



POSITION // MÄRZ 2015

Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern

Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

UBA-Positionspapier unter Mitarbeit der Fachgebiete
II 2.1, II 2.2, II 2.3, II 2.4, III 2.1, III 2.5 sowie der
Abteilungsleitungen II 2 und III 2

Redaktion:

Dr. Bettina Rechenberg

Gestaltung:

Umweltbundesamt

Publikationen als pdf:

[http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/
organische-mikroverunreinigungen-in-gewaessern](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/organische-mikroverunreinigungen-in-gewaessern)

Bildquellen:

© antiksu / Fotolia.de

Stand: März 2015

ISSN 2363-829X

Inhalt

1. Mikroverunreinigungen in Gewässern

- 1.1 Prioritäre Stoffe
- 1.2 Eintrag in die Gewässer
- 1.3 Maßnahmen zur Minimierung des Eintrags von Mikroverunreinigungen

2. Stand der Abwasserbehandlung in Deutschland

- 2.1 Ausbaugrad der kommunalen Kläranlagen
- 2.2 Elimination von Mikroverunreinigungen in den heutigen Kläranlagen

3. Weitergehende Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen

- 3.1 Anforderungen an ein weitergehendes Verfahren
- 3.2 Überblick über die zur Verfügung stehenden Verfahren

4. Nutzen und Aufwand weitergehender Verfahren

- 4.1 Ziele der Wasserrahmenrichtlinie
 - 4.1.1 Chemischer Zustand der Fließgewässer
 - 4.1.2 Ökologischer Zustand der Fließgewässer
- 4.2 Sensible Gewässernutzungen
- 4.3 Anforderungen zum Schutz der Meere
- 4.4 Energieaufwand für weitergehende Verfahren
- 4.5 Kosten für weitergehende Verfahren

5. Empfehlungen für die Einführung einer vierten Reinigungsstufe

- 5.1 Kriterien für die Festlegung des Standes der Technik bei der weitergehenden Abwasserreinigung und regulatorische Verankerung
- 5.2 Stufenweises Vorgehen zur Verbesserung der Oberflächenwasserqualität
- 5.3 Finanzierungsmodelle

6. Stellungnahme zu häufig vorgebrachten Argumenten gegen die Einführung einer vierten Reinigungsstufe

Fazit

Die Konzentrationen an Mikroverunreinigungen überschreiten in vielen Gewässern die gesetzlich vorgegebenen Umweltqualitätsnormen. Zur Reduzierung der Einträge reichen die möglichen Vermeidungsmaßnahmen, wie Anwendungsbeschränkungen oder -verbote über Stoffrecht, Produktrecht, Verminderung von Luftemissionen nicht aus, so dass nur eine nachgeschaltete Abwasserbehandlungstechnik Erfolg verspricht. Dies erfordert die Fortschreibung des Standes der Technik bei der Abwasserbehandlung und die Einführung weitergehender Abwasserbehandlungsverfahren (4. Reinigungsstufe) in den kommunalen Kläranlagen (KA) der Größenklasse 5 sowie kleinerer KA, die in sensitive Gewässer einleiten. Am wirksamsten und kosteneffizientesten sind dabei gegenwärtig die Verfahren der Ozonung und der Aktivkohleadsorption durch Pulveraktivkohle. Für eine gerechte Lastenverteilung sollten Optionen für eine öffentliche Anreizfinanzierung erwogen werden.

1. Mikroverunreinigungen in Gewässern

1.1 Prioritäre Stoffe

Die kommunale Abwasserentsorgung in Deutschland ist ein wichtiger Baustein für den Gewässerschutz. Sie gehört zu den grundlegenden Maßnahmen, wie sie zur Erreichung des guten Gewässerzustands in Deutschland erforderlich ist. Die getätigten Investitionen der letzten vierzig Jahre in die Abwasserbehandlung haben die dominierenden Probleme durch den Eintrag sauerstoffzehrender Substanzen gelöst und auch die Einträge der Nährstoffe aus dichter besiedelten Gebieten deutlich reduziert. Dies hat zu einer erheblichen Verbesserung der Gewässergüte geführt.

Allerdings sind damit die stofflichen Probleme in den Gewässern nicht allumfassend gelöst, da weiterhin, wenn auch in geringeren Mengen, potenziell schädliche Stoffe in die Gewässer gelangen. Häufig werden diese als organische Mikroverunreinigungen bezeichnet. Sie wirken bereits in niedrigen bis sehr niedrigen Konzentrationen.

Zur Beurteilung und Begrenzung stofflicher Risiken werden in Europa für problematische Stoffe und damit auch für Mikroverunreinigungen Umweltqualitätsnormen (UQN) nach einheitlichen, abgestimmten Verfahren wissenschaftlich abgeleitet und rechtlich festgelegt.

Umweltqualitätsnormen sind Stoffkonzentrationen, unterhalb derer nach dem Stand der Wissenschaft Schädigungen von Organismen ausgeschlossen werden können. Die bestehenden rechtlichen Regelungen verlangen, dass bei einem Überschreiten der UQN die Eintragsquellen identifiziert und die Einträge soweit vermindert werden, dass es in Zukunft keine Überschreitung mehr gibt.

Für Stoffe von europaweitem Vorkommen und Gewässerrisiko, die sogenannten prioritären und prioritär gefährlichen Stoffe im Anhang X der Wasserrahmenrichtlinie, sind im Jahre 2008 europaweit Umweltqualitätsnormen festgelegt worden, die den „guten chemischen Zustand“ für Oberflächengewässer definieren.¹ Im August 2013 wurde diese Liste fortgeschrieben und um zwölf Stoffe erweitert.² Für Stoffe, die aufgrund ihrer Stoffeigenschaften als prioritär gefährlicher Stoff identifiziert sind, sind Gewässereinträge künftig grundsätzlich einzustellen (Phasing-Out Verpflichtung).

1 Richtlinie 2008/105/EG vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG, ABl. EG L 348, S. 84ff.
2 Richtlinie 2013/39/EU vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik, ABl. EG L 226, S. 1ff.

Tabelle 1

Liste prioritärer Stoffe im Bereich der Wasserpolitik, Anhang X Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG

Nummer	CAS Nummer	EU Nummer	Name des prioritären Stoffs	als prioritär gefährlicher Stoff identifiziert
(1)	15972-60-8	240-110-8	Alachlor	
(2)	120-12-7	204-371-1	Anthracen	X
(3)	1912-24-9	217-617-8	Atrazin	
(4)	71-43-2	200-753-7	Benzen	
(5)	nicht anwendbar	nicht anwendbar	Bromierte Diphenylether	X ⁴
(6)	7440-43-9	231-152-8	Cadmium und Cadmiumverbindungen	X

Nummer	CAS Nummer	EU Nummer	Name des prioritären Stoffs	als prioritär gefährlicher Stoff identifiziert
(7)	85535-84-8	287-476-5	C10-13 Chloralkane	X
(8)	470-90-6	207-432-0	Chlorfenvinphos	
(9)	2921-88-2	220-864-4	Chlorpyrifos(Chlorpyrifos-Ethyl)	
(10)	107-06-2	203-458-1	1,2 Dichlorethan	
(11)	75-09-2	200-838-9	Dichlormethan	
(12)	117-81-7	204-211-0	Bis(2-ethyl-hexyl)phthalat (DEHP)	X
(13)	330-54-1	206-354-4	Diuron	
(14)	115-29-7	204-079-4	Endosulfan	X
(15)	206-44-0	205-912-4	Fluoranthren	
(16)	118-74-1	204-273-9	Hexachlorbenzen	X
(17)	87-68-3	201-765-5	Hexachlorbutadien	X
(18)	608-73-1	210-168-9	Hexachlorcyclohexan	X
(19)	34123-59-6	251-835-4	Isoproturon	
(20)	7439-92-1	231-100-4	Blei und Bleiverbindungen	
(21)	7439-97-6	231-106-7	Quecksilber und Quecksilberverbindungen	X
(22)	91-20-3	202-049-5	Naphthalin	
(23)	7440-02-0	231-111-4	Nickel- und Nickelverbindungen	
(24)	nicht anwendbar	nicht anwendbar	Nonylphenol	X ⁶
(25)	nicht anwendbar	nicht anwendbar	Octylphenol ⁷	
(26)	608-93-5	210-172-0	Pentachlorbenzol	X
(27)	87-86-5	201-778-6	Pentachlorphenol	
(28)	nicht anwendbar	nicht anwendbar	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	X
(29)	122-34-9	204-535-2	Simazin	
(30)	nicht anwendbar	nicht anwendbar	Tributylzinnverbindungen	X ⁹
(31)	12002-48-1	234-413-4	Trichlorbenzen	
(32)	67-66-3	200-663-8	Trichloromethan	
(33)	1582-09-8	216-428-8	Trifluralin	X
(34)	115-32-2	204-082-0	Dicofol	X
(35)	1763-23-1	217-179-8	Perfluoroktansulfonsäure und ihre Derivate (PFOS)	X
(36)	124495-18-7	nicht anwendbar	Quinoxifen	X
(37)	nicht anwendbar	nicht anwendbar	Dioxine und Dioxin-ähnliche Verbindungen	X ¹⁰
(38)	74070-46-5	277-704-1	Aclonifen	
(39)	42576-02-3	255-894-7	Bifenox	
(40)	28159-98-0	248-872-3	Cybutryn	
(41)	52315-07-8	257-842-9	Cypermethrin ¹¹	
(42)	62-73-7	200-547-7	Dichlorvos	
(43)	nicht anwendbar	nicht anwendbar	Hexabromcyclododecan (HBCDD)	X ¹²
(44)	76-44-8 / 1024-57-3	200-962-3 / 213-831-0	Heptachlor und Heptachlor epoxid	X
(45)	886-50-0	212-950-5	Terbutryn	

Neben den europaweit geregelten Stoffen zur Festlegung des „guten chemischen Zustands“ sind von den Mitgliedstaaten für weitere sogenannte flussgebiets-spezifische Stoffe nationale Umweltqualitätsnormen abzuleiten und rechtlich festzulegen, um den „guten ökologischen Zustand“ der Oberflächengewässer zu definieren (s. 4.1.2). In der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) aus dem Jahre 2011 wurden 162 Umweltqualitätsnormen für derartige flussgebiets-spezifische Stoffe festgelegt. Es handelt sich um Schwermetalle und organische Mikroverunreinigungen.

Die Konzentrationen einer Reihe von Mikroverunreinigungen überschreiten die festgelegten Umweltqualitätsnormen für deutsche Oberflächengewässer. Für diese Mikroverunreinigungen sind daher die Eintragsquellen zu ermitteln und die Einträge zu vermindern.

1.2 Eintrag in die Gewässer

Für die prioritären Stoffe der Wasserrahmenrichtlinie wurde in 2013 ein Eintragsinventar erarbeitet. Dabei stellt der Eintrag über kommunale Abwässer für eine Reihe Stoffe einen sehr wichtigen Eintragspfad dar. Hier sind z. B. die prioritären Schwermetalle (Nickel, Blei, Quecksilber und Cadmium), Diuron, Isoproturon, Nonylphenol, PAK und DEHP zu nennen.

Für Diuron und Nonylphenol wird über die regionalisierte Pfadanalyse (mit dem Modellinstrument MoRE³) das kommunale Abwassersystem als Haupteintragspfad in die Gewässer angenommen.

Bei folgenden Stoffen, die über eine regionalisierte Pfadanalyse bilanziert werden konnten, stammen zwischen 10 % und 20 % der Einträge aus dem kommunalen Abwassersystem: Isoproturon, Blei, Quecksilber, Nickel und Cadmium.

Bei den PAK lag der Anteil bei ca. 40 % und bei DEHP über 50 %.

Darüber hinaus ist das kommunale Abwassersystem für eine Vielzahl anderer, bislang nicht europaweit geregelter Stoffe, beispielsweise Arzneistoffe der Haupteintragspfad.

