



INNOVATIVES MULTIBARRIERENSYSTEM ZUR SELEKTIVEN ABWASSERBEHANDLUNG

ENDBERICHT

(Kurzfassung)

April 2022

Mach und Partner ZT-GmbH

SPIN TEC GmbH

Wasser
FÜR GENERATIONEN

SPINTEC 

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Arbeitspaket - Engineering.....	3
3	Arbeitspaket - Monitoring.....	7
4	Arbeitspaket - Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	14
4.1	Wirtschaftlichkeit.....	14
4.1.1	Auslegung Membran.....	14
4.1.2	Auslegung Aktivkohle.....	15
4.1.3	Kostenabschätzung Investitionskosten.....	15
4.1.4	Kostenabschätzung laufende Kosten.....	16
5	Handlungsempfehlungen zur Mikroschadstoff Behandlung.....	19
5.1	Allgemeiner Überblick.....	19
5.2	Rechtsrahmen.....	20
5.3	Ökologische Auswirkungen auf Gewässer.....	20
5.4	Ablaufschema zur Prüfung einer weitergehenden Abwasserreinigung.....	21
5.4.1	Belastungen und Schutzbedürftigkeit.....	21
5.4.2	Priorisierung von Handlungsoptionen.....	22
5.4.3	Kläranlage.....	22
5.5	Ablaufschema.....	34
6	Abbildungsverzeichnis.....	36

1 Einleitung

Mit dem Projekt wird das Ziel einer weitergehenden Abwasserreinigung mit den Schwerpunkten Mikroschadstoffe und Mikroplastik verfolgt. Die öffentliche Abwasserreinigung in der Steiermark erfolgt über Gemeinden, Verbände und Abwassergenossenschaften in insgesamt 593 Kläranlagen (größer 50 EW) mit einer wasserrechtlich bewilligten Reinigungskapazität von rund 2,3 Millionen Einwohnerwerten. 68 Anlagen weisen eine Ausbaupkapazität > 5.001 EW bis 50.000 EW auf, 4 Anlagen sind > 50.000 EW. In der Konzeption der Abwasserbehandlungstechnologie liegt der Focus auf kleinere bis mittlere Ausbaugrößen (5.000 bis ca. 10.000 Einwohnerwerten) für kommunale als auch gewerbliche Anwendungen. Dies entspricht somit weitestgehend der Struktur der steirischen Abwasserwirtschaft. Mit dem Projekt werden damit die Bestrebungen und Ziele zur Sicherung eines nachhaltigen Gewässerschutzes in der Steiermark verfolgt und unterstützt.

Das gegenständliche Projekt baut auf den Ergebnissen eines, durch das Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus geförderten Projekts „PHARMAQUA¹“ auf. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden verschiedenste Membran-Adsorptions-Kombinationen im Labor auf die selektive Abtrennung von anthropogenen Spurenstoffen getestet sowie verschiedenste Aktivkohlen, Zeolithe und Vergaserkohlen auf ihre Abtrennleistung von anthropogenen Spurenstoffen überprüft. Dies sowohl als singuläre Verfahrensstufe als auch in Kombination von rohrförmigen Membranen (Rohrmodulen) mit Adsorptionsmaterialien. Die Aktivkohle wird dabei nicht in das Membranmaterial integriert, sondern der Trennprozess wurde zweistufig ausgeführt. In der ersten Trennstufe (Membran) erfolgte der Rückhalt im klassischen Mikrofiltrationsbereich der verwendeten Membran. Das Permeat der klassischen Membranfiltration wurde im zweiten Trennschritt noch innerhalb des Rohrmembranmoduls mit der Aktivkohle kontaktiert und hinsichtlich der vorhandenen Spurenstoffe gereinigt. Es wurden die zwei Verfahrensweisen Dead-End und Cross-Flow untersucht. Es zeigte sich das die Dead-End Variante nicht geeignet ist, da der sich bildende Filterkuchen zum raschen Verlegen der Membran führt. Bei der Cross-Flow Variante wurde die Membran tangential zum Filter angeströmt und durch die Überströmung der Membran ein Aufbau des Filterkuchens verhindert. Durch die Kombination von Membran- und Adsorptionsprozessen ergibt sich ein Multibarrierensystem und es können positive Effekte beider Verfahren genutzt werden (z.B. Entkeimung durch Membranen, Spurenstoffentfernung durch Adsorption, Rückhalt von Mikroplastik). Von den zahlreichen getesteten Varianten und aufbauend auf den gewonnenen Erfahrungen aus dem Testbetrieb im Labor stellten sich die beiden Ansätze „embedded Multichannel Kapillar Membranen“ und „Inside-Out (IO) Mikrofiltrationsmembran-Aktivkohle

¹ Mach T., Stuhlbacher A., Harasek M., Spitzer S., Jordan C., Rupprich M, Koch M, Kreuzinger N., Haslinger J., Reif D., Spitzer H, Plank M. (2018). Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Abteilung 1/7, <http://www.bmnt.gv.at/service/publikationen/wasser/Pharmaqua-Kurzbericht.html>

Kombination“ als gangbare Varianten für eine technische Umsetzung eines Kombinationsansatzes dar. Anwendungsmöglichkeiten der kombinierten Membran/Adsorptionstechnologie ergeben sich sowohl in der Trinkwasseraufbereitung als auch in der Abwasserentsorgung. Darüber hinaus sind Anwendungen als dezentrale Maßnahmen an Hotspots des Mikroschadstoffeintrags sinnvoll. Solche Hotspots können beispielsweise indirekt- oder direkt einleitende Industriebetriebe sein oder Einrichtungen des Gesundheitswesens, in denen ein hoher Arzneimittelverbrauch vorherrscht. Die Zielsetzung im vorliegenden Projekt besteht in einer ersten Umsetzung der Laboregebnisse aus „PHARMAQUA“ in die Praxis und beinhaltet nachfolgende Arbeitspakete:

- Engineering: Membran-Aktivkohle Kombination – IO (IO-MAM)
 - Optimierung Membrane (Material, Verhältnis Filtrations-Adsorptionsprozess)
 - Hydraulische Optimierung Modul-Layout
 - Verfahrenstechnische Konzeptentwicklungen der IO_MEM Varianten und Bau einer Pilot-Testanlage
- Monitoring: Testung der Pilotanlage unter Praxisbedingungen, Evaluierung der Betriebsfunktionen und Eliminationsleistungen
- Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Projektdurchführung erfolgte durch:

Mach & Partner ZT-GmbH

Gewerbepark 2
A-8111 Gratwein-Straßengel
Ansprechpartner:
Dr. Arnold Stuhlbacher
arnold.stuhlbacher@mach-partner.at



SPINTEC

Impulszentrum 1
A-8250 Vörschnitz
Ansprechpartner:
DI Markus Plank
mplank@spitzer.at



Das Projekt wurde mit finanziellen Mittel des Landes Steiermark, Abteilung 14 unterstützt.

2 Arbeitspaket - Engineering

Zur Lösung von komplexeren Aufgabenstellungen können Membranen mit anderen Verfahren kombiniert werden (Pinnekamp & Friedrich²). Dadurch kann die Leistungsfähigkeit erhöht und Synergieeffekte können miteinander kombiniert werden. Poröse Membranen (Mikro- und Ultrafiltration) können in Kombination mit anderen Verfahren zur Spurenstoffelimination eingesetzt werden. Durch die Kombination von Membran- und Adsorptionsprozessen ergibt sich ein Multibarrierensystem und es können positive Effekte beider Verfahren genutzt werden.

In der Membrantechnik finden sowohl organische als auch anorganische Stoffe Verwendung als Membranmaterial. Organische Materialien (Polymere) zeichnen sich dabei speziell durch ihre große Vielfalt und kostengünstige Herstellung aus. Typische Vertreter von anorganischen Membranwerkstoffen sind Keramiken, welche sich durch eine hohe Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit auszeichnen. Nachteilig ist jedoch der deutlich höhere Preis.

Klassische organische Membranmaterialien:

- PSU – Polysulfone
- PES – Polyethersulfone
- PVDF – Polyvinylidenfluorid
- PP – Polypropylene
- PA – Polyamide

Anorganische Membranmaterialien:

- Keramiken (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2)
- Metalle

Materialanforderungen:

- chemische und bakterielle Beständigkeit
- mechanische Festigkeit bei Montage, Transport und Lagerung
- Temperaturbeständigkeit
- Widerstandsfähigkeit bei der Reinigung (pH-Wert)
- Konstantes Betriebsverhalten und geringe Kosten

² Pinnekamp, J., & Friedrich, H. (2003). *Membrantechnik für die Abwasserreinigung*.

Wesentliche Schwerpunkte im vorliegenden Projekt ist eine optimierte Kombination der beiden Einzelkomponenten: Filtrationsmembran und geeignetem Sorptionsmaterialien zu einer funktionellen verfahrenstechnischen Einheit als Basis für eine kleintechnische Pilotanlageanlage.

Herstellung und Betrieb einer Anlage im kleintechnischen Pilotmaßstab zur Demonstration der Eignung des Ansatzes zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aus biologisch gereinigtem Abwasser. Es wird dabei auf einen handelsüblichen Teststand für Hohlfasern- und Rohrmodule zurückgegriffen, der für die speziellen Bedingungen der Versuchsdurchführung adaptiert wird.

Die Pilotanlage ist dermaßen konzipiert, dass der Versuchsbetrieb unter möglichst praxisnahen Bedingungen erfolgen kann. Die Anspeisung der Anlage erfolgt über einen Bypass aus dem Nachklärbecken der Belebungsanlage, siehe Abbildung 1.

