel		830	
	Rein P1		08:30	09:00	43	Lösungsmittel
			09:04	09:34	29	Lösungsmittel
			09:36	10:06	32	Lösungsmittel
Geometr. Mittel		34				
QS048	Roh P2	18.06.2021	09:54	10:24	144	Abwasser
			10:57	11:27	152	Abwasser
			Geometr. Mittel		150	
	Rein P2		09:53	10:23	43	muffig
			10:25	10:55	68	muffig
			10:57	11:27	46	muffig
Geometr. Mittel		51				

5. Fazit

Unternehmen, die eine Abluftreinigung zur Reduzierung von VOC bzw. Gerüchen betreiben, haben eine Reihe von Anforderungen an die einzusetzende Technik. So sollte sich diese neben möglichst niedrigen Invest- und Betriebskosten durch geringen Platzbedarf und hohe Betriebsstabilität auszeichnen. Flexible Möglichkeiten zur Anpassung an die Betriebsbedingungen im Hinblick auf zukünftige produktionsintegrierte Emissionsreduzierungen oder auch umgekehrt Kapazitätserweiterungen sind Vorzüge der Fotooxidationstechnologie. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Technik sind die einfache Handhabung, Wartung sowie die Steuerbarkeit abhängig von Emissionsschwankungen bzw. Betriebszeiten. Ein- und Ausschaltzeiten von wenigen Minuten erlauben praktisch eine Echtzeitbehandlung von Gerüchen.

Biologische Verfahren, die es schon seit „Urzeiten“ gibt, haben ihren berechtigten Anwendungsfelder. Dieser Beitrag dient dazu, Öffentlichkeit und Bewusstsein zu schaffen für innovative Verfahren, welche inzwischen auch zum Stand der Technik nach VDI aufgeschlossen haben und sehr attraktive Alternativen in jeder Hinsicht für geringe, mittlere und inzwischen sogar hohe Geruchs- und VOC-Emissionsfrachten darstellen.

Literaturhinweise

- [1] VDI-Richtlinie Biofilter VDI 3477 (Ausgabe 11/2004)
- [2] VDI-Richtlinie Biowäscher und Rieselbettreaktoren VDI 3478 (Ausgabe 07/1996)
- [3] VDI-Richtlinie Biorieselbettreaktor VDI 3478 Blatt 2 (Ausgabe 12/2005)
- [4] VDI-Richtlinie VDI 2441 „Prozessgas- und Abgasreinigung durch ... UV-Strahlung“ (Ausgabe 2016)
- [5] technoplus engineering, Wertstoffhof mit Kompostierung, Norddeutschland
- [6] DNFO Abluftconsulting Seitz, Vergärungsanlage, Süddeutschland
- [7] Emschergenossenschaft, van der Meer, Presseveröffentlichung
- [8] Centriair Deutschland GmbH, Fotooxidationsanlagen, Bauabschnitt 2, 2020
- [9] Müller-BBM, Messungen Pilotversuche Klärwerk Dinslaken, 2013
- [10] TÜV NORD Umweltschutz, Messungen Bauabschnitt 1, 2021