Viele Mikroverunreinigungen können sich in Gewässersedimenten oder Böden, anreichern. Diese Depots können über lange Zeiträume zu Gewässerbelastungen durch Remobilisierung der festgelegten Stoffe führen.

Die Hauptquelle dieser Stoffe ist der Eintrag aus Anwendungen in Haushalten und Emissionen aus Produkten. Viele Stoffe gelangen nach Gebrauch in die kommunale Kanalisation und damit in die Kläranlagen. Die Einträge aus der gezielten Herstellung oder Verwendung der Stoffe in Gewerbebetrieben sind in der Regel weniger bedeutsam. Der Stoffeintrag kann auch über den Luftpfad, Depositionen auf Flächen und anschließendem Abfluss mit dem Niederschlagswasser erfolgen. Das kommunale Abwassersystem stellt damit ein Sammelbecken für viele Stoffe, also auch Mikroverunreinigungen, dar.

Ferner können in der EU bereits geregelte Stoffe über Importprodukte wieder relevant werden und in erhöhten Konzentrationen auftreten (zum Beispiel Nonylphenolethoxylat und sein Abbauprodukt Nonylphenol aus Importtextilien).

1.3 Maßnahmen zur Minimierung des Eintrags von Mikroverunreinigungen

Als Handlungsoptionen stehen sowohl eine wirksame Vermeidung an den Quellen (z.B. Anwendungsbeschränkungen oder -verbote über Stoffrecht, Produktrecht, Verminderung von Luftemissionen) als auch eine nachgeschaltete Abwasserreinigungstechnik zur Verfügung.

Die Forderung, das Verursacherprinzip stärker zur Anwendung zu bringen und die Stoffeinträge an ihrer Quelle zu reduzieren, erweist sich allerdings in vielen Bereichen als nicht operabel. Für alle stoffrechtlichen Maßnahmen zur Beschränkung oder zu Verboten der Verwendung ist das europäische Stoffrecht einschlägig. Allerdings werden dieselben Stoffe, je nach Verwendung (z.B. als Pflanzenschutzmittel oder Biozid), zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt und mit unterschiedlichen Restriktionen reguliert. Gleichzeitig werden häufig nur besonders wichtige Anwendungen beschränkt und es verbleiben Einträge aus kleineren, nicht beschränkten und auch nicht substituierbaren Anwendungen. Schließlich betreffen die Regelungen nur die Herstellung, Vermarktung und Anwendung, weshalb die Emissionen während des Nutzungszeit-

³ Modelling Regionalized Emissions

raums – etwa bei Baumaterialien – teilweise mehrere Jahrzehnte betragen können und auch die Entsorgung der Reststoffe unberücksichtigt bleibt. Humanarzneimittel werden in den entsprechenden europäischen Zulassungsverfahren bislang zwar im Hinblick auf Umweltrelevanz bewertet, es erfolgen aber keine Anwendungsverbote oder -einschränkungen bei nachgewiesener Umweltrelevanz.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass neben europäischen Maßnahmen, die vordringlich das Inverkehrbringen von Stoffen regeln, weitere nachgeschaltete Maßnahmen, wie die Sicherstellung der umweltgerechten Entsorgung von Stoffen und Produkten notwendig sind.

Zusätzlich ist eine Ertüchtigung der Barriersysteme, d.h. die Nachrüstung von kommunalen Kläranlagen mit einer weiteren Verfahrensstufe (4. Reinigungsstufe) sinnvoll, um den Eintrag von Mikroverunreinigungen in die Gewässer zu verringern. Die endgültige Entfernung der Mikroverunreinigungen bei der Trinkwasseraufbereitung (end-of-pipe-Technologie) kommt ebenfalls in Betracht, hat allerdings den Nachteil, dass damit zwar die menschliche Gesundheit, nicht aber die in den Gewässern lebenden Organismen geschützt wird. Darüber hinaus können beispielsweise Nanofiltration und Umkehrosmose zur Trinkwasseraufbereitung zu Veränderungen der Wassereigenschaften und damit zu Problemen in den Trinkwasserleitungen führen.

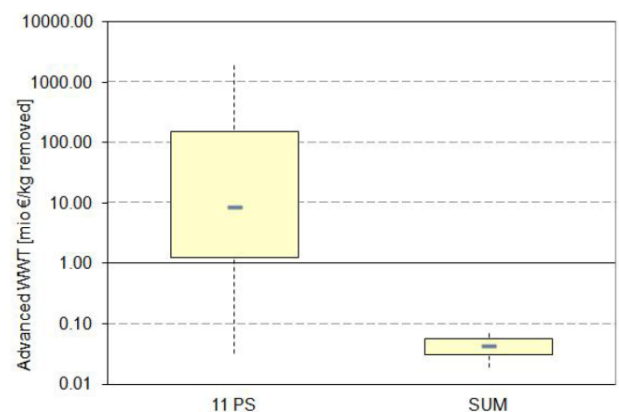
Die Herausforderung für eine strategische Maßnahmenplanung besteht darin, eine wirksame und kostengünstige Kombination der verschiedenen Maßnahmen zu identifizieren, um Investitionen bestmöglich effizient und effektiv zu lenken. Das UBA hat im Rahmen des EU finanzierten COHIBA Projektes (Control of hazardous substances in the Baltic Sea region, Laufzeit 2009-2011) geeignete Managementoptionen, das sind sowohl Stoffregulierungen als auch nachgeschaltete Maßnahmen, nach Wirksamkeit und Kosteneffizienz bewertet. Die Bewertung wurde für 11 als besonders gefährlich für den Ostseeraum eingeschätzte Stoffe durchgeführt.

Abbildung 1 zeigt sich, dass bei einer Einzelbetrachtung der Maßnahme „Verbesserung der kommunalen Abwasserbehandlung“ stoffabhängig die Kosten für die vollständige Entfernung um bis zu 5 Größenordnungen variieren können. Dafür wurden für jeden der

11 Stoffe unter verschiedenen Szenarien die Kosten ermittelt. Die sich daraus ergebende Verteilung der Kosten wird durch den linken Boxplot dargestellt. Der Median liegt bei etwa 10 Mio. Euro pro zu entfernendes Kilogramm mit einer Spanne von etwa 30.000 Euro bis 2. Mrd. Euro. Wird allerdings der Effekt einbezogen, dass eine verbesserte Abwasserbehandlung gleichzeitig eine Vielzahl unerwünschter Stoffe mit einem hohen Wirkungsgrad vermindert, ergibt sich eine sehr viel höhere Kosteneffizienz. (vgl. rechter Boxplot in Abb. 1). Die Kosten für die gleichzeitige Eliminierung von 1 kg der 11 Stoffe liegen dann je nach Szenario nur noch zwischen etwa 20.000 und 90.000 € / kg. Folglich werden bei der Einzelstoffbetrachtung die Kosten systematisch überschätzt und der Gesamtnutzen der Maßnahme unterschätzt.

Abbildung 1

Kosteneffizienzbereiche für eine vierte Reinigungsstufe bei Einzelstoff- und kumulierter Betrachtung



Quelle: Cohiba Recommendation Report (2012)

WWT: Waste Water Treatment
 11 PS: Einzelmaßnahmen zur Eliminierung von 11 prioritären Stoffen
 SUM: kumulierte Betrachtung der gleichzeitigen Eliminierung von 11 prioritären Stoffen

In einem weiteren Vorhaben des Umweltbundesamtes untersuchten Hillenbrandt et al. (2014a) Maßnahmen für weitere, abwasserrelevante Stoffe unterschiedlichen Anwendungsmusters mögliche Minderungsmaßnahmen und ihre Wirksamkeiten und Kosten.

Die folgende Tabelle, die Hillenbrandt et al. (2014a), S. 10 entnommen ist, zeigt die verschiedenen Ansatzpunkte für Minderungsmaßnahmen.

Tabelle 2

Ansatzpunkte quellenorientierter, dezentraler oder „End-of-pipe“-Maßnahmen zur Emissionsminderung

Handlungsebene	Ansatzpunkte
Maßnahmen an der Quelle	▶ Änderung im Anwendungsbereich ▶ Produktveränderungen ▶ Stoff-Substitution / Ersatzstoffe ▶ geregelte Entsorgung
-Informationsmaßnahmen	▶ Informationskampagne für die Bevölkerung ▶ Weiterbildung / Information des anwendenden Fachpersonals
Dezentrale Maßnahmen	▶ Indirekteinleiter (Gewerbe / Gesundheitseinrichtungen) ▶ dezentrale Behandlung von Niederschlagswasser (Gebäude-, Quartiersebene)
Maßnahmen „End-of-pipe“	▶ kommunale Kläranlage (4. Reinigungsstufe) ▶ Kanalnetz: - Behandlung Niederschlagswasser - Behandlung Mischwasser

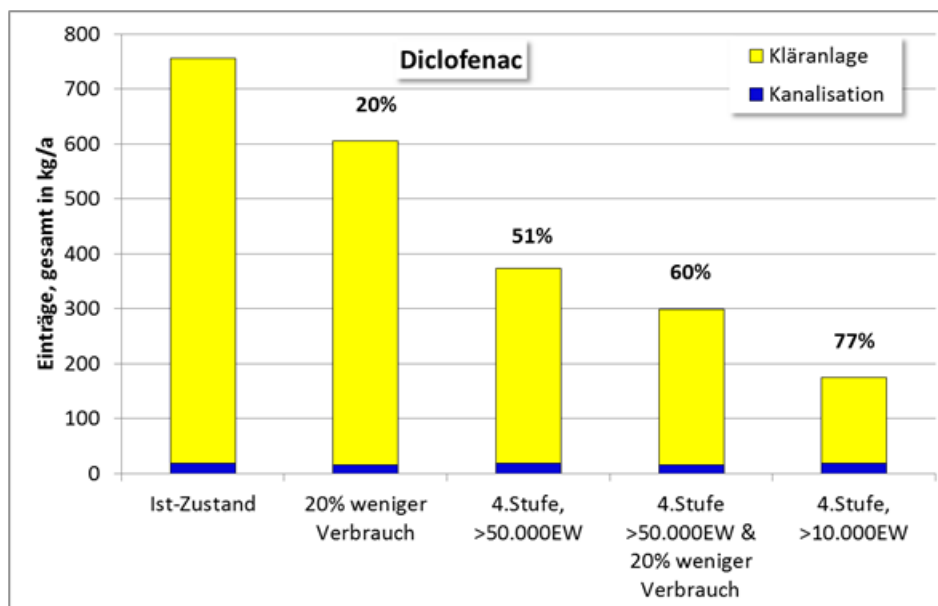
Quelle: Hillenbrand et al. (2014a)

Es zeigte sich auch hier, dass eine Verbesserung der Abwasserbehandlung ein wichtiger Baustein in einer Gesamtstrategie ist, auf den nicht verzichtet werden kann. Z. B. wurde die Auswirkung von Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen zu einzelnen Stoffe für das Neckareinzugsgebiet modelliert.

Die folgenden Abbildungen aus der Kurzfassung des Berichtes Hillenbrand et al. 2014b, S. 24 zeigen die Ergebnisse für Diclofenac.