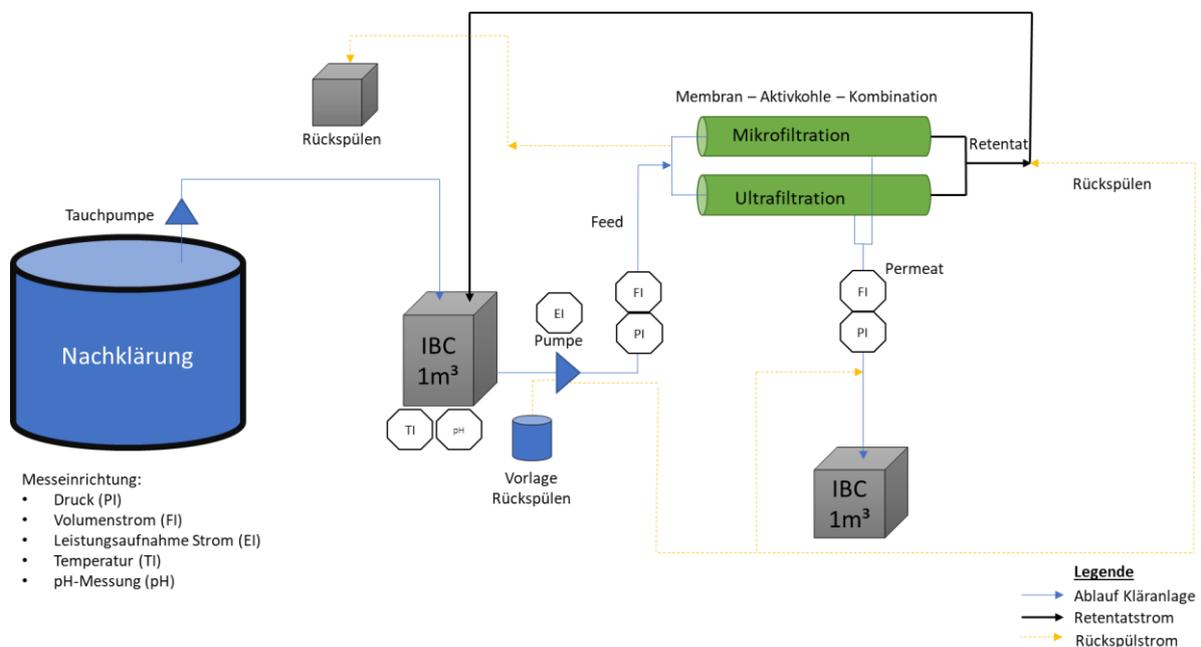


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Es wird die Kombination von rohrförmigen Membranen (Rohrmodul der Firma CUT Membrane Technology GmbH) mit Adsorptionsmaterial gewählt. Der Trennprozess wird zweistufig ausgeführt. In der ersten Trennstufe (Membran) erfolgt der Rückhalt im klassischen Mikro-/Ultrafiltrationsbereich der verwendeten Membran. Das Permeat der klassischen Membranfiltration wird im zweiten Trennschritt noch innerhalb des Rohrmodulmoduls mit der Aktivkohle in Kontakt gebracht und hinsichtlich der vorhandenen Spurenstoffe gereinigt.

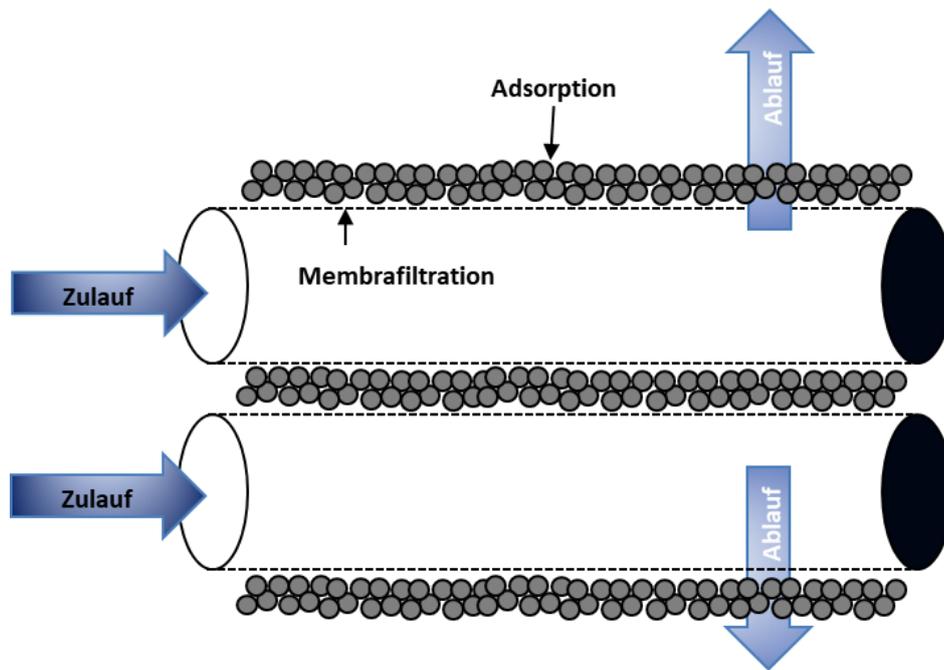


Abbildung 2: Systemkombination



Abbildung 3: Aufbau Rohrmodul

Der wesentliche Unterschied zwischen Adsorption an Pulveradsorbens und Granulaten liegt in der Größe der verwendeten Adsorbentien. Die prinzipiellen Vorgänge der Adsorption bleiben jedoch gleich.

Granuläre Adsorbentien sind im Handling wesentlich einfacher, da staubbedingte Gefahren bzw. Probleme entfallen. Die Regeneration belasteter Granulate ist ebenfalls wesentlich einfacher, wodurch die zu entsorgenden Abfallmengen drastisch sinken. Die Versuche wurden, mit der im Vorprojekt

Pharmaqua getesteten granulierten Aktivkohle (GAK Epibon A 8x40) der Firma Donau Carbon, durchgeführt.

Ausgehend von den Angaben der Lieferfirma (CUT Membrane Technology GmbH) ergab sich letztlich nachfolgender Versuchsaufbau.

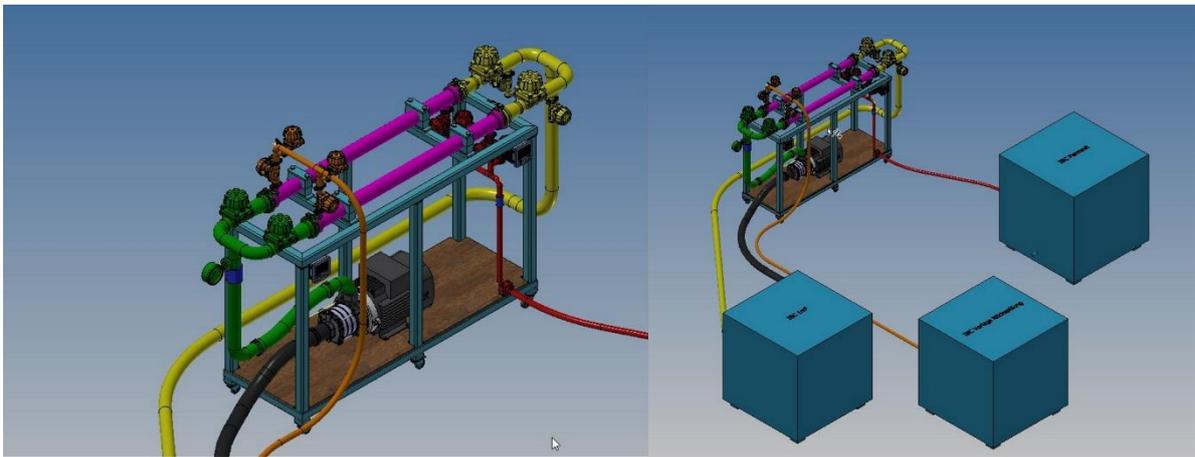


Abbildung 4: Versuchsaufbau

3 Arbeitspaket - Monitoring

Im Versuchsbetrieb wurden durch ein umfassendes, begleitendes Untersuchungsprogramm wesentliche Aussagen zur Effizienz, Betriebsstabilität und weitere Optimierungspotentiale der Technologie erarbeitet. In den durchgeführten Untersuchungsserien wurden jeweils 24 Stunden Mischproben im Zu- bzw. Ablauf der Kläranlage untersucht.

Der Untersuchungsrahmen umfasste:

- Allgemeine Chemie:
 - TOC, Phosphor GESAMT
- Mikrobiologie:
 - KBE bei 37°C, KBE bei 22°C, Coliforme Bakterien, E.coli, Staphylococcus aureus
- Pharmazeutische Wirkstoffe:
 - Amphetamine, Benzoyllecgonine, Carbamazepine, Cocaine, Codeine, EDDP, Lidocaine, MDMA, Methadone, Methamphetamine, Metoprolol, Morphine, Oxazepam, Tramadol, Trimethoprim, Venlafaxine
 - Bei den Untersuchungen im September 2021 wurden zusätzlich die Substanzen Methadon, EDDP, Pregabalin, Gabapentin und Cotinin detektiert.
- Kontinuierliche Betriebsaufzeichnungen des Teststandes umfassen Temperatur, Druck und pH-Wert.

Mit der Durchführung der spezifischen analytischen Untersuchungen wurden für die Parameter Chemie und Mikrobiologie die Firma Agrolab Austria GmbH bzw. für die pharmazeutischen Wirkstoffe das Institut für Gerichtliche Medizin der Medizinischen Universität Innsbruck beauftragt.