Abbildung 2

Eintragsreduktionspotenzial der modellierten Maßnahmen für Diclofenac

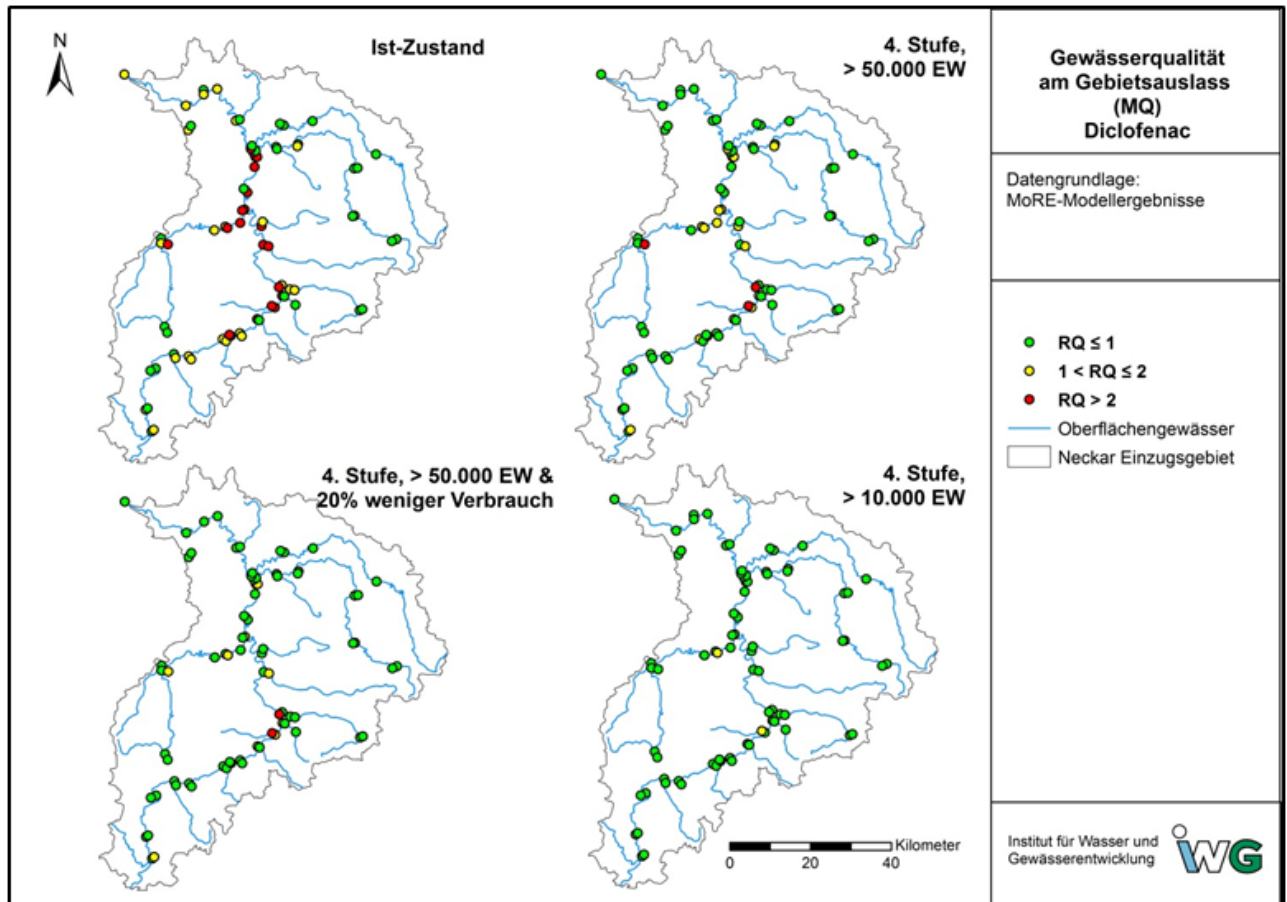


Quelle: Hillenbrand et al. (2014b)

Die folgende Abbildung zeigt die aktuelle Situation und die durch die Maßnahmen sich ergebenden Verbesserungen. Dargestellt ist jeweils der Risikoquotient, d.h. das Verhältnis von prognostizierter mittlerer Umweltkonzentration zur Wirkschwelle.

Abbildung 3

Ergebnis der modellierten Maßnahmen für die Diclofenac-Gewässerqualität



Quelle: Hillenbrand et al. (2014b)

2. Stand der Abwasserbehandlung in Deutschland

2.1 Ausbaugrad der kommunalen Kläranlagen

Die Haushalte in Deutschland sind praktisch flächendeckend an die Kanalisation und Kläranlagen (> 95,7 %) angeschlossen. Von den über 9.600 öffentlichen Kläranlagen gehören etwa 2.100 zur Größenklasse 4 und 5 mit einer Ausbaugröße von mehr als 10.000 Einwohnerwerten (EW) (s. Tabelle 3).

Tabelle 3

Übersicht über die Größenklassenverteilung der öffentlichen Kläranlagen in Deutschland

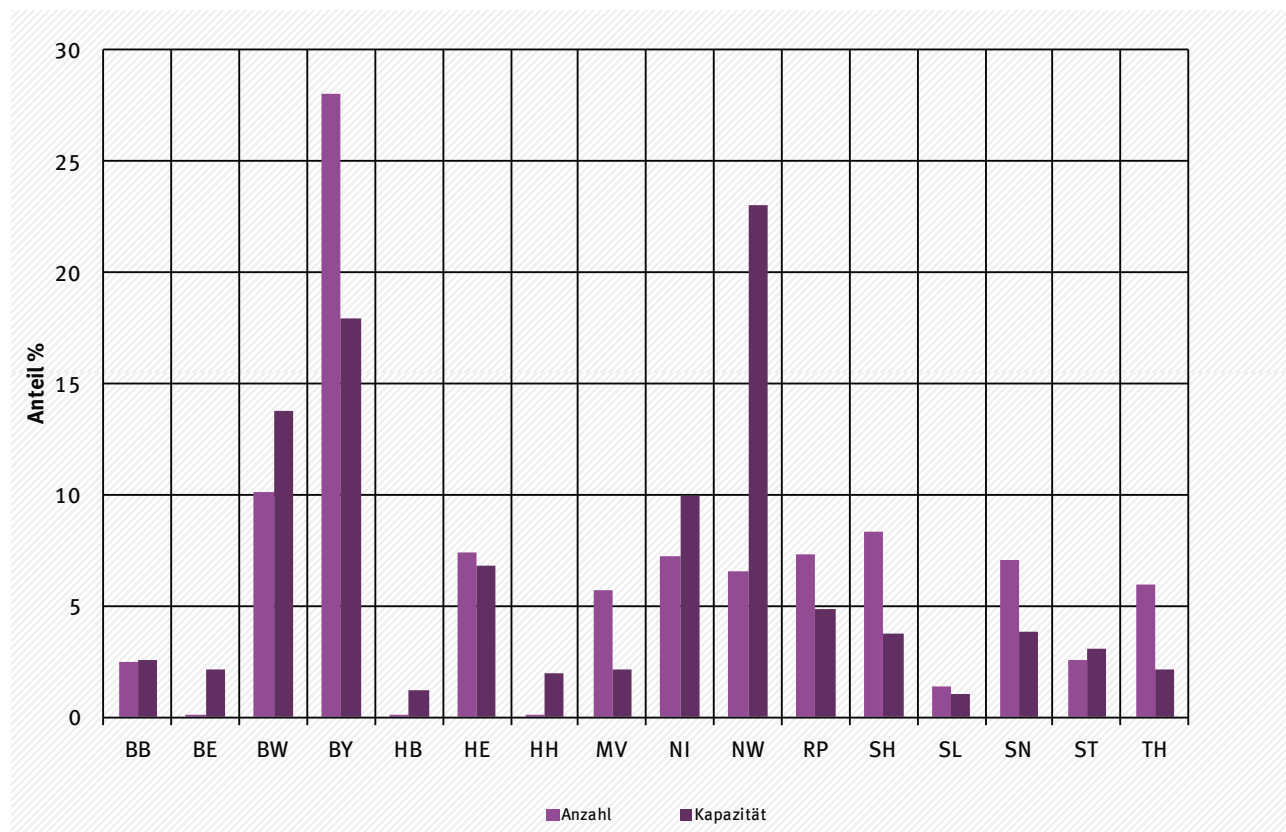
Größenklasse	Ausbaugröße (EW)	Anzahl	Anlagenkapazität (EW)	Anteil (%)
5	>100.000	230	74.450.000	49,6
4	10.001 – 100.000	1.888	61.070.000	40,7
4 (teilw.)	80.001 – 100.000	97	9.059.000	6,0
4 (teilw.)	50.001 – 80.000	198	13.122.000	8,7
4 (teilw.)	10.001 – 50.000	1.593	38.893.000	26,0
3,2,1	≤ 10.000	7.473	14.585.000	9,7

Quelle: Datenlieferung der Bundesrepublik Deutschland an die EU-Kommission zur Umsetzung der Kommunalabwasserrichtlinie, Stichtag 31.12.2010

Die Verteilung der Kläranlagen hinsichtlich Anzahl und Kapazität in den Bundesländern wird in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt.

Abbildung 4

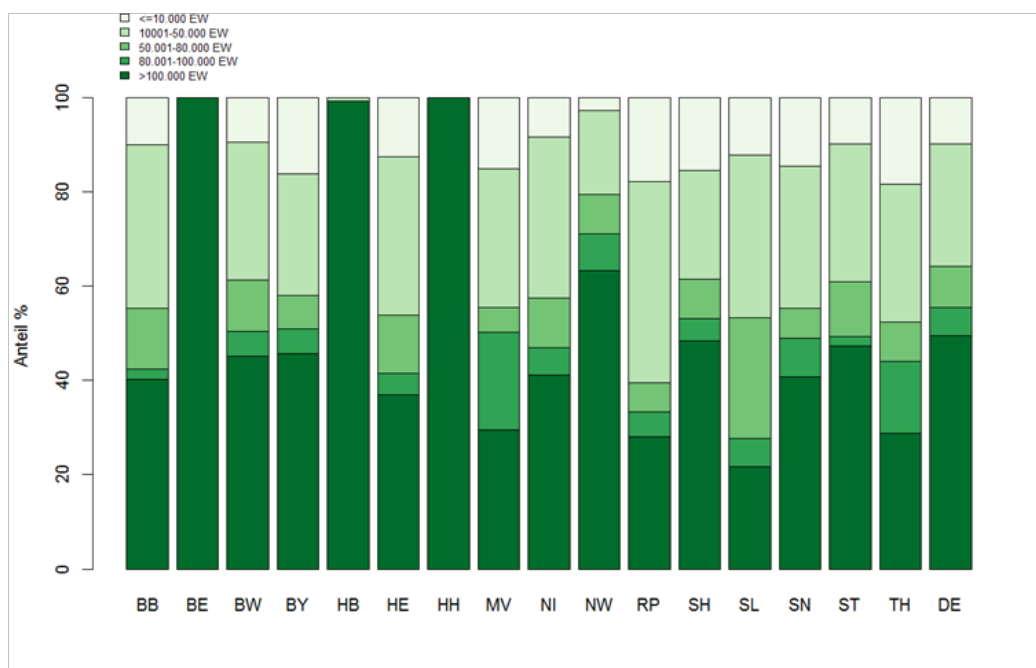
Anteil der Bundesländer an Anzahl und Kapazität der kommunalen Kläranlagen in D



Quelle: Auswertung UBA

Abbildung 5

Kläranlagen der Bundesländer aufgeschlüsselt nach Kläranlagenkapazität



Quelle: Auswertung UBA

Wie Abbildung 5 zu entnehmen ist, werden in den Stadtstaaten (BE, HB, HH) nahezu 100 % des Abwassers in Anlagen der Größenklasse 5 behandelt. In den meisten Flächenstaaten liegt deren Anteil zwischen 40 % und 60 %. Nur in MV, RP, SL und TH beträgt der Anteil deutlich weniger als 40 %.

2.2 Elimination von Mikroverunreinigungen in den heutigen Kläranlagen

Mit dem heutigen Stand der Technik (mechanische, biologische und chemische Verfahren) der Kläranlagen ist die Elimination verschiedener Mikroverunreinigungen ungenügend. Selbst durch Optimierung des Betriebs kann die Elimination nur unwesentlich erhöht werden.