Der Hauptversuch fand auf der Kläranlage der Marktgemeinde Vorau (Anlagenbetreiber RHV Vorau) statt. Dabei handelt es sich um eine biologische Abwasserreinigungsanlage nach dem Belebtschlammverfahren mit Nachklärung und aerober - simultaner Schlammstabilisierung sowie Phosphatfällung.

Technische Daten:

- Ausbaugröße: 7.000 EW
- Schmutzfracht: 420 kg BSB5 pro Tag
- Hydraulische Belastung: TW: $Q = 1.050 \text{ m}^3/\text{d}$

Die Wahl des Standortes wurde ua. durch das an das Kanalnetz angeschlossene Marienkrankenhaus Vorau mit einer Kapazität von 112 Betten bestimmt.



Abbildung 5: Aufbau der Versuchsanlage in der Kläranlage

Es wurden beide Membranen sowohl in Crossflow und Dead-End Betrieb getestet. Beim Dead-End wird der Ablauf ganz geschlossen, dadurch muss der ganze Zulauf durch die Membran gereinigt werden und verlässt die Apparatur als Permeat. Dieser Fall erzielt die beste Reinigungsleistung, ist aber nicht für den Dauerbetrieb geeignet, da die Membran sehr schnell verblockt. Um dem vorzubeugen werden Membranen in Crossflow betrieben. Dabei wird der Ablauf reduziert aber nicht geschlossen, sodass ein Teil des Wassers durch die Membrane gereinigt und ein Teil des Wassers ungereinigt wieder im Kreis geführt wird. Das nicht gereinigte Wasser spült einen Teil der Verunreinigungen wieder aus der Membran und vermindert so das Risiko einer Verblockung. Zur Beschickung der Anlage wurde das Wasser am Zulauf einer Wassertonne entnommen, in die auch das ungereinigte Abwasser rückgeführt wurde. So entstand für die Testzwecke ein wassersparender Kreislauf.

Insgesamt konnten im Ablauf der Kläranlage Vorau insgesamt 79 Mikroschadstoffe detektiert werden.

Diese umfassen:

- Pharmazeutische Wirkstoffe und deren Stoffwechselprodukte
- Pestizide
- Industriechemikalien
- Genussmittel
- Endogene Biomoleküle

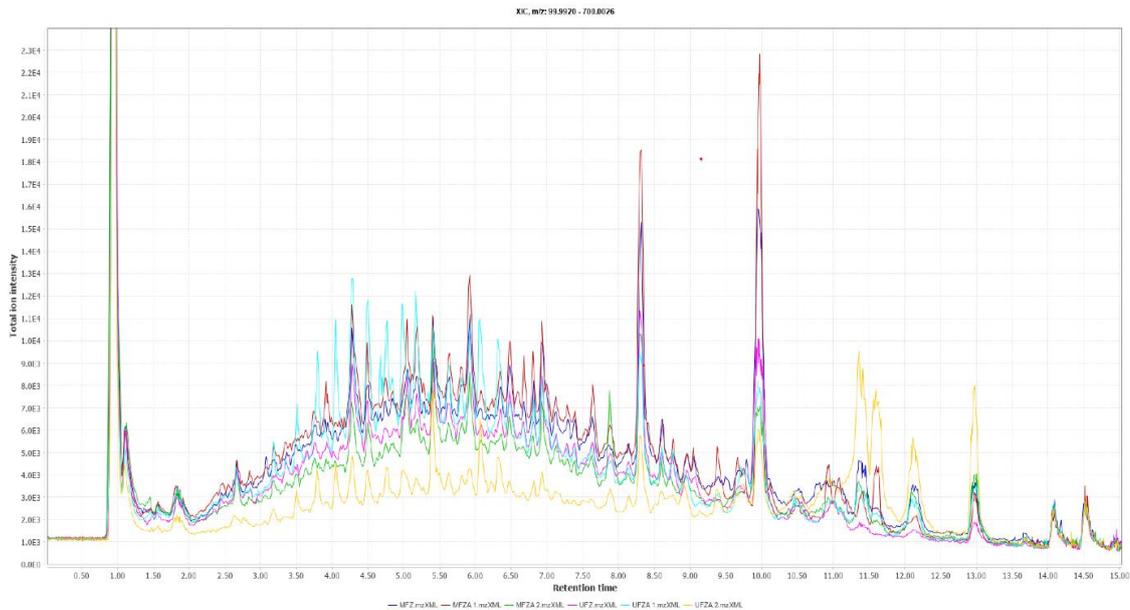


Abbildung 6: Chromatogramm – Non Target Analyse

Im Vergleich der Anwendungen Mikro- bzw. Ultrafiltration ergaben sich in Bezug auf quantifizierbare pharmazeutische Wirkstoffe zusätzliche Eliminationsraten im Vergleich zum Kläranlagenablauf für die Mikrofiltration von $34,1 \pm 16,2\%$, der korrespondierende Wert für die Ultrafiltration betrug $40,1 \pm 7,6\%$. Die Ultrafiltration wies somit im Durchschnitt eine um rund 6% höhere Effizienz auf.

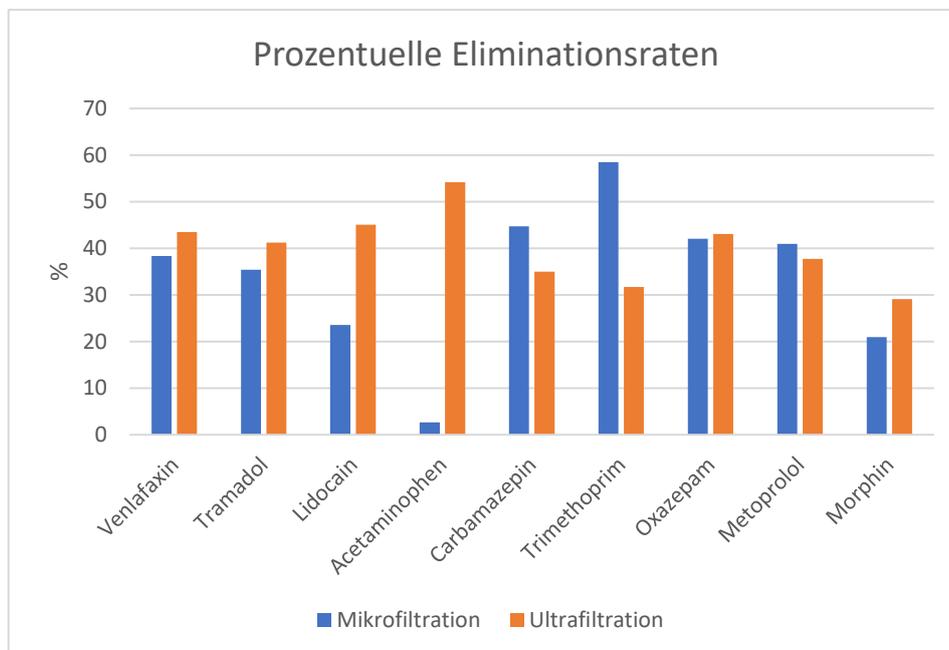


Abbildung 7: Eliminationsraten pharmazeutischer Wirkstoffe

	ARA Ablauf	Mikrofiltration	Ultrafiltration
	Konzentration ng/l		
Venlafaxin	580,5	358	328
Tramadol	1040	672	611
Lidocain	126	96,3	69,2
Acetaminophen	52,4	51	24
Carbamazepin	204,5	113	133
Trimethoprim	91,5	38,0	62,5
Oxazepam	291,5	169	166
Metoprolol	310	183	193
Morphin	12,3	9,7	8,7

Tabelle 1 Ablaufkonzentrationen pharmazeutischer Wirkstoffe im Vergleich Ultra- und Mikrofiltration

Fäkalrelevante Keime wurden bei beiden Varianten bis zu 100% aus dem Abwasser entfernt. Zusätzliche Eliminationsraten im Vergleich zum Kläranlagenablauf betragen für Gesamtphosphat rund 80% bzw. organische Kohlenstoffverbindungen (TOC) rund 85%. Wobei sich diesbezüglich die Ultrafiltration als die deutlich effizientere Variante herausstellte.

Aufgrund der Wirtschaftlichkeit wurde die Mikrofiltration als die bevorzugte Variante in den Versuchen eingesetzt. In der Zusammenschau sämtlicher Untersuchungen mit der Kombination Mikrofiltration und Aktivkohle resultierten zusammengefasst nachfolgende Ergebnisse.

Zusätzliche Eliminationsleistung in Bezug auf die Qualität des Kläranlagenablaufs:

Weitergehende Abwasserreinigung - Gesamtwirkungsgrad der 4. Reinigungsstufe:

Chemie:	Gesamtphosphat	> 69 %
	Organischer Kohlenstoff	54 %
Hygiene:	Coliforme Bakterien	>80 %
	E.coli	>98 %
	Staphylococcus aureus	100 %
Mikroschadstoffe:	pharmazeutische Wirkstoffe	

Die spezifische Eliminationsleistung quantifizierbarer pharmazeutischer Wirkstoffe im Ablauf der Kläranlage Vorau durch die nachgeschaltete 4. Reinigungsstufe betrug zwischen 21 und 62%. Im Durchschnitt ergaben sich somit reduzierte Ablaufwerte von $43,3 \pm 13,4\%$. Dies entspricht einer reduzierten Abwasserfracht, bezogen auf die quantifizierten pharmazeutischen Substanzen, für die Kläranlage Vorau von rund 0,83 kg pro Jahr

In den folgenden Auswertungen wurden sämtliche Detailergebnisse zur Nachbehandlung mittel Mikrofiltration und Aktivkohle, entsprechend der kombinierten Verfahrenstechnologie, ausgewertet und vergleichend dargestellt.

Untersuchungsergebnisse - Chemische

Gesamtphosphor (berechnet als PO₄)

ARA-Ablauf	0,32	mg/l
4. Reinigungsstufe	<0,1	mg/l

Zusätzliche % Eliminationsleistungen der nachgeschalteten Reinigungsstufen im Vergleich zum Ablauf der Kläranlage

Gesamtwirkungsgrad 4. Reinigungsstufe	>69 %
---------------------------------------	-------

Total Organic Carbon (TOC)

ARA-Ablauf	4,93	mg/l
4. Reinigungsstufe	2,28	mg/l

Zusätzliche % Eliminationsleistungen der nachgeschalteten Reinigungsstufen im Vergleich zum Ablauf der Kläranlage

Gesamtwirkungsgrad 4. Reinigungsstufe	54 %
---------------------------------------	------

Untersuchungsergebnisse - Mikrobiologie

Coliforme Bakterien

ARA-Ablauf	>300	KBE/100 ml
4. Reinigungsstufe	61	KBE/100 ml

Zusätzliche % Eliminationsleistungen der nachgeschalteten Reinigungsstufen im Vergleich zum Ablauf der Kläranlage

Gesamtwirkungsgrad 4. Reinigungsstufe	>80 %
---------------------------------------	-------

Escherichia coli

ARA-Ablauf	>300	KBE/100 ml
4. Reinigungsstufe	4	KBE/100 ml

Zusätzliche % Eliminationsleistungen der nachgeschalteten Reinigungsstufen im Vergleich zum Ablauf der Kläranlage

Gesamtwirkungsgrad 4. Reinigungsstufe	>98%
---------------------------------------	------

Staphylococcus aureus

ARA-Ablauf	28	KBE/100 ml
4. Reinigungsstufe	0	KBE/100 ml

Zusätzliche % Eliminationsleistungen der nachgeschalteten Reinigungsstufen im Vergleich zum Ablauf der Kläranlage

Gesamtwirkungsgrad 4. Reinigungsstufe	100%
---------------------------------------	------

Untersuchungsergebnisse Mikroschadstoffe

		ARA Ablauf	4. Reinigungsstufe	% Elimination
Venlafaxin	ng/l	690,2	360,8	48
Tramadol	ng/l	1072,2	495,5	54
Lidocain	ng/l	90,3	44,6	51
Acetaminophen	ng/l	34,9	25,5	27
Carbamazepin	ng/l	316,8	144,0	55
Trimethoprim	ng/l	64,7	24,6	62
Oxazepam	ng/l	318,4	141,0	56
Metoprolol	ng/l	261,6	114,5	56
Morphin	ng/l	12,3	9,7	21

		ARA Ablauf	4. Reinigungsstufe	% Elimination
Methadon	ng/l	14	<10	>28
EDDP	ng/l	13	<10	>20
Pregabalin	ng/l	470	266	43
Gabapentin	ng/l	2459	1329	46
Cotinin	ng/l	35	21	41
Benzoylecgonin	ng/l	18	10	43

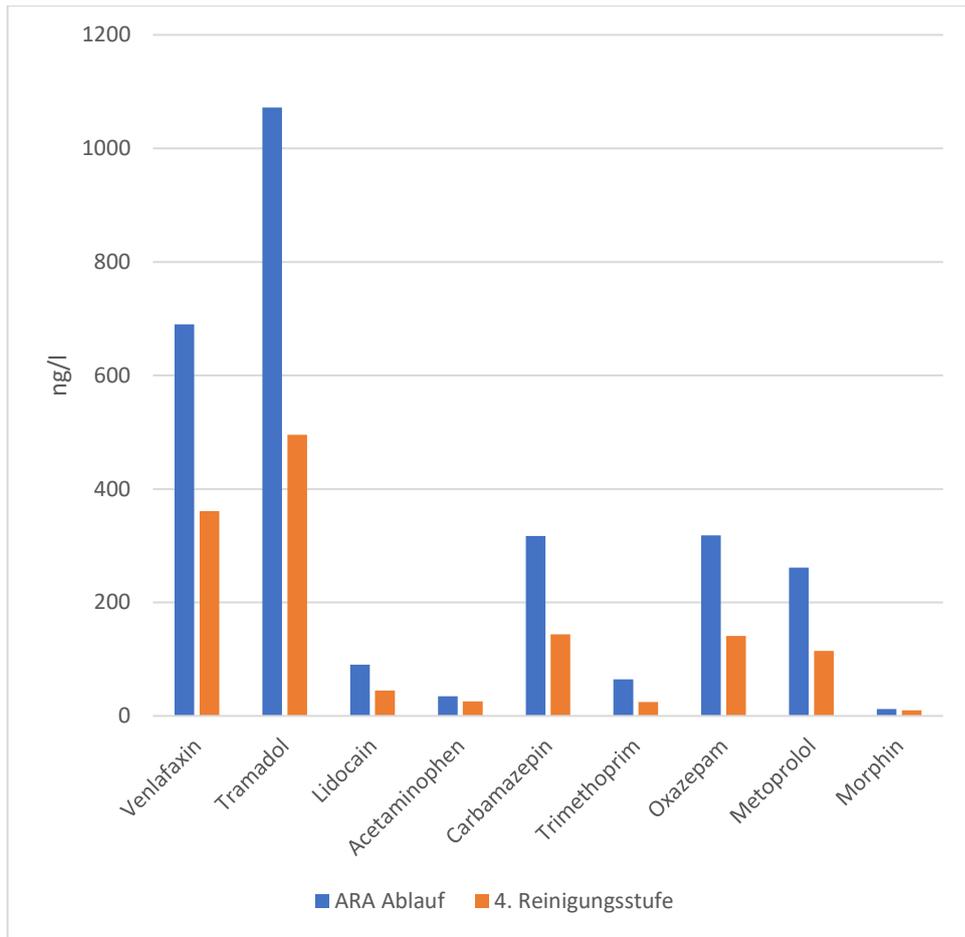


Abbildung 8: Eliminationsraten pharmazeutischer Wirkstoffe durch eine 4. Reinigungsstufe

4 Arbeitspaket - Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Vergleich zur Leistungsfähigkeit dokumentierter Eliminationsverfahren, entweder als Pilotanlage oder im Praxisbetrieb erwies sich der untersuchte Ansatz der Membranfiltration in Kombination mit Aktivkohle (Membranadsorber) als konkurrenzfähig, wobei generell vermerkt werden muss, dass keine Verfahrenskombination alle Arzneimittelrückstände vollständig eliminiert (bei vertretbarem Aufwand). Die Versuche haben gezeigt, dass auf eine Vorfiltration verzichtet werden kann. Dadurch werden Investitions- und die laufenden Kosten gesenkt.

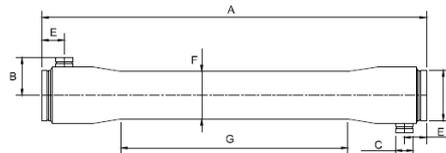
4.1 Wirtschaftlichkeit

Nachfolgend wurde eine Kostenabschätzung für eine großtechnische Anlage am Beispiel der Kläranlage Vorau mit einer Ausbaustufe von 7.000 EW (hydraulisch) vorgenommen. Der Kostenansatz basiert auf Angaben von Herstellern, Literaturangaben und Erkenntnissen aus den Untersuchungen.

4.1.1 Auslegung Membran

Für die Auslegung der Pilotanlage Vorau wurde ein Modul der Firma CUT-Membran gewählt. Mit diesem Modul wurde die Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt. Das Modul hat eine aktive Trennfläche von rund 27 m².

Tubular Module for Ultrafiltration
Module Type T-CUT UF 100-080 PVDF 211-3000 „Z“
Art.-No. 760617



Housing Properties

Length	[A]	[mm]	3.000
Length of Permeate Connection	[B]	[mm]	165
Type / Size Permeate Connection	[C]	[mm]	2,5" Victaulic / 73
Type / Size Concentrate Connection	[D]	[mm]	8" Victaulic / 219,1
Distance Permeate Connections	[E]	[mm]	90
Diameter Housing	[F]	[mm]	211
Max. Distance Supporting Points	[G]	[mm]	2.200
Housing Material		---	FRP, white

Membrane Properties

Membrane Area		[m ²]	27,4
Membrane Material		---	PVDF
Pore Size / Molecular Weight Cut-Off		[kDa]	100
Inner Diameter		[mm]	8,2
Number of Membranes		---	354

Abbildung 9: Tubular Modul

4.1.2 Auslegung Aktivkohle

Vorerhebungen haben gezeigt, dass mit 0,12 m³ Aktivkohle bei einem Volumenstrom von 1 m³/h, eine ausreichende Reinigungsleistung erzielt werden kann. Für eine Pilotanlage in Vorau ergeben sich somit 1.415 kg an Aktivkohle, wodurch Kosten in der Höhe von 2.829 € entstehen würden.