Die Einführung der Nitrifikation (SdT in Deutschland) brachte eine durchschnittliche Steigerung der Elimination der Mikroverunreinigungen von ca. 20 % auf ca. 40 %, wie Margot et al. (2010) für 41 Stoffe zeigten. Allerdings bestehen sehr große Unterschiede zwischen leicht und schwer abbaubaren Stoffen ([Abegglen and Siegrist, 2012] [Margot et al., 2011]).

Bei Einsatz eines Membranbioreaktors (MBR) kann auf Grund des höheren Schlammalters eine verbesserte Elimination erreicht werden. Sie reicht jedoch nicht aus, um die Qualität der Gewässer nachhaltig zu verbessern.

3. Weitergehende Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen

3.1 Anforderungen an ein weitergehendes Verfahren

Eine Verbesserung der Elimination der Mikroverunreinigungen in der kommunalen Abwasserbehandlung ist nur durch weitergehende Verfahren möglich.

[Abegglen and Siegrist, 2012] formulierten die folgenden Anforderungen an weitergehende Verfahren zur Elimination von organischen Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser:

- ▶ **Breitbandwirkung:** Eine breite Palette problematischer Substanzen muss weitgehend entfernt werden.
- ▶ **Nebenprodukte:** Die Bildung unerwünschter Nebenprodukte (Transformationsprodukte) oder Abfälle muss vermieden werden.
- ▶ **Anwendbarkeit:** Das Verfahren muss in die bestehende Anlage integriert und vom Personal betrieben werden können und darf die bestehende Reinigungsleistung nicht negativ beeinflussen.
- ▶ **Kosten/Nutzen:** Der Aufwand (Material, Energie, Personal, Kosten) muss vertretbar sein und einen angemessenen Nutzen bringen.

3.2 Überblick über die zur Verfügung stehenden Verfahren

Es sind verschiedene Verfahren zur Entfernung bestimmter Stoffe aus der Trink- und Badebeckenwasseraufbereitung und der Behandlung von Industrieabwasser bekannt.

Die Verfahren können auf Grund ihres Wirkmechanismus in vier Gruppen unterteilt werden:

- ▶ **Adsorptive Verfahren**
Ein Adsorbens mit großer Oberfläche wird mit dem Abwasser in Kontakt gebracht. Es lagern sich Wasserinhaltsstoffe auf der Oberfläche des Adsorbens an, das regelmäßig entfernt und weiterbehandelt werden muss.
(z.B. Fällung/Flockung, Aktivkohle (unterteilt in granuliert Aktivkohle und Pulveraktivkohle), Ionenaustauscher)
- ▶ **Biologische Verfahren**
Die Wasserinhaltsstoffe werden durch Mikroorganismen abgebaut oder umgewandelt.
(z.B. Abwasserteiche, Pflanzenkläranlage, Sandfilter, Biofiltration)

► **Oxidative Verfahren**

Die Wasserinhaltsstoffe werden durch Zugabe eines Oxidationsmittels im Abwasserstrom oxidiert. Die Ausgangssubstanzen werden in meist unbekannte Reaktionsprodukte umgewandelt bzw. einem weiteren biologischen Abbau zugänglich gemacht.

(z.B. Ozonung, Chlorung (Chlor, Chlordioxid), Ferrat, Photolyse und andere Verfahren der erweiterten Oxidation (Advanced Oxidation Process, AOP))

► **Physikalische Verfahren**

Hierbei handelt es sich in erster Linie um Filtrationsverfahren. Das anfallende Konzentrat muss entsorgt oder weiterbehandelt werden.

(z.B. Nanofiltration und Umkehrosmose)

Die Verfahren können miteinander kombiniert werden.

In der Praxis bewährte Verfahren bei der Trink- und Badewasseraufbereitung lassen sich nicht ohne

weiteres auf die Abwasserbehandlung übertragen.

Die kommunale Abwasserbehandlung stellt auf Grund der Abwasserzusammensetzung und der hydraulischen Dynamik spezielle Anforderungen an das jeweilige Verfahren. Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus dem erforderlichen Platzbedarf für bestimmte Techniken. Daher muss jede weitergehende Abwasserbehandlung an die jeweiligen Bedingungen angepasst werden (Einzelfallentscheidung).

Bei der Anwendung oxidativer, photochemischer und biologischer Verfahren muss die Bildung von Abbau- und Transformationsprodukten berücksichtigt werden, da in der Regel kein sofortiger Abbau zu Kohlendioxid und Wasser (Mineralisierung) stattfindet, sondern ein Gemisch verschiedener Abbau- und Transformationsprodukte entsteht.

Eine Bewertung / Einschätzung der verschiedenen Verfahren auf ihre Eignung zur Entfernung von Mikroverunreinigungen ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 4

Einschätzung der Eignung von Verfahren zur Entfernung von Mikroverunreinigungen

Verfahren	Eignung	Breitbandwirkung	Abfälle / Nebenprodukte	Anwendbarkeit	Kosten/ Nutzen
Ozon	+	+	0	+	+
Pulveraktivkohle	+	+	0	+	+
Granulierte Aktivkohle	+/F	+	0	+	F
Dichte Membranen (NF, RO)	-/F	+	-	?	-
AOP	-/F	+	0	?	-
Nachgeschaltete biologische Verfahren	-	-	0	-	0 / +
Ferrat	F	0 / +	0 / -	F	F
Fällung / Flockung	-	-	0	-	-
Chlor / Chlordioxid	-	-	-	-	-
Photolyse	-	-	0 / -	+ / -	0
Ultraschall	F	F	0 / -	?	?
Adsorptionsverfahren (Ionenaustauscher, Nanoflockung)	- / F	-	0 / -	-	+
Nanotechnologie	? / F	?	?	?	?

Quelle: Abegglen and Siegrist, 2012

Die Bewertung anhand der in Kapitel 3.1 genannten 4 Kriterien ergibt die Eignung: + gut, geeignet, möglich; 0 neutral; - ungenügend, problematisch, schwierig; ? unbekannt, nicht anwendbar; F weitere Forschung nötig

NF = Nanofiltration

RO = Umkehrosmose (reverse osmose)

AOP = Verfahren der erweiterten Oxidation (Advanced Oxidation Process)

Durch die Ozonung wird eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen entfernt, nachteilige biologische Effekte werden stark reduziert und eine weitgehende Entfärbung und Abwasserdesinfektion erreicht. In einer nachgeschalteten biologischen Stufe, z. B. Sand- oder Biofilter, oder adsorptiven Stufe werden die sich möglicherweise bildenden Umwandlungsprodukte weiter reduziert. Die Aktivkohle kann zur Reduktion von Mikroverunreinigungen in Kläranlagen mit verschiedenen Prozessführungen eingesetzt werden. Eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen und ebenso nachteilige biologische Effekte können dadurch reduziert werden. Die Verfahren der Ozonung und AktivkohleadSORPTION durch Pulveraktivkohle oder granuliert Aktivkohle sind wirkungsvolle Verfahren für eine weitergehende Abwasserbehandlung. Sie werden großtechnisch bereits auf verschiedenen Kläranlagen versuchsweise eingesetzt.

Bei den Verfahren der Ozonung und AktivkohleadSORPTION folgt diese weitergehende Behandlungsstufe auf die Nachklärung. Die Behandlung des Abwassers in dieser Stufe kann im Vollstrom oder im Teilstrom, bei dem eine Rezirkulation in die biologische Reinigungsstufe stattfindet, erfolgen.

Die Umweltbelastungen und der Energieverbrauch bei der Herstellung und dem Transport der Aktivkohle sind erheblich. Sie müssen bei der Bewertung der positiven Ergebnisse der Abtrennung von Mikroverunreinigungen und anderen Stoffen mittels Aktivkohle aus dem Abwasser berücksichtigt werden.

Der Einsatz von dichten Membranen (Nanofiltration und Umkehrosmose) kommt für die Entfernung von Mikroverunreinigungen sowie von Keimen aus dem kommunalen Abwasser grundsätzlich in Frage [Dorau, 2001], jedoch limitieren der hohe Energieverbrauch sowie die ungelöste Frage nach der Behandlung des Konzentrats deren Einsatz.

In Einzelfällen kann der Einsatz dichter Membranen dennoch in Betracht gezogen werden, z.B. bei der Behandlung von Industrieabwässern oder bei Wiedernutzung des behandelten Abwassers. Zum möglichen Einsatz von kohleinfiltrierte Membranen liegen erste erfolgversprechende Forschungsergebnisse vor [Weyd et al., 2013].

Die Behandlung von kommunalem Abwasser mit AOP ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht effektiv, da die Hydroxylradikale mit allen (organischen) Verbindungen reagieren und somit der Energie- und Betriebsmittelverbrauch ansteigt.

Ferrat (Fe VI) wirkt als Oxidationsmittel und gleichzeitig in Form des entstehenden Fe (III) als Fällmittel. Das Verfahren kann mit der P-Fällung kombiniert werden. An der Weiterentwicklung dieses Verfahrens und der Identifizierung möglicher Umwandlungsprodukte wird geforscht [Y. Lee et al., 2009] [Yunho Lee and von Gunten, 2012].

Die biologisch aktiven Kohlefilter (BAC = Biofiltration) führen zu hohen Eliminierungsraten der Mikroverunreinigungen in Kombination mit einer vorhergehenden Ozonung [Farre et al., 2011] [Reungoat et al., 2011; Reungoat et al., 2012]). Hier besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf.

Die Verfahren Fällung / Flockung, Chlor / Chlordioxid, Photolyse, Ultraschall, Adsorptionsverfahren, Nanotechnologie und nachgeschaltete biologische Verfahren sind für eine weitere Anwendung zu wenig selektiv und effektiv.

4. Nutzen und Aufwand weitergehender Verfahren

4.1 Ziele der Wasserrahmenrichtlinie

4.1.1 Chemischer Zustand der Fließgewässer

In Deutschland wurde der chemische Zustand (s. Kap. 1.1) im ersten Bewirtschaftungsplan für 88 % der Oberflächenwasserkörper der Fließgewässer als „gut“ beurteilt (Stand: 22.3.2010). Diese Bewertung erfolgte zum Teil noch ohne Berücksichtigung der neuen Umweltqualitätsnormen der EU RL 2008/105/EG.

Setzt man als Maßstab die Umweltqualitätsnormen der nunmehr geltenden Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer, die die RL 2008/105/EG in

deutsches Recht umsetzt, an, so verfehlen alle Wasserkörper das Ziel des „guten chemischen Zustands“ (vergl. Kapitel 1.1). Ursache ist die Umweltqualitätsnorm für Quecksilber (Hg) in Biota, die flächendeckend in Europa überschritten wird.

Bei Anwendung der Festlegungen der neuen EQS-RL 2013/39/EU (s. Kapitel 1.1) hat sich dies nicht geändert. Ferner sind bei Blei, Cybutryn und Terbutryn vereinzelt und bei Benzo[a]pyren, Fluoranthen, Nickel und Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) häufiger Überschreitungen festzustellen.