4.1.3 Kostenabschätzung Investitionskosten

Die Kosten für ein Membran-Modul belaufen sich auf 4.850.-€ / Modul. So ergeben sich Kosten für die Hauptkomponenten (Membran und Aktivkohle) von 74.681.-. Die Kostenabschätzung wurden nach dem Faktormodell von Lang durchgeführt. Die von H.J. Lang vorgeschlagene Methode basiert auf den Kosten aller wesentlichen Anlagenelemente. Die Kosten der schlüsselfertigen Anlage ergeben sich durch Multiplikation aus den Kosten für die Hauptkomponenten mit einem Faktor, dem so genannten Lang-Faktor.

f_L..... Lang-Faktor ³

Hauptapparate und -maschinen	1	€ 74 681
Rohrleitungsmaterial	0,4	€ 29 873
Elektrik (Material)	0,25	€ 18 670
Energieversorgung	0,04	
Elektronische Einrichtungen	0,16	
Elektromotoren	0,05	
Leittechnik (Material)	0,39	€ 29 126
Sensoren, Aktoren	0,3	
Kabel und Leitungen	0,09	
Bauarbeiten	0,59	€ 44 062
Fundamente, Gebäude	0,53	
Apparate Isolation	0,16	€ 11 949
Heizung, Klimatechnik, Brandschutz	0,09	€ 6 721
Montage	1,05	€ 78 415
Gerüste, Schweißüberwachung	0,06	
Maschinen und Apparate inkl. Befüllung AK	0,12	
Rohrleitungen	0,59	
Elektrotechnik	0,13	
Leittechnik	0,13	
Baustelleneinrichtungen	0,02	
	3,93	€ 293 497

Tabelle 2 Kostenabschätzung Investitionskosten

³ Melin, T. & Rauchtenbach, R. (2007): Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Springer Verlag, 3. Auflage

4.1.4 Kostenabschätzung laufende Kosten

In Abhängigkeit der Überströmungsgeschwindigkeit der Membran ergeben sich unterschiedliche Energiekosten der Pumpen. Je höher die Überströmungsgeschwindigkeit desto mehr Strom wird verbraucht, jedoch wird dadurch die Gefahr einer Verblockung minimiert.

Leistungsbestimmung Pumpe				
Überströmung [m/s]	1	2	3	[m/s]
Volumenstrom pro Modul	64	128	192	m ³ /h
Dichte	1000	1000	1000	kg/m ³
Volumenstrom	0,02	0,04	0,05	m ³ /s
	9,81	9,8	11,81	
Druckverlust	50	50	50	m
Wirkungsgrad η_{\max}	0,9	0,9	0,9	Annahme
Leistung	10	19	35	kW
Energiebestimmung pro Pumpe				
Betriebsdauer	20	20	20	Stunden pro Tag
Energie	7300	7300	7300	Stunden pro Jahr
Energie	194	387	700	kWh/Pumpe/tag
Energie	70 729	141 314	255 446	kWh/Pumpe/Jahr
Energiebestimmung Gesamt				
Pumpen gesamt	3			
Energie	581	1161	2100	kwh/Tag
Energie	212187	423941	766338	kwh/Jahr
spez. Energieverbrauch pro m ³	0,73	1,45	2,62	kWh/m ³
Stromkosten pro Jahr				
Strompreis	0,15	€/kWh		
Stromkosten pro Jahr	€ 31 828	€ 63 591	€ 114 951	
€/m ³	0,109	0,218	0,394	
spezifische Kosten				
Energie	0,109	0,218	0,394	€/m ³
Verbrauchsmaterialien	0,06	0,06	0,06	€/m ³
Personalkosten	0,01	0,01	0,01	€/m ³
Instandhaltungskosten	0,01	0,01	0,01	€/m ³
Kosten Vora pro Jahr				
Energie	€ 31 828	€ 63 591	€ 114 951	
Verbrauchsmaterialien	€ 17 520	€ 17 520	€ 17 520	
Personalkosten	€ 2 920	€ 2 920	€ 2 920	
Instandhaltungskosten	€ 2 920	€ 2 920	€ 2 920	
laufende Kosten pro Jahr	€ 55 188	€ 86 951	€ 138 311	

Tabelle 3 Leistungs- und Kostenbestimmung der Pumpen

In Abhängigkeit der Überströmung ergeben sich folgende spezifische Betriebskosten.

Investitionskosten € /EW	€ 41,93		
Überströmung [m/s]	1	2	3
spezifische Betriebskosten €/EW/	€ 7,88	€ 12,42	€ 19,76
spezifische Betriebskosten pro m ³	€ 0,189	€ 0,298	€ 0,474

Tabelle 4 Investitionskosten und spezifische Betriebskosten

Im direkten Vergleich mit den Kostenschätzungen aus dem Forschungsprojekt KOMOZAK (Kreuzinger et.al, 20154) erweist sich die Filtration/Adsorptionseinheit aktuell noch als eine teurere Verfahrenstechnologie zur Mikroschadstoffelimination.

	Ozonung	Aktivkohle- Druckfilter	Membran- Aktivkohle
EW	15000	15000	7000
Investitionskosten	€ 736 785	€ 191 800	€ 293 497
Summe Betriebskosten [€/a]	€ 52 090	€ 76 688	€ 55 188
Energie			€ 31 828
Verbrauchsmaterialien			€ 17 520
Personalkosten			€ 2 920
Instandhaltung			€ 2 920
	Ozonung	Aktivkohle- Druckfilter	Membran- Aktivkohle
Investitionskosten € /EW	€ 49,10	€ 12,80	€ 41,93
Betriebskosten €/EW/a	€ 3,47	€ 5,11	€ 7,88

Tabelle 5 Investitionskosten und spezifische Betriebskosten

Die Membrantechnik weist derzeit insbesondere bei den Kosten für den laufenden Betrieb höhere Kosten im Vergleich zu den derzeit etablierten Verfahren auf. Gleichzeitig ist aber eine starke Entwicklung in der Optimierung dieser Verfahrenstechnologie (Membranmaterialien, Trennpotential, Steuer- und Regelungstechnik) feststellbar, die die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens deutlich verbessern wird.

⁴ Kreuzinger, N., Haslinger, J., Kornfeind, L., Schaar, H., Saracevic, E., Winkelbauer, A., . . . Wieland, A. (2015). KomOzAk Endbericht - Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer mit Ozon sowie Aktivkohle für die Entfernung organischer Spurenstoffe. Wien: BUNDESMINISTERIUM.

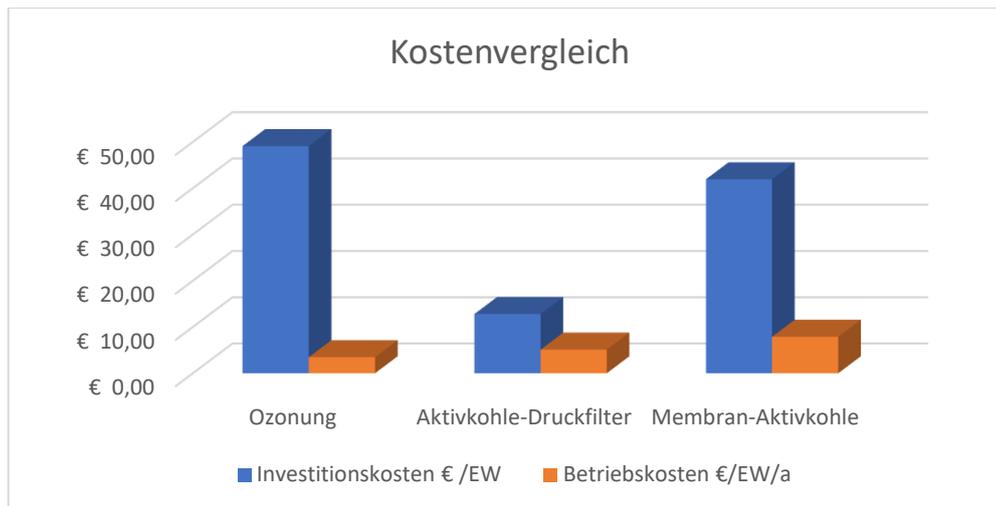


Abbildung 10: Kostenvergleich unterschiedlicher Verfahren zur Mikroschadstoff Elimination (Investitions- und Betriebskosten)

In einer wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung ist ferner der zusätzliche Mehrwert der kombinierten Membran- und Adsorptionstechnologie aufgrund zusätzlicher Eliminationspotentiale (Multibarriensystem), wie etwa eine weitergehende Hygienisierung des Abwasserstroms zusehen und in einem Technologievergleich zu berücksichtigen. So können die zusätzlichen spezifischen Ausbaurkosten für UV-Desinfektionsanlagen mit ca. € 25.--/EW zur Hygienisierung von biologisch gereinigtem Abwasser angenommen werden (Müller et.al, 2009). Damit wären rund 20% der Gesamtinvestitionskosten einer kombinierten Membran-Aktivkohle-Anlage, als Mehrwert gegenüber Anlagen, die nicht über dieses Leistungsspektrum verfügen gegenüberzustellen. In der laufenden Diskussion über die Implementierung einer 4. Reinigungsstufe werden in der Argumentation für fehlende Umsetzungen auf nationalen Ebenen insbesondere die Rechtsgrundlagen sowie die Wirtschaftlichkeit zusätzlicher Aufbereitungstechnologien angeführt. Außerdem gibt es derzeit eine Vielzahl von Spurenstoffen, deren Verhalten und ökotoxisches Potential größtenteils noch unbekannt sind. Damit wird die Nachhaltigkeit einer derartigen Maßnahme hinterfragt. Entscheidend wird sein den Aufwand und die Kosten für eine zusätzliche Maßnahme in einem vertretbaren Rahmen eingrenzen zu können.

Zusammenfassend zeigen Auswertungen publizierter Machbarkeitsstudien für Maßnahmen zur Mikroschadstoffentfernung für Deutschland (Mikroschadstoffelimination in kommunalen Kläranlagen in NRW, Stand 05/2018), dass die Investitionskostenabschätzungen, auch innerhalb der einzelnen Verfahrenstechnologie, in Abhängigkeit des Standortes und den spezifischen Rahmenbedingungen sehr große Unterschiede aufweisen. Rein aus wirtschaftlicher Sicht ist daher eine Präferenz für eine bestimmte Verfahrenstechnologie daher schwer abzuleiten.