Abbildung 6

Auswertung der Umweltqualitätsnormen (UQN) für die Wasserphase „chemischer Zustand“ (Oberflächengewässerverordnung, Anlage 7) (LAWA-Messstellen, 2009-2011)

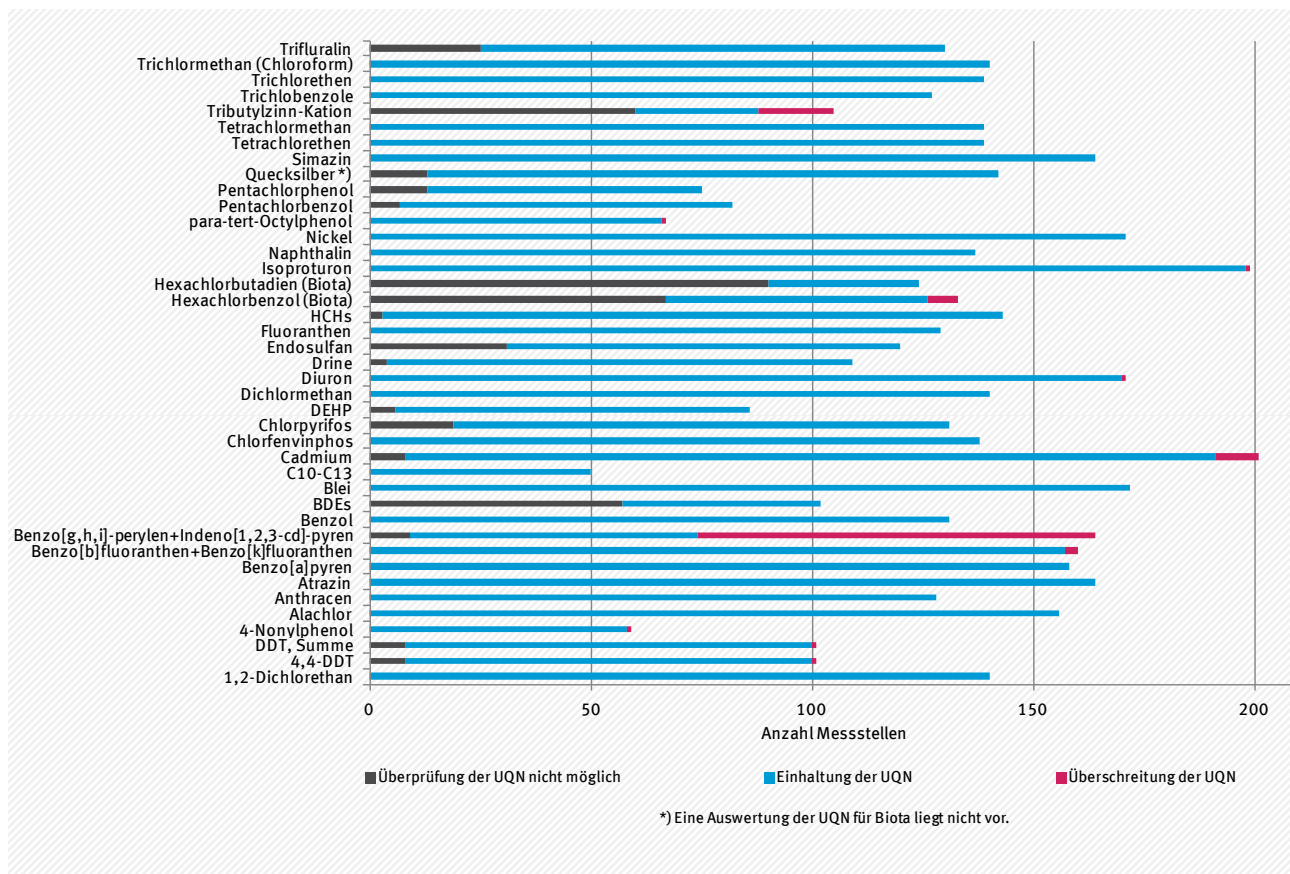
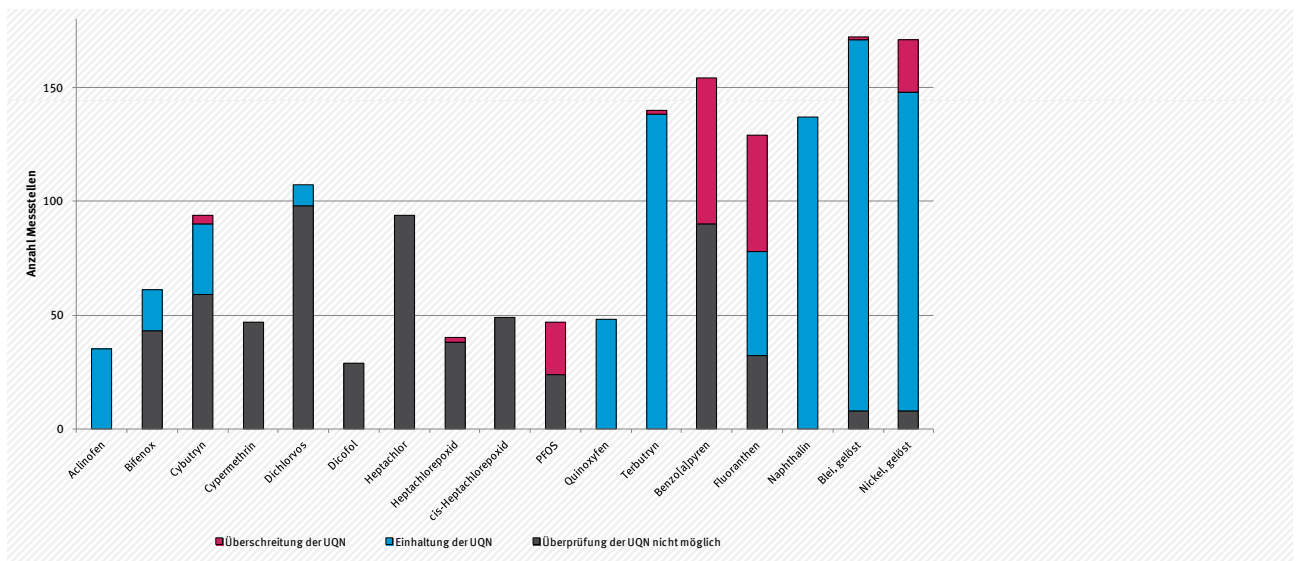


Abbildung 7

Auswertung der Stoffe mit überarbeiteter Umweltqualitätsnorm (UQN) und der neu geregelten Stoffe der Richtlinie 2013/39/EU „chemischer Zustand“ (LAWA-Messstellen, 2009-2011)



Quelle: Zusammenstellung des Umweltbundesamtes nach Angaben der LAWA

4.1.2 Ökologischer Zustand der Fließgewässer

Die Einstufung des ökologischen Zustands von Gewässern umfasst auch die Bewertung flussgebietspezifischer Schadstoffe. Für Schadstoffe, die in signifikanten Mengen eingetragen werden, leiten die Mitgliedstaaten Umweltqualitätsnormen zum Schutz der aquatischen Lebensgemeinschaften ab (Anhang V, 1.2.6 EG-Wasserrahmenrichtlinie⁴). In Deutschland gelten Stoffe als gewässerrelevant, die an repräsentativen Messstellen in Konzentrationen größer als die halbe Umweltqualitätsnorm auftreten (s. Begründung zur OGewV). In Deutschland wurden für 162 Stoffe Umweltqualitätsnormen rechtsverbindlich in Anlage 5 der OGewV festgelegt. Die Prüfung auf Einhaltung der Umweltqualitätsnorm erfolgt an Hand von Jahresmittelwerten.

Für den Zeitraum 2009-2011 werden diese Umweltqualitätsnormen bei den Metallen im Schwebstoff für Zink, Kupfer, Arsen und Chrom und für gelöste Konzentrationen für Silber und Selen, bei den Umweltchemikalien für Dibutylzinn-Kation, einige polychlorierte Biphenyle und Tetrabutylzinn und bei Pflanzenschutzmitteln für 2,4-D, Bentazon, Dichlorprop, Diflufenican, Dimethoat, MCPA, Mecoprop, Monolinuron und Parathion-Ethyl überschritten.

4.2 Sensible Gewässernutzungen

Werden Gewässer als Badegewässer, für die Trinkwassergewinnung oder für die landwirtschaftliche Bewässerung genutzt, können sich erhöhte Anforderungen an die Gewässerqualität und damit an die Barriersysteme stellen.

In der industriellen Produktion sind bisher keine Branchen bekannt, in denen die Verwendung von Wasser aus Gewässern, die mit Mikroverunreinigungen verunreinigt sind, Probleme bereitet. Betriebe nutzen i.d.R. die für den Herstellungsprozess erforderliche betriebsinterne Wasseraufbereitung, so dass sich keine erhöhten Anforderungen an die Gewässerqualität ergeben.

4.3 Anforderungen zum Schutz der Meere

Biologisch schwer abbaubare (persistente) Stoffe können sich aufgrund ihrer Langlebigkeit in den Meeresökosystemen verbreiten und anreichern. Effekte können verzögert und weit entfernt von der Kontaminationsquelle auftreten. Daher wurde von den regionalen Meeresschutzkonventionen OSPAR⁵ (Übereinkommen zum Schutz des Nord-Ostatlantiks) und HELCOM⁶ (Übereinkommen zum Schutz der Ostsee) vereinbart, dass für „gefährliche Stoffe“, d.h.

⁴ Richtlinie 2000/60/EG vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, ABl. EG L 327, S. 1ff.

⁵ www.ospar.org
⁶ www.helcom.fi

solche, die persistent, bioakkumulierend und toxisch Stoffe (PBT-Stoffe) sind, die Einleitungen, Emissionen und Verluste in die Meeresumwelt bis zum Jahr 2020 beendet werden sollen.^{7,8}

Die HELCOM-Ministererklärung vom 3. Oktober 2013 greift die Ergebnisse des COHIBA Projektes (s. Abschnitt 1.3) auf und fordert für gefährliche Stoffe: "... encouraging continued research on hazardous substances of specific concern to the Baltic Sea, including on their interaction and cumulative effects as well as source reduction measures and development of cost-efficient end-of-pipe solutions..."⁹

Die 2008 in Kraft getretene Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (2008/56/EG)¹⁰ (MSRL) schafft einen rechtlich verbindlichen Ordnungsrahmen für notwendige Maßnahmen, um bis 2020 einen „guten Zustand der Meeresumwelt“ in allen europäischen Meeren zu erreichen oder zu erhalten.

Die erste Bewertung des Umweltzustands (Anfangsbewertung)¹¹ der deutschen Nord- und Ostseegebiete zeigt, dass der gute Umweltzustand in beiden Meeren in großen Teilen verfehlt wird. Dazu trägt auch die Verschmutzung durch Schadstoffe bei. Ursache ist der Eintrag über Flüsse mit Kläranlagen. Bis 2015 sind zur Umsetzung der MSRL Maßnahmenpläne zu entwickeln, die bis 2016 umzusetzen sind. Eine der erfolgversprechendsten Maßnahmen ist die Einführung weitergehender Verfahren in der Abwasserreinigung. Die Einführung der vierten Reinigungsstufe verminderte den Eintrag persistenter, biologisch schwer abbaubarer Stoffe in die Meeresumwelt und damit auch das Risiko für marine Organismen durch Stoffgemische. Für eine rasche Verbesserung der Situation in die Küsten- und Meeresgewässern eingetragen werden, ist der Ausbau von kommunalen Kläranlagen in Küstennähe die entscheidende Schlüsselmaßnahme. Die Nähe zu Küste verstärkt den entlastenden Effekt, da nur wenige Abbau- und Speicherprozesse stattfinden, die Entlastungen also weitgehend direkt wirken. Aus diesem Grunde hat das Umweltbundesamt den raschen Ausbau der großen Kläranlagen in den Küstenbundesländern als einen wichtigen Baustein für das erste Maßnahmenprogramm der Meeresstrategierahmenrichtlinie vorgeschlagen.

7 www.ospar.org/html_documents/ospar/html/10-03e_nea_environment_strategy.pdf#hazsubs

8 <http://helcom.fi/Recommendations/Rec%2031E-1.pdf>

9 <http://helcom.fi/ministerial2013>

10 <http://www.meeresschutz.info/>

11 <http://www.meeresschutz.info/index.php/berichte.html>

4.4 Energieaufwand für weitergehende Verfahren

[DWA, 2012] ermittelte die spezifischen durchschnittlichen Stromverbräuche für Kläranlagen ohne weitergehende Verfahren für Deutschland (Tab. 5).

Tabelle 5

Stromverbrauch der Kläranlagen ohne weitergehende Verfahren, aufgeteilt nach Größenklasse

Größenklasse	Einwohnerwerte	Stromverbrauch [kWh/(EW/a)]
1	≤ 1.000	54,1
2	> 1.000 – 5.000	41,5
3	> 5.000 – 10.000	38,1
4	> 10.000 – 100.000	34,1
5	> 100.000	32,9

Quelle: DWA (2012)

Die Einführung weiterer Behandlungsstufen führt in jedem Fall zu einem erhöhten Energieverbrauch. Er steigt in der Regel um 5 – 30 % gegenüber dem Normalbetrieb. In Abhängigkeit von der Anlagengröße, der Abwasserqualität und dem verwendeten Verfahren kann der Anstieg auch höher sein.

[Bolle and Pinnekamp, 2011] betrachteten den Energieverbrauch der Ozonung, der adsorptiven Verfahren mit Aktivkohle (Pulveraktivkohle-Zugabe im Kontaktbecken und granuliert Aktivkohle regeneriert) und der Membranverfahren. Für die Verfahren mit Aktivkohle wurde eine ganzheitliche Betrachtung unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs bei der Herstellung der Kohle, des Transports, der Schlammabtrennung, der Schlammverbrennung, der Filtration und der Regeneration bei granulierter Aktivkohle durchgeführt. Die Daten wurden an einer Modellkläranlage (100.000 EW)¹² erhoben.

In der nachfolgenden Tabelle 6 ist der berechnete spezifische Energiebedarf für diese Modellkläranlage ohne und mit verschiedenen weitergehenden Verfahren dargestellt.

12 Mit folgenden Verfahrensschritten Abwasserhebwerk für 3m Förderhöhe, Rechen, Sandfang – belüfteter Langsandfang, Vorklärung einschl. Primärschlammumpwerk, Belüftung mit Stickstoffelimination, Belüftung / Gebläse, Umwälzung (Denitrifikationszone), Rezirkulation, Rücklaufschlamm, Biologische Reinigungsstufe insgesamt Nachklärung einschl. Überschussschlammumpwerk, Fällmitteldosierung (Simultanfällung), Filtration einschl. Hebwerk und Abwärts durchströmter Raumfilter

Tabelle 6

Berechneter Energieverbrauch einer Modellkläranlage mit verschiedenen weitergehenden Aufbereitungsverfahren

Behandlungsverfahren	spez. elek. Energiebedarf [kWh/m³]		spez. elek. Energiebedarf [kWh/EW·a]	
	von	bis	von	bis
Modell-KA ohne Zusatzverfahren	0,232		20,73	
Ozonung allein	0,020	0,420	1,79	37,55
Modell-KA plus Ozonung	0,252	0,652	22,52	58,28
granulierte Aktivkohle allein	0,060	0,170	5,36	15,21
Modell-KA plus granulierte Aktivkohle	0,292	0,402	26,09	35,94
Pulveraktivkohle allein	0,023	0,136	2,05	12,16
Modell-KA plus Pulveraktivkohle	0,255	0,368	22,78	32,89
Modell-KA plus MBR ¹	0,484		43,08	

¹ Separate Energiedaten für MBR liegen nicht vor

Quelle: Bolle, Pinnekamp (2011)

Für diese Modellkläranlage konnte gezeigt werden, dass der Energieverbrauch der verschiedenen Verfahren annähernd identisch ist, wenn für die Aktivkohle der gesamte Lebensweg berücksichtigt wird.

In der nächsten Tabelle 7 sind Angaben verschiedener Autoren zum Energieverbrauch der Ozonung und Aktivkohlebehandlung zusammengeführt, die auf der Basis von Erfahrungen aus bestehenden Anlagen ermittelt wurden.

Tabelle 7

Energieverbrauch verschiedener erweiterter Verfahren

Energiebedarf	Energiebedarf [kWh/m³]		Energiebedarf [kWh/EW·a]	
	von	bis	von	bis
Ozonung^{1,2}	0,28		34	
► Energiebedarf des nachgeschalteten Sandfilters		0,12		11,5
Ozonung³	0,03 ⁴	0,58 ⁵	2,7 ⁶	52 ⁷
► mittlerer Wert	0,22		20	
Pulveraktivkohle-Zugabe⁸	0,012	0,042	1,07	3,76
► Pulveraktivkohle-Zugabe im Flockungsraum des Filters ⁹	0,08	1,1	7,15	98,3
Granulierte Aktivkohle-Zugabe	0,2	3,64	8,9	179
► regenerierte granulierte Aktivkohle Durchschnitt	0,60		53,6	
► frische granulierte Aktivkohle Durchschnitt	1,2		107,3	

¹ (Abegglen und Siegrist 2012), Wert einschließlich der Sauerstoffbereitstellung

² Es wurde von einer Ozondosis von 0,75 g O₃/g DOC ausgegangen. Der Energieverbrauch für die Herstellung von Ozon beträgt 12,5 kWh/m³ (Erfahrungen aus dem Pilotprojekt Regensburg).

³ Bolle, F. W., and J. Pinnekamp (2011), Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I.

⁴ niedrigste Ozondosis, einschließlich Sauerstoffbereitstellung

⁵ höchste Ozondosis und ungünstige Bedingungen, einschließlich Sauerstoffbereitstellung

⁶ (Abegglen und Siegrist 2012), Wert einschließlich der Sauerstoffbereitstellung

⁷ Es wurde von einer Ozondosis von 0,75 g O₃/g DOC ausgegangen. Der Energieverbrauch für die Herstellung von Ozon beträgt 12,5 kWh/m³ (Erfahrungen aus dem Pilotprojekt Regensburg).

⁸ Bolle, F. W., and J. Pinnekamp (2011), Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I, Energiebedarf auf der Kläranlage ohne PAK-Herstellung

⁹ beinhaltet die Herstellung der Pulverkohle, die Filtration, zusätzliche Behandlung des Rückspülwassers, die Wasserförderung, Behandlung des Schlammes, inkl. Verbrennung und Energierückgewinnung

Nach [Abegglen und Siegrist, 2012] führt eine Ozonung zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs um 0,05 – 0,1 kWh/m³ (entspricht 10 – 30 %). [Nahrstedt et al., 2011] ermittelten Standzeiten der Filter mit granulierter Aktivkohle von 11 Monaten. Sie gehen davon aus, dass diese in Abhängigkeit von den Randbedingungen auf 24 Monate erweitert werden können. Eine Standzeitverlängerung der Filter würde den Energieverbrauch reduzieren.

Der Einsatz von Nanofiltration und Umkehrosmose zur Entfernung von organischen Mikroverunreinigungen aus Abwasser wird kaum angewendet, da der Energieverbrauch zwischen 1 und 2,7 kWh/m³ (89 - 241 kWh/(E*a)) liegt. Für die Umkehrosmose liegen die Werte aufgrund der höheren Betriebsdrücke in der Anlage i.d.R. höher als für die Nanofiltration. Für eine ganzheitliche Betrachtung ist es erforderlich, die Kosten und den Energieverbrauch für die Membranen, Entsorgung der Konzentrate als auch für die Verblockungsverhinderungsmittel zu berücksichtigen.

Im PILLS-Vorhaben¹³ [Adamczak et al., 2012] wurde der Energieverbrauch beim Einsatz von Membranbioreaktoren (MBR) auf 1,2 – 1,5 kWh/m³ geschätzt, wobei 0,3 bis 0,6 kWh/m³ auf die mechanische Vorbehandlung entfallen.

(Abegglen und Siegrist 2012) gehen für eine Membrananlage von einem zusätzlichen Energiebedarf für eine Membrananlage von 1 kWh/m³ aus. Der gleiche Wert wird für 2013 für die Membrananlage des Gruppenklärwerks Nordkanal angegeben.¹⁴ Der Energiebedarf der Anlage soll im Rahmen eines UIP-Projektes „Energetische Optimierung der Membrankläranlage am Beispiel des Gruppenklärwerks Nordkanal“ durch verbesserte Regelung auf 0,8 kWh/m³ gesenkt werden.

Für die AOP-Verfahren (Advanced Oxidation Processes, erweiterte Oxidationsverfahren) sind verschiedene Kombinationen von Oxidationsmitteln möglich, die sich im Energiebedarf unterscheiden. Die Angaben zu den Energieverbräuchen sind sehr uneinheitlich. Sie hängen stark von der Zusammensetzung der Wässer ab und sind daher nicht vergleichbar.

4.5 Kosten für weitergehende Verfahren

Kostenschätzungen für die Einführung weitergehender Verfahren zur Eliminierung von Mikroverunreinigungen wurden verschiedentlich durchgeführt.

[Türk et al., 2013] haben unterschiedliche Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der Grundlage der Ergebnisse zahlreicher nationaler und internationaler Forschungsvorhaben und großtechnischer Umsetzungen untersucht und deren Effizienz bewertet. Es handelt sich hierbei um Versuchsanlagen (halbtechnischer Maßstab) und Pilotanlagen (großtechnischer Maßstab). In dem Vorhaben wurden die Investitionskosten (Bau-, Maschinen- sowie der Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (EMSR-Technik)) und die Nebenkosten für Aktivkohle-Behandlung und Ozonung für unterschiedliche Kläranlagenausbaustufen berechnet. Analog dazu wurden die Gesamtbetriebskosten nach Energie-, Betriebsmittel- und Jahreskosten aufgeschlüsselt.

In der nachfolgenden Tabelle sind Angaben aus verschiedenen Kostenstudien zusammengestellt.

Tabelle 8

Literaturangaben zu den spezifischen Jahreskosten für die Elimination von Mikroverunreinigungen mit unterschiedlichen Verfahren

Literaturstelle	Spezifische Jahreskosten [€/m ³]
DOHMANN et. al, 2005	Pulveraktivkohle: 0,10 - 0,25 O ₃ : 0,10 - 0,15 UV: 0,03 - 0,06
IVASHECHKIN, 2006	Granulierte Aktivkohle: 0,34 - 0,5 Pulveraktivkohle: 0,16 - 0,19 O ₃ : 0,07 - 0,21
SPITELLER et al., 2008	O ₃ : 0,072 - 0,103 Granulierte Aktivkohle: 0,101 - 0,168 Pulveraktivkohle: 0,098 - 0,152
BAFU (2008 und 2012)	O ₃ : 0,02 - 0,14 O ₃ +SF: 0,04 - 0,26 Pulveraktivkohle: 0,04 - 0,23 Pulveraktivkohle+SF: 0,07 - 0,35
MKULNV NRW, 2008	O ₃ : 0,04 - 0,06 O ₃ +UV: 0,05 - 0,07 Pulveraktivkohle+SF: 0,11 - 0,13 Pulveraktivkohle in BB: 0,15 - 0,17

Quelle: [Mertsch et al., 2013] aus [Türk et al., 2013]

SF = Sandfilter
BB = Belebungsbecken

In der Tabelle 9 ist ein Kostenvergleich verschiedener Aktivkohleanlagen aufgeführt.