5 Handlungsempfehlungen zur Mikroschadstoff Behandlung

5.1 Allgemeiner Überblick

Der Begriff Mikroschadstoffe umfasst synthetische organische Substanzen, wie Arzneimittel, Röntgenkontrastmittel, Kosmetikprodukte, Haushaltschemikalien, Biozide und Pestizide sowie Industriechemikalien, die über verschiedene Eintragspfade in Gewässer gelangen (Hillenbrand, et al., 2014)⁵. Die Bezeichnung „Mikroschadstoff“ leitet sich vom typischen Konzentrationsbereich (ng/L bis µg/L), in welchem sie nachgewiesen werden, ab.

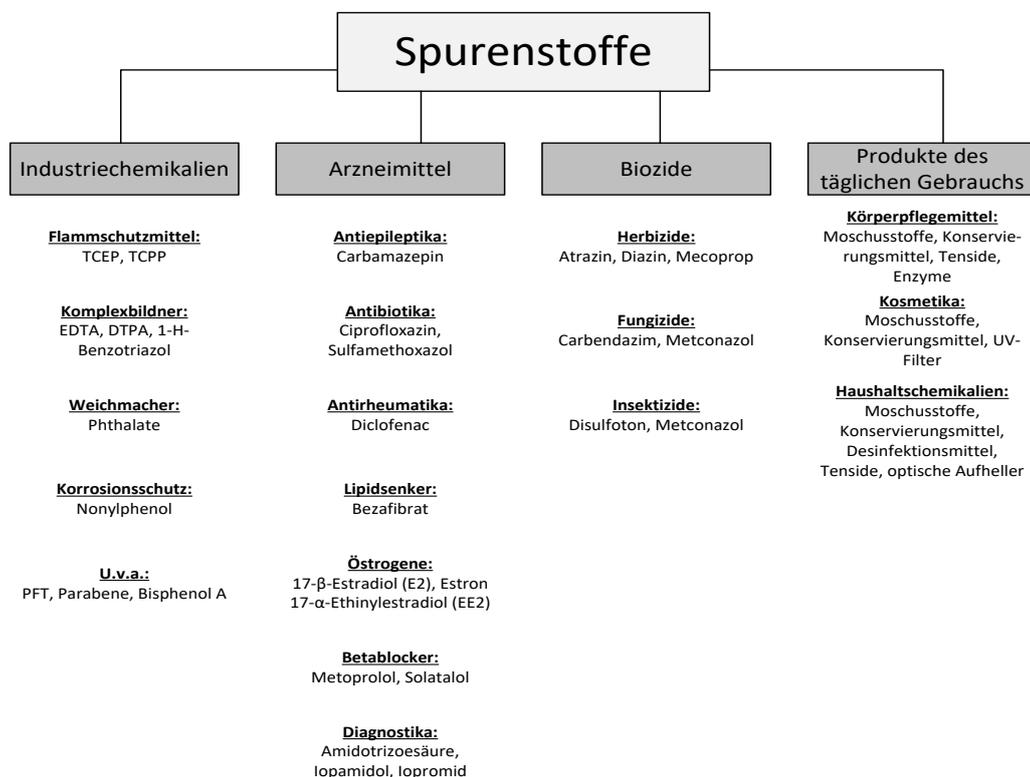


Abbildung 11: Übersicht Spurenstoffe nach Anwendungsgebieten (Pinnekamp, Mousel, Palmowski, & Beier, 2015)⁶

⁵ Hillenbrand, T., Tettenborn, F., Menger-Krug, E., Marscheider-Weidemann, F., Fuchs, S., Toshovski, S., Abegglen, C. (2014). Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer. Umweltbundesamt Texte 85/2014.

⁶ Pinnekamp, J., Mousel, D., Palmowski, L., & Beier, S. (2015). Elimination von Arzneimitteln aus Krankenhausabwasser. Landeskongress 2015 - Neue Herausforderungen in der Abwassertechnik. Schwerte: Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK).

5.2 Rechtsrahmen

Auf politisch-rechtlicher Ebene gibt es ein abgestuftes, vielschichtiges Akteurssystem, das von der stofflichen Regulierung (**REACH, Arzneimittelzulassung**) bis hin zur **Gewässerbewirtschaftung**, welches für rechtliche Rahmenbedingungen sowie Umsetzung und Monitoring der Einhaltung von Anforderungen zuständig ist, reicht.

Die Erfassung und Regulierung hormonell schädigender Chemikalien hat in den vergangenen Jahren stark an Priorität gewonnen. Im Rahmen der **Chemikaliengesetzgebung REACH** wurde begonnen, endokrin (= über das Hormonsystem) schädigende Chemikalien zu bewerten und zu regulieren.

Im **Pflanzenschutzmittel- und Biozidrecht** sind hormonschädigende Chemikalien bereits verankert. Allerdings besteht bei der Festlegung wissenschaftlicher Kriterien Handlungsbedarf: Ursprünglich hätten diese von der EU-Kommission bereits bis Ende 2013 festgelegt werden sollen. Zurzeit arbeitet sie jedoch noch an einer Folgenabschätzung von vier möglichen Ausgestaltungsoptionen.

Der gesetzliche Ordnungsrahmen im Wasserrecht wird im Wesentlichen durch die **EU Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) 2000/60/EG** bestimmt. Es wurden Umweltziele festgelegt, aus denen auch die Erfordernisse zur Elimination organischer Spurenstoffe ableitbar sind.

So ist unter Artikel 4, Absatz 1 unter anderem festgehalten, dass die Mitgliedsstaaten angehalten werden, „notwendige Maßnahmen zu setzen mit dem Ziel, die Verschmutzung durch prioritäre Stoffe schrittweise zu reduzieren und die Einleitung, Emissionen und Verluste prioritärer Stoffe zu beenden oder schrittweise einzustellen.“

Derzeit gibt es in Österreich noch keine bindenden rechtlichen Vorgaben zur Elimination von Mikroschadstoffen. Bei Änderung der europäischen Rechtslage wird sich auch die österreichische Rechtslage ändern.

5.3 Ökologische Auswirkungen auf Gewässer

Potenzielle Eintragspfade in Oberflächen- und Grundwasser sind diffus aus der Landwirtschaft/Abschwemmung und als gefasste Quelle über Haushalte/medizinische Einrichtungen und Gewerbe & Industrie bzw. Abflussströme aus Kläranlagen. Mögliche Auswirkungen durch endokrine Disruptoren auf aquatische Ökosysteme umfassen, sowohl direkte Auswirkungen auf das Hormonsystem

und damit verbunden auf das Immun-, Nerven- oder Fortpflanzungssystem, als auch indirekte Wirkungen durch Rückkopplungseffekte. Folgende Mechanismen sind möglich (Stroh, 2005)⁷:

- Hormonähnliche Wirkung (östrogen, androgen)

Umweltchemikalien dieser Gruppe lösen dieselbe Reaktion wie körpereigene Hormone aus, weil sie an dieselben Rezeptoren binden. Zu den Östrogenen zählen beispielsweise Alkylphenole, Phtalate und Bisphenol A. Organozinnverbindungen haben beispielsweise androgene Wirkung.

- Blockierung der Hormonwirkung (antiöstrogen, antiandrogen)

Umweltchemikalien dieser Gruppe haben zwar keine hormonelle Wirkung, binden aber an Rezeptoren und verdrängen körpereigene Hormone, sodass es zu einer Verringerung der Hormonwirkung kommt. Ein Beispiel für diese Gruppe ist das Unkrautvernichtungsmittel Linuron.

- Indirekte Wirkung

Substanzen dieser Gruppe haben Auswirkungen auf Organe. Es wird zum Beispiel der Auf- und Abbau oder der Transport der Hormone im Körper gestört. Bei vermehrter Ausscheidung oder zu geringer Bildung eines Hormones kann der Hormonspiegel sinken. Diese Effekte konnten bei Organochemikalien wie zum Beispiel PCB, Dioxinen oder auch bei Schwermetallen beobachtet werden.

5.4 Ablaufschema zur Prüfung einer weitergehenden Abwasserreinigung

5.4.1 Belastungen und Schutzbedürftigkeit

Im Umgang mit Mikroschadstoffen sollte grundsätzlich die Logik des gesamten Wasserkreislaufs berücksichtigt werden. Bei den Spurenstoffen heißt das konkret, dass der gesamte Weg von Medikamenten betrachtet werden muss: von der Produktion über den Verkauf, die Verwendung und letztlich die Entsorgung. Ziel ist die Vermeidung von Spurenstoffen möglichst bereits an der Quelle, im Gesundheitswesen oder beim Verbraucher.

Eine weitergehende Abwasserbehandlung auf kommunalen Kläranlagen ist in begründeten Fällen ein wichtiger Baustein zur Reduzierung der Gewässerbelastungen mit relevanten Spurenstoffen. Kriterien für begründete Fälle sind beispielweise Belastungssituationen der Gewässer, Effizienzkriterien, Nutzungsanforderungen und Empfindlichkeit der Gewässer.

⁷ Stroh, K. (2005): Umweltchemikalien mit hormoneller Wirkung, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

Die Installation zusätzlicher Barrieren im Rahmen der kommunalen Abwasserbehandlung kann den Eintrag einer Vielzahl von Verbindungen in die aquatische Umwelt effektiv unterbinden oder minimieren und kann gemäß dem Vorsorgeprinzip dazu beitragen, negative Umweltauswirkungen und eine mögliche Beeinträchtigung von Trinkwasserressourcen zu reduzieren. Eine weitergehende Abwasserbehandlung auf kommunalen Kläranlagen ist in begründeten Fällen ein wichtiger Baustein zur Reduzierung der Gewässerbelastungen mit relevanten Spurenstoffen.

Die Belastungssituation und Schutzbedürftigkeit eines Gewässersystems, wird direkt anhand von Monitoring-Ergebnissen, Stoffflussmodellen oder Emissionskataster evaluiert.

Widersprechen die Ergebnisse definierten Qualitäts- oder Nutzungsanforderungen (z.B. Trinkwassernutzung), sind entsprechende Handlungen zu setzen.

5.4.2 Priorisierung von Handlungsoptionen

1. Der Eintrag von relevanten Spurenstoffen in die aquatische Umwelt, orientiert am Vorsorge- und Verursacherprinzip, ist zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Quellenbezogene Reduktionen von relevanten Spurenstoffen aus den Eintragsbereichen Biozide, Waschmittel/Kosmetika, Haushalts- / Industriechemikalien sowie Arzneimittel sind zu prüfen.
2. Strukturelle Maßnahmen im Bereich Kläranlagen
3. Überprüfen von Maßnahmen zum Ausbau einer 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage zur Elimination von Mikroschadstoffen als „End of pipe“ Technologie

5.4.3 Kläranlage

Es ist davon auszugehen ist, dass mittelfristig 4. Reinigungsstufen auf Kläranlagen nicht flächendeckend, sondern eher punktuell, nach Handlungsbedarf, zur Umsetzung gelangen werden. Daher ist es notwendig Kriterien zu definieren, nach denen eine Standortauswahl evaluiert wird.

5.4.3.1 Mikroschadstoff Screening

Neben den allgemeinen abwasserrelevanten Standardparameter ist ein Mikroschadstoff Screening im Zulauf zur biologischen Reinigungsstufe und im Ablauf der Kläranlage durchzuführen. Die Zusammensetzung von Abwasser ist im Einzelfall zu beurteilen, da es regional, saisonal oder durch temporäre Einzelereignisse (z.B. Starkregeneignisse) zu deutlichen Schwankungen kommen kann. Die Zusammensetzung des Rohabwassers kann aufgrund natürlicher als auch anthropogener Einflüsse (Streusalz), stark variieren, wobei grundsätzlich in jedem Abwasser sowohl biologische (natürliche organische Substanzen wie Huminstoffe, Algen, Mikroorganismen), partikuläre/kolloidale (anorganisches Material, Belebtschlammflocken, Lipide, Fett- und Ölpartikel, sowie andere organische Partikel wie z.B.

Proteine) als auch anorganische Substanzen (Spuremetalle wie Eisen, Aluminium, Mangan, Kupfer, Zink, Chrom und Blei) vorzufinden sind.

Daher sollte jede standortspezifische Verfahrensauslegung auf einer empirischen Zustandsanalyse der qualitativen und quantitativen Belastungen mit Mikroverunreinigungen beruhen. Diese kann sowohl auf Basis chemisch-analytischer Untersuchungen als auch statistischen Bewertungsmethoden erfolgen. So haben dänische Gemeinden eine Methode zur Bewertung von Krankenhäusern hinsichtlich ihrer Wichtigkeit als punktuelle Schadstoffquelle entwickelt. Dieses Bewertungssystem berücksichtigt den gesamten Verbrauch an Pharmazeutika sowie den Verbrauch an Antibiotika des Krankenhauses im Verhältnis zum Verbrauch im restlichen Einzugsgebiet (Søholm & Nielsen, 2015/16)⁸. Der zu behandelnden Feedstrom sollte genau analysiert werden und die standortspezifischen Gegebenheiten sind zur fundierten Auslegung des angedachten Verfahrens zur Mikroschadstoffelimination unbedingt zu berücksichtigen.

Zu den chemisch-analytischen Erhebungen sind aktuell verschiedene Empfehlungen zur Auswahl von Einzelsubstanzen vorhanden (z.B.KOMS-BW, 2014)⁹.

Mögliche Leitparameter

Arzneimittelwirkstoffe:	Carbamazepin, Ciprofloxacin, Diclofenac, Metoprolol, Sulfamethoxazol
Östrogene:	summarische Erfassung
Pestizide:	Mecoprop, Isoproturon, Terbutryn

Um einen weitergehenden Überblick über die Mikroschadstoffbelastung im Screening zu erhalten, kann die Stoffliste unter Berücksichtigung der standortspezifischen Randbedingungen, wie z.B. besondere Indirekteinleiter, Krankenhäuser und Altenheime, ergänzt werden.

Die Analytik sollte grundsätzlich unter Trockenwetterbedingungen aus 24-Stunden Mischproben erfolgen und kann zur Erfassung diffuser Einträge (Landwirtschaft) bei Regenwetter wiederholt werden.

5.4.3.2 Überblick über Verfahren zur Spurenstoffelimination

Die 4. Reinigungsstufe (nach Rechenklärung, Vorklärung und biologischer Reinigung) ist keine bestimmte Klärtechnik, sondern bezeichnet eine ganze Reihe verschiedener Optionen wie

- Ozonierung

⁸ Søholm, J., & Nielsen, U. (2015/16). Neuer dezentraler Ansatz für die Aufbereitung von Krankenhausabwasser. WWT - Wasserwirtschaft und Wassertechnik Modernisierungsreport, S. 20-25.

⁹ KOMS-BW (2014). Handlungsempfehlungen zur Vergleichskontrolle und zur Betriebsüberwachung der 4. Reinigungsstufe. Kompetenzzentrum Spurenstoffe, Baden-Württemberg

- Membranfiltration
- Aktivkohlefiltration
- Verfahrenskombinationen

Die Verfahren bzw. die Verfahrenskombinationen besitzen jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile und werden - zumeist im Rahmen einer Machbarkeitsstudie - je nach lokaler Gegebenheit, Abwasserbeschaffenheit, Zielsetzung und weiteren Faktoren ausgewählt. Die Eliminationsleistungen der 4. Reinigungsstufe in Kläranlagen sind bei den anthropogen bedingten Spurenstoffen sehr unterschiedlich, da jede Substanz andere Eigenschaften aufweist und zudem die differenten Verfahren der Spurenstoffelimination jeweils unterschiedlich effizient wirken. Generell werden mithilfe einer 4. Reinigungsstufe jedoch deutliche Verbesserungen für den Eintrag von Spurenstoffen in die Gewässer erzielt.

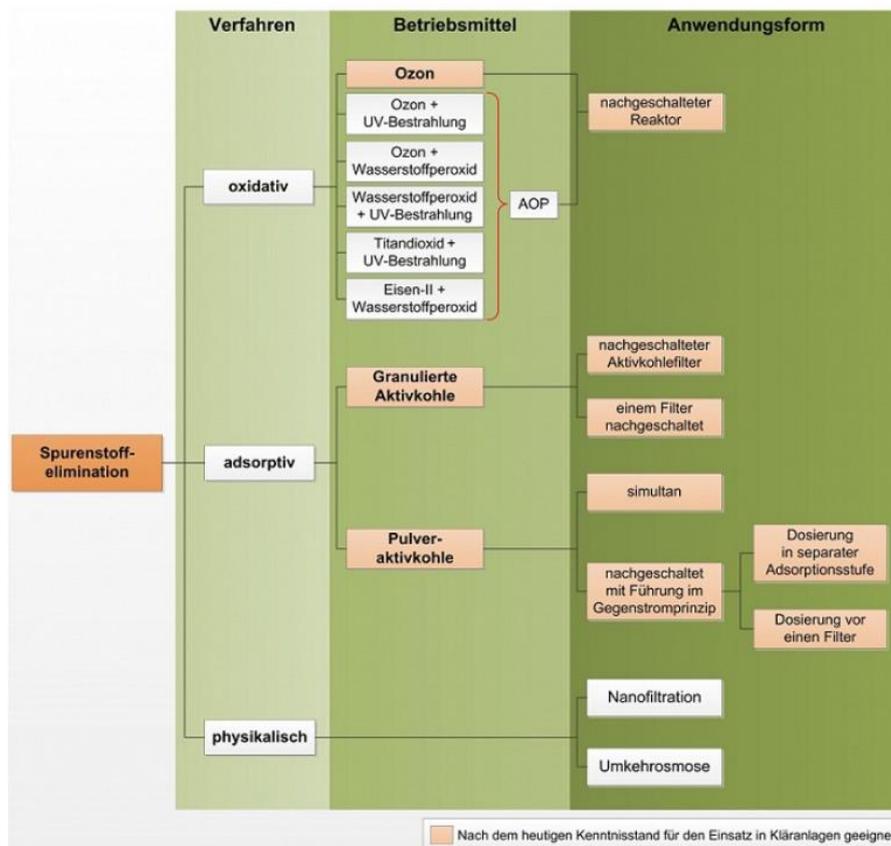


Abbildung 12: Übersicht über verschiedene Verfahren der Spurenstoffelimination

Ozonierung

Ozon ist ein reaktives Gas und besteht aus drei Sauerstoffatomen. Es hat eine stark oxidierende Wirkung und bildet Hydroxylradikale bei Kontakt mit Wasser. Diese Hydroxylradikale greifen eine breite Palette an Substanzen an, während Ozon nur gewisse Substanzen oxidiert. Durch die Ozonisierung werden verschiedene komplexe Bindungen aufgebrochen und Substanzen somit einem biologischen Abbau zugänglicher gemacht. Im Laufe dieses Vorgangs werden neben Schadstoffen auch Mikroorganismen

zerstört, daher wird Ozon häufig als Desinfektionsmittel eingesetzt. Für die Einführung einer Ozonisierungsstufe ist eine möglichst weitgehende Vorreinigung (biologische Reinigung) mit einer stabilen Nitrifikation erwünscht. Dadurch sind geringere Ozonmengen für den Betrieb bei stabilem Prozess notwendig.