¹³ Pharmaceutical Input and Elimination from Local Sources
¹⁴ mündl. Mitteilung Frau Drensla, stellvertretenden Abteilungsleiterin der Abteilung „Technische Dienste, Forschung und Entwicklung Erftverband“

Tabelle 9

Kostenvergleich von Aktivkohleanlagen

Kläranlage	EW	Spez. Jahreskosten bezogen auf		Status quo / Stand
		Schmutzwasser [€/m³] ¹	Frischwasser [€/m³] ¹	
KA Mannheim	145.000	0,05	0,07	In Betrieb
KW Steinhäule (Ulm)	400.000	0,08 (0,02) ^{2,3}	0,19 (0,13) ^{2,3}	Baubeginn
KA Böblingen-Sindelfingen	250.000	0,03 (0,03) ²	0,07 (0,06) ²	In Betrieb
KA Stockacher Aach	48.000	0,07	0,14	In Betrieb
KA Kressbronn-Langenargen	30.000	0,08-0,09	0,16	In Betrieb
KA Schwerte (Pulveraktivkohle)	50.000	0,13	0,34	In Betrieb
KA Obere Lutter	380.000	0,06	0,11	Teilbetrieb + Bau
KA Dülmen (Pulveraktivkohle)	55.000	0,06 ⁵	0,37 ⁵	Planung
KA Lage (granulierte Aktivkohle)	80.000	0,09 (0,08) ²	0,24 (0,22) ²	Vorplanung
KA Neuss Ost (Variante 4)	280.000	0,04 - 0,07 (0,02 - 0,04) ^{3,4}	0,05 - 0,09 (0,03 - 0,05) ^{3,4}	Studie
Mittel der spezifische Jahreskosten		0,07	0,17	

Quelle: verändert und Auszüge [Alt and Barnscheidt, 2012] [Türk et al., 2013]

1 Ohne Berücksichtigung der Förderung der Investitionskosten und Reduzierung der Abwasserabgabe

2 Werte in Klammern unter Berücksichtigung der Reduzierung der Abwasserabgabe

3 Unter Berücksichtigung der Förderung der Investitionskosten

4 Nach Hilbig und Herbst (2012)

5 Nahrstedt et al., (2012)

In einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes haben Hillenbrand et al. (2014a) die verfügbaren Studien mit Kostenangaben zusammengestellt und im Hinblick auf Währungsparitäten, Abschreibungen und Energiekosten harmonisiert. Im Ergebnis liegen die mittleren Kosten je nach Größe der Anlage zwischen 5 und 7 Cent (Größenklasse 5) und zwischen 8 und 11 Cent (Größenklasse 4) pro m³ behandelten Abwassers. Dazu kommen noch Kosten zwischen 5 und 8 Cent pro m³ für eine mögliche Nachbehandlung.

Nach Mertsch [Mertsch, 2010 und 2013] betragen die durchschnittliche Abwassergebühren in NRW 2,50 €/m³ für Schmutzwasser und 0,80 €/m³ für Niederschlagswasser. Wird von spezifischen Jahreskosten von 0,05 – 0,19 €/m³ für die zusätzliche Reinigungsstufe ausgegangen, so würden sich die Abwassergebühren um durchschnittlich 2 – 10 % erhöhen.

Hochgerechnet auf die gesamte Bundesrepublik ergeben sich Jahreskosten (Investitions- und Betriebskosten) in Höhe von 690 Mio. € für die GK 4 (davon 322 Mio. € für die evtl. Nachbehandlungsstufe) und 469 Mio. € für die GK 5 (davon 219 Mio. € für die evtl. Nachbehandlungsstufe) (Hillenbrand et al. (2014)).

Bei der Kostenbetrachtung muss auch berücksichtigt werden, dass das eingesetzte Behandlungsverfahren durch die Verbesserung der Abwasserqualität zu einer Reduzierung der Abwasserabgabe führen kann.

5. Empfehlungen für die Einführung einer vierten Reinigungsstufe

5.1 Kriterien für die Festlegung des Standes der Technik bei der weitergehenden Abwasserreinigung und regulatorische Verankerung

Bei der Festlegung des Standes der Technik wird keine dezidierte Verfahrenstechnik vorgeschrieben, da dies die Anwendbarkeit von Verfahren einschränken und auf lange Zeit den technischen Fortschritt behindern würde. Stattdessen werden geeignete Überwachungsparameter definiert, die eine Erfolgskontrolle der ergriffenen Maßnahmen ermöglichen und eine Unterscheidung von Anlagen nach dem Stand der Technik von Anlagen mit schlechterer Reinigungsleistung erlauben. Diese Parameter sollten folgende Kriterien erfüllen:

- ▶ sie erlauben eine sichere und gerichts feste Unterscheidung von Anlagen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit;
- ▶ sie erlauben eine Überprüfung des bestimmungsgemäßen Betriebes der Anlagen nach dem Stand der Technik;
- ▶ sie bilden darüber hinaus gleichzeitig die unerwünschte Wirkung der Abwassereinleitung in der Umwelt ab, zeigen also direkt die durch die Behandlung vermiedene Belastung.

Da bei der Einhaltung der UQN keine unerwünschten Wirkungen im Gewässer zu besorgen sind, sollte idealerweise die Erfolgskontrolle über biologische Wirtstests erfolgen, und bei der Festlegung der Standes der Technik sollten Anforderungen für biologische Wirtstests festgelegt werden. Neu entwickelte bioanalytische in vitro Verfahren wie der Yeast Estrogen Screen (YES) Assay zur Erfassung hormoneller Wirkungen, stehen prinzipiell zur Anwendung zur Verfügung.

Mittelfristiges Ziel ist es, Anforderungen für die hormonelle Wirkung von Abwasser zu formulieren und bioanalytische Verfahren in die Abwasserverordnung aufzunehmen.

Für die Überwachung von Kläranlagen mit einer Verfahrensstufe zur Entfernung von Mikroverunreinigungen reicht die Sensitivität dieser biologischen

Testverfahren zur Zeit jedoch nicht aus, wenn die native Probe i.S. der AbwV untersucht wird. Allerdings eignen sich die existierenden Verfahren nach Anreicherung der Probe für die Erfolgskontrolle. Zusätzlich sind für die Kontrolle des Eliminationsverfahrens geeignete chemische Stoffe als Überwachungs- oder Kontrollparameter festzulegen. Von den aktuellen prioritären Stoffen der Wasserrahmenrichtlinie erscheint insbesondere das Biozid Isoproturon ein geeigneter Kandidat zu sein, weiterhin sind Arzneimittel (z.B. Diclofenac) oder Stoffe, die gewerblich breit eingesetzt werden (z.B. Benzotriazol) geeignete Kandidaten.

In der Schweiz wurde ein vergleichbares Konzept bereits realisiert.

5.2 Stufenweises Vorgehen zur Verbesserung der Oberflächenwasserqualität

Ein iteratives Vorgehen soll gewährleisten, dass Maßnahmen aus verschiedenen Bereichen ausgewählt werden, die sich durch eine besonders hohe Wirksamkeit und Kosteneffizienz auszeichnen.

Aufgrund der technischen Komplexität und aus Gründen der Kostendegression erscheint momentan eine generelle Aufrüstung mit einer weiteren Verfahrensstufe für große Kläranlagen sinnvoll. Die Verfahren der Ozonung mit Nachbehandlungsstufe und Aktivkohleadsorption sind dabei wirkungsvolle Verfahren für eine weitergehende Abwasserbehandlung. Sie werden großtechnisch bereits auf verschiedenen Kläranlagen erprobt.

Weiterhin sind eine Verminderung von Regenüberläufen und eine verbesserte Regenwasserbehandlung (z.B. durch den Einsatz von Schrägklärern in Regenbecken) sinnvolle Maßnahmen mit hoher Kosteneffizienz, deren Umsetzung vorrangig realisiert werden sollte.

Zusätzliche regionale Schutzziele, wie etwa der Schutz von regionalen Trinkwasserreserven oder besonders empfindlicher Gewässertypen, können die Einbeziehung auch kleinerer Anlagen in bestimmten Regionen notwendig machen.

Bei Einführung einer weitergehenden Reinigungsstufe kann als zusätzlicher Effekt eine deutliche Verminderung der Phosphoreinträge und damit eine Bekämpfung der Eutrophierung erzielt werden. Ferner führt die Abwasserbehandlung zu einer verbesserten Gewässerhygiene.

5.3 Finanzierungsmodelle

Bei schrittweiser Einführung einer zusätzlichen Reinigungsstufe für die 240 großen Kläranlagen > 100.000 EW (GK 5) würden jährliche Zusatzkosten in einer Größenordnung von ca. 470 Mio. Euro entstehen, womit ca. 50 % der Gesamtabwassermenge behandelt werden könnten. Unter Berücksichtigung der Kläranlagen > 50.000 EW würden sich die Kosten auf ca. 700 Mio. Euro erhöhen und ca. 65 % der Abwassermenge würden behandelt werden. Bei einer Hinzunahme der Kläranlagen > 10.000 EW fielen jährliche Zusatzkosten in Höhe von ca. 1,3 Mrd. Euro an, was zu einer Behandlung von ca. 90 % der Abwassermenge führen würde. (Quelle: Metzger, Tjoeng und Kersting (2014)). Damit wären alle Anlagen der GK 4 und 5 mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe einschließlich Nachbehandlung ausgerüstet.

Diese Kosten relativieren sich, wenn sie auf die einzelne Person (6 bis 16 Euro pro Jahr Mehrkosten) oder auf das Abwasservolumen (0,05 – 0,19 €/m³) umgelegt werden. Dennoch stellt sich die Frage nach einer „gerechten“ Finanzierung. Da es sich bei der Reduzierung der Mikroverunreinigungen um eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe handelt, die Kosten aber bei einem schrittweisen Vorgehen zunächst nur bei den großen Kläranlagen anfallen würden, ist nach Optionen für eine öffentliche Anreizfinanzierung zu suchen.

Je nachdem, wie die Nachrüstung ordnungsrechtlich vorgeschrieben wird, kommen unterschiedliche Finanzierungsmöglichkeiten in Betracht. Bei einer ordnungsrechtlichen Verankerung als Stand der Technik nach AbwV können Investitionen in die Elimination von Mikroverunreinigungen über die Mechanismen der Abwasserabgabe (Abgabeermäßigung, Verrechnung) abgabemindernd geltend gemacht werden. Dies wäre selbst dann denkbar, wenn kein zusätzlicher Parameter für Mikroverunreinigungen in das AbwAG aufgenommen würde¹⁵. Denkbar ist auch eine gezielte öffentliche Bezuschussung der Behandlung von Mikroverunreinigungen aus dem Aufkommen

der Abwasserabgabe. Betroffen wären aber in allen diesen Fällen nur die jeweiligen Betreiber der großen Anlagen bzw. die Bundesländer, in deren Hoheitsgebiet die Anlagen liegen, die zu bezuschussen wären. Einen anderen Weg der Finanzierung geht wegen der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe Elimination von Mikroverunreinigungen die Schweiz:

Am 3. März 2014 hat der Schweizer Nationalrat der Änderung des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) bezüglich der verursachergerechten Finanzierung der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser zugestimmt. Damit wird eine bis Ende 2040 befristete gesamtschweizerische Spezialfinanzierung für Massnahmen bei Abwasserreinigungsanlagen (ARA) geschaffen. 75 Prozent der Investitionskosten für die Aufrüstung von 100 der insgesamt 700 Schweizer ARA sollen über eine gesamtschweizerische Finanzierungslösung gedeckt werden. Zur Mitfinanzierung der Massnahmen wird bei allen ARA der Schweiz pro angeschlossene Einwohnerin und angeschlossenen Einwohner eine Abgabe von maximal neun Franken erhoben. Die ARA finanzieren diese Abgabe über eine Erhöhung ihrer bestehenden Abwassergebühren. Die Änderung wird voraussichtlich ab 1.1.2015 in Kraft treten, die Abgabe wird voraussichtlich ab 2016 erhoben. Die Details der Spezialfinanzierung und die Steuerung der Massnahmen werden in der Gewässerschutzverordnung (GSchV) geregelt. Die Vorlage zur Änderung der GSchV wird voraussichtlich ab Mitte 2014 in eine Anhörung gehen.

In Deutschland wird auch diskutiert, die Verursacher stärker in die Finanzierungspflicht zu nehmen. Die Verursacher z.B. bei Humanarzneimitteln sind aber letztendlich doch wieder die Verbraucher. Allerdings haben die Mitglieder der Umweltministerkonferenz am 7.6.2013 die Bundesregierung gebeten, Vorschläge zu erarbeiten, mit welchen Regelungen die Hersteller von Human- und Tierarzneimittelrückständen inkl. Antibiotika und sonstigen anthropogenen Mikroverunreinigungen angemessen an den Kosten der Minderungsmaßnahmen beteiligt werden können. Angesichts der Vielzahl der Hersteller im In- und Ausland und der unterschiedlichen Wirksamkeit der hergestellten Stoffe auf die aquatischen Lebensgemeinschaften dürfte eine risikoadäquate Anlastung der Behandlungskosten bei den Herstellern praktisch nicht operationalisierbar sein. Die Einführung einer pauschalen Steuer auf Human- und Tierarzneimittel wäre zwar mit den geringsten Transaktionskosten verbunden, einer Zweckbindung für eine zusätzliche Abwasserbehandlung unterläge sie jedoch nicht.