Die Ozonung ist jedoch nicht für jedes Abwasser geeignet. Es muss im Einzelfall untersucht werden ob die spezifischen Stoffe durch Ozonung entfernt werden können, ohne die Entstehung von problematischen Reaktionsprodukten mit sich zu ziehen. Die Herstellung von Ozon erfolgt durch Ozongeneratoren mittels elektrischer Entladung aus gereinigter und getrockneter Luft oder direkt aus industriell hergestelltem Sauerstoff.

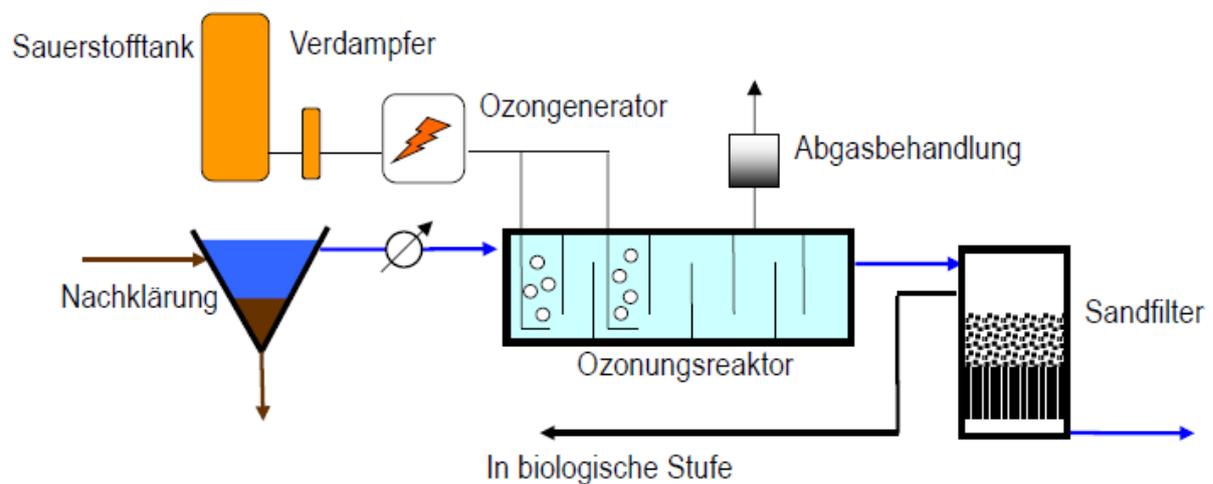


Abbildung 13: Schema einer Ozonungsanlage

Der Einfluss einer Ozonungsstufe auf den übrigen Betrieb einer Abwasserreinigungsanlage ist gering. Es kommt zu einem zusätzlichen Aufwand für Personal (Ausbildung, Überwachung, Wartung), Energie (Anschlussleistung, Stromverbrauch) und damit Kosten (Investitionskosten, Betriebskosten).

Eine Ozonungsstufe lässt sich in der Regel gut in bestehende Abwasserreinigungsanlagen integrieren und betreiben. Der (Brutto)-Energieverbrauch wird dadurch um 10–30% erhöht. Die Kosten um etwa 10-20%. Bei einer Ozondosis von 3–5 g O₃/m³ erfolgt eine weitgehende Elimination von Mikroverunreinigungen (>80%) und somit eine weitgehende Reduktion endokriner Effekte.

Zu beachten ist jedoch auch die Bildung von Metaboliten, die teilweise problematischer sind als ihre Ausgangsprodukte. In diesem Bereich gibt es noch Forschungsbedarf.

Adsorption an Aktivkohle (Pulveraktivkohle, granulierte Aktivkohle)

Aktivkohle findet seit Jahrzehnten in der Trinkwasseraufbereitung, in industriellen Reinigungsprozessen als auch in der Abwasserreinigung für die Elimination persistenter Stoffe (Farbstoffe, Geruchs-/Geschmackstoffe, AOX...) Anwendung. Im Gegensatz zu oxidativen Prozessen, bei denen eine Umwandlung der Zielstoffe erreicht werden soll (Ozonung), soll es bei adsorptiven Verfahren zu einer Bindung und damit verbunden einer Entfernung der Zielstoffe kommen.

Bei der Adsorption kommt es zur Anlagerung von gelösten Substanzen an der Oberfläche von Feststoffen.

Die Pulveraktivkohlestufe wird z.B nach einer weitgehenden biologischen Reinigung angeordnet, weil nicht nur Mikroverunreinigungen, sondern auch natürliche organische Stoffe (DOC) an die Aktivkohle sorbieren.

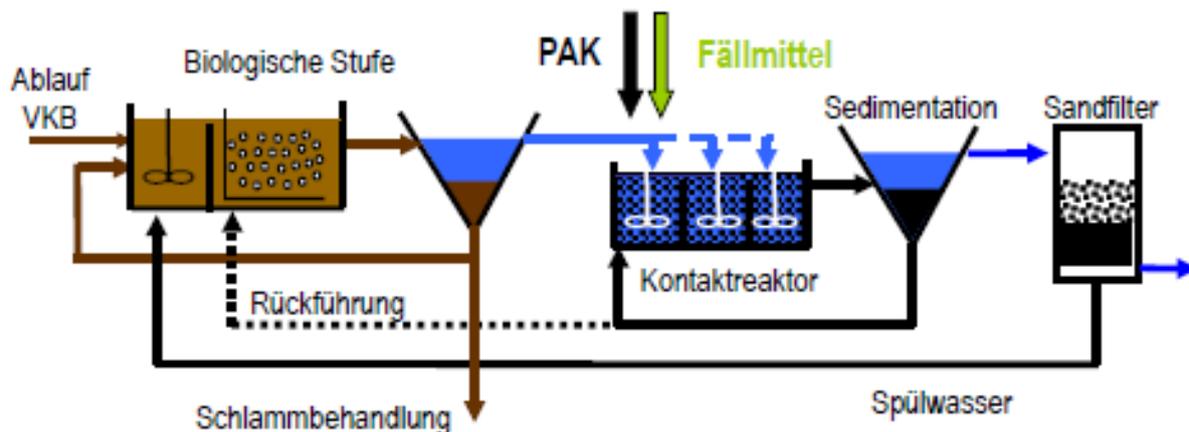


Abbildung 14: Fließschema einer PAK-Behandlung

Die Integration einer Pulveraktivkohlestufe beeinflusst beinahe die gesamte Abwasserreinigungsanlage. Es werden die biologische Stufe, die Filtration, sowie die Schlammbehandlung beeinflusst, deren Veränderungen betriebliche Auswirkungen aufweisen können.

Die Hauptenergieverbraucher einer Pulveraktivkohlestufe sind die Rührwerke des Kontaktreaktors und die Pumpen für die Rezirkulation. Insgesamt kann der benötigte zusätzliche Energieverbrauch als gering angesehen werden.

Membranverfahren

Unter Membranprozessen werden folgende Verfahren zusammengefasst:

- Mikrofiltration (MF)

- Ultrafiltration (UF)
- Nanofiltration (NF)
- Umkehrosmose (RO)

Mikro- und Ultrafiltrationsmembranen sind rein mechanisch wirkende "Feinsiebe". Diese Feinsiebe bestehen aus porösen, künstlich hergestellten Folien - sog. Membranen - mit jeweils exakt definierten Porendurchmessern. Die Trennschichten werden auf sogenanntes Trägermaterial aufgebracht. Als Trägermaterial kommen Polymere oder Keramik zum Einsatz. Membranfiltrationstechniken werden für die unterschiedlichsten Anwendungen im Bereich der Wasseraufbereitung - oft in Kombination mit klassischen Verfahren - eingesetzt. Bei der Nanofiltration und Umkehrosmose werden dichte, diffusionsoffene Membranen eingesetzt. Bei diesen Prozessen erfolgt der Trennvorgang durch Diffusion durch die Membrane hindurch. Triebkraft ist in allen Fällen der Differenzdruck. Während bei der Mikro- und Ultrafiltration Differenzdrücke bis zu 2 bar erforderlich sind, erfordert die Niederdruck-Nanofiltration Differenzdrücke bis zu 8 bar und die Umkehrosmose bis zu 60 bar. Die Porendurchmesser definieren den Membrantyp und stehen in direktem Zusammenhang mit den Abscheideraten: Alle Stoffe, die kleiner als die Poren sind, können die Membran passieren, größere werden zurückgehalten.

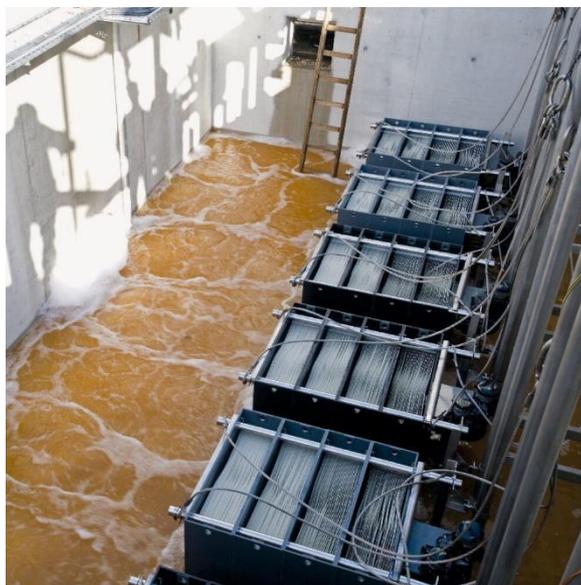


Abbildung 15: Membranmodule in der Kläranlage HÜNXE (Quelle: Emschergenossenschaft/Lippeverband)

Die Ultra- und Mikrofiltrations wird der konventionellen Nachklärung nachgeschaltet. Die wichtigsten Einflussgrößen auf die Wirksamkeit