¹⁵ Dies ist derzeit wegen der damit verbundenen analytischen Probleme noch nicht realisierbar.

6. Stellungnahme zu häufig vorgebrachten Argumenten gegen die Einführung einer vierten Reinigungsstufe

Gegen die Einführung einer vierten Reinigungsstufe werden von Vertretern der Wasserwirtschaft, die der Einführung skeptisch gegenüberstehen, häufig die folgenden Argumente genannt:

- a) Die Implementierung und der Betrieb einer vierten Reinigungsstufe kosten zusätzliches Geld.
- b) Der Betrieb einer vierten Reinigungsstufe verbraucht vergleichsweise viel Energie, was unweigerlich den Anstieg von klimaschädlichen CO₂-Emissionen mit sich bringt.
- c) Bei einer Behandlung mit Ozon besteht die Gefahr der Bildung von anderen schädlichen Stoffen (Transformationsprodukten).
- d) Eine Entscheidung zur Einführung der vierten Reinigungsstufe auf kommunalen Kläranlagen geht mit dem Risiko einher, dass wesentliche und sehr effektive Aktivitäten zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in Oberflächengewässern in anderen, ggf. relevanteren Sektoren unterbleiben oder zurückgestellt werden.

Wie in den vorherigen Kapiteln dargestellt, sind diese Argumente nachfolgend noch einmal zusammenfassend bewertet:

- a) Die erforderlichen Zusatzkosten sind in Kapitel 4.5 und 5.3. dargestellt. Sie sind mit 6 bis 16 Euro pro Jahr und Mensch vergleichsweise niedrig. Auf das Abwasservolumen bezogen fallen relativ geringe Zusatzkosten in Höhe von 0,05 – 0,19 €/m³ an. Je nachdem wie die Nachrüstung erfolgt, kommen unterschiedliche Finanzierungsmöglichkeiten in Betracht. Bei einer ordnungsrechtlichen Verankerung als Stand der Technik nach der Abwasserverordnung könnten Investitionen in die Elimination von Mikroverunreinigungen über die Mechanismen der Abwasserabgabe (Abgabeermäßigung, Verrechnung) abgabenmindernd geltend gemacht werden und somit Anreiz wirkend für die Installation und den Betrieb einer 4. Reinigungsstufe wirken. Mit dem Betrieb der 4. Reinigungsstufe sind als unterstützende Zusatzeffekte eine Minderung der Abwasserabgabe hinsichtlich der Parameter CSB und P zu erwarten.

- b) Die Einführung weiterer Behandlungsstufen führt zu einem erhöhten Energieverbrauch, in der Regel um 5 – 30 % gegenüber dem Normalbetrieb (s. Kap. 4.4). Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Kläranlagen würden diesen Mehrbedarf deutlich verringern. So kann auch bei modernen Kläranlagen durch ein effizientes Energiemanagement mit kurz- und mittelfristig umsetzbaren Maßnahmen der Energiebedarf um 20-30% gesenkt werden.
- c) Die Ozonung und Adsorption an Pulveraktivkohle oder granulierten Aktivkohle sind wirkungsvolle Verfahren für eine weitergehende Abwasserbehandlung. Durch die Ozonung wird eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen und ggf. pathogen wirksamen Keimen entfernt (Abwasserdesinfektion). Durch die weitergehende Abwasserbehandlung entstehende Transformationsprodukte, die ggf. andere und höhere Wirkungspotenziale aufweisen können als die Ausgangsstoffe, werden nach Entstehung durch Ozonierung über die Wiedereinleitung in die biologische Klärstufe abgebaut. Kläranlagen mit einer nachgeschalteten zweiten biologischen Klärung haben bislang keine erhöhten Toxizitätswerte gezeigt (s. auch Kapitel 3.2.).
- d) Für die prioritären Stoffe der EG-Wasserrahmenrichtlinie wurde in 2013 ein Eintragsinventar erarbeitet. Dabei stellt der Eintrag über kommunale Abwasser für eine Reihe Stoffe einen sehr wichtigen Eintragspfad dar (s. Kap. 1.2). Dies bedeutet, dass neben europäischen Maßnahmen, die vordringlich das Inverkehrbringen von Stoffen regeln, weitere nachgeschaltete Maßnahmen, wie die Ertüchtigung der Barriersysteme, d.h. die Nachrüstung von kommunalen Kläranlagen mit einer weiteren Verfahrensstufe sinnvoll sind, um den Eintrag von Mikroverunreinigungen in die Gewässer zu verringern. Die Ergebnisse des COHIBA-Projektes (s. Kap. 1.3) zeigen, dass innerhalb eines Maßnahmenpaketes die weitergehende Abwasserreinigung zudem eine wirksame und kostengünstige Maßnahme darstellt.

Fazit

Die Konzentrationen an Mikroverunreinigungen überschreiten in vielen Gewässern die gesetzlich vorgegebenen Umweltqualitätsnormen. Zur Reduzierung der Einträge ist eine Reihe von Maßnahmen erforderlich, insbesondere auch die Erhöhung der Wirksamkeit der Barriersysteme. Dies erfordert die Fortschreibung des Standes der Technik bei der Abwasserbehandlung und die Einführung weitergehender Abwasserbehandlungsverfahren (4. Reinigungsstufe) in den kommunalen Kläranlagen der Größenklasse 5 sowie kleinerer Kläranlagen, die in sensitive Gewässer einleiten. Am wirksamsten und kosteneffizientesten sind dabei gegenwärtig die Verfahren der Ozonierung und der Aktivkohleadsorption. Optionen für eine öffentliche Anreizfinanzierung sollten erwogen werden.

Referenzen

Abegglen, C. and Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen.

Adamczak, K., Lyko, S., Nafo, I., Evenblij, H., Cornelissen, E., Igos, E., Klepiszewski, K., Venditti, S., Kovalova, L., McArdell, C., Helwig, K., Pahl, O., Barraud, O., Casellas, M., Dagot, C., Maftah, C., Ploy, M.-C. and Stalder, T. (2012): Pharmazeutische Rückstände in der aquatischen Umwelt – eine Herausforderung für die Zukunft - Erkenntnisse und Aktivitäten des Europäischen Kooperationsprojektes PILLS.

Alt, K. and Barnscheidt, I. (2012): Kosten des Einsatzes von Aktivkohle in bestehenden Flockungsfiltrationsanlagen. KA - Abwasser, Abfall 59(1), 28-35.

Bolle, F.W.; Pinnekamp, J. (2011): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I, Abschlussbericht - Aktenzeichen: IV-7-042 600 003 J, Im Auftrag von: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Aachen, Dezember 2011

Boxall, A.B.A., Sinclair, C.J., Fenner, K., Kolpin, D. and Maund, S.J. (2004): When synthetic chemicals degrade in the environment. Environmental Science and Technology 38(19), 368A-375A.

COHIBA, (2012): Recommendation Report: Cost effective management options to reduce discharges, emissions and losses of hazardous substances. COHIBA Project Consortium, 2012.

Dorau, W. (2001): Hygienic safety and water-reuse-potential increased by means of biomembrane-technology. In: Werner, C., Schlick, J., Witte, G., Hildebrandt, A. (Hrsg.): Proceedings of the International Symposium „ecosan – closing the loop in wastewater management and sanitation”. Eschborn 2001.

DWA (2012): Stromverbrauch: 4.300 Kläranlagen unter der Lupe. KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall 12.

Farre, M.J., Reungoat, J., Argaud, F.X., Rattier, M., Keller, J. and Gernjak, W. (2011): Fate of N-nitrosodimethylamine, trihalomethane and haloacetic acid precursors in tertiary treatment including biofiltration. Water research 45(17), 5695-5704.

Ghekiere, An, Frederik Verdonck, Michiel Claessens, Els Monteyne, Patrick Roose, Klaas Wille, Annelies Goffin, Karen Rappé, Colin R. Janssen (2013): Monitoring micropollutants in marine waters, can quality standards be met?, Marine Pollution Bulletin, Volume 69, Issues 1–2, 15 April 2013, Pages 243–250

Thomas Hillenbrand, Felix Tettenborn, Eve Menger-Krug, Frank Marscheider-Weidemann, Stephan Fuchs, Snezhina Toshovski, Steffen Kittlaus, Steffen Metzger, Imee Tjoeng, Paul Wermter, Michael Kersting, Christian Abegglen (2014a): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer, Umweltbundesamt, Reihe UBA-Texte | 85/2014, url: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_85_2014_massnahmen_zur_verminderung_des_eintrages_von_mikroschadstoffen_in_die_gewaesser.pdf

Thomas Hillenbrand, Felix Tettenborn, Eve Menger-Krug, Frank Marscheider-Weidemann, Stephan Fuchs, Snezhina Toshovski, Steffen Kittlaus, Steffen Metzger, Imee Tjoeng, Paul Wermter, Michael Kersting, Christian Abegglen (2014b): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer –Kurzfassung-, Umweltbundesamt, Reihe UBA-Texte | 86/2014, url: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_86_2014_mikroschadstoffe_kurzfassung.pdf

Lee, Y., and U. von Gunten (2012), Quantitative structure–activity relationships (QSARs) for the transformation of organic micropollutants during oxidative water treatment, Water Research, 46(19), 6177-6195.

Lee, Y., S. G. Zimmermann, A. T. Kieu, and U. Von Gunten (2009), Ferrate (Fe(VI)) application for municipal wastewater treatment: A novel process for simultaneous micropollutant oxidation and phosphate removal, *Environmental Science and Technology*, 43(10), 3831-3838.

Margot, J., A. Magnet, D. Thonney, N. Chevre, F. de Alencastro, and L. Rossi (2011), *Traitement des micropolluants dans les eaux usées. Rapport final sur les essais pilotes à la step de Vidy (Lausanne)*.

Mertsch, V. (2010), *Strategischer Ansatz zur Reduktion von Spurenstoffen in der aquatischen Umwelt - Projekt „Reine Ruhr“*.

Mertsch, V., H. Herbst, and K. Alt (2013), *Kosten der Elimination von Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen, GEWÄSSER - WASSER - ABWASSER*, Aachen 2013, ISBN 978-3-938996-38-6.

Nahrstedt, A., H. Burbaum, I. Barnscheidt, K. Alt, and J. Fritzsche (2011), *CSB- und Spurenstoffadsorption am Aktivkohlefestbett - Spurenstoffelimination mit granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk „Obere Lutter“*.

Reungoat, J., B. I. Escher, M. Macova, and J. Keller (2011), *Biofiltration of wastewater treatment plant effluent: Effective removal of pharmaceuticals and personal care products and reduction of toxicity*, *Water Research*, 45(9), 2751-2762.

Reungoat, J., B. I. Escher, M. Macova, F. X. Argaud, W. Gernjak, and J. Keller (2012), *Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents*, *Water research*, 46(3), 863-872.

Türk, J., et al. (2013), *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren (TP 9)“*, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV), AZ IV-7-042 600 001I, Vergabenummer 08/0581.

Weyd, M., B. Faßauer, and W. Gootz (2013), *Entwicklung von regenerierbaren, adsorptiven keramischen F/UFMembranen zur effektiven Entfernung von Mikro-schadstoffen und ähnlichen Chemikalien aus belasteten Abwässern dezentraler Anlagen (Anorganischer Membranadsorber)*, edited.



► **Diese Broschüre als Download**
www.uba.de

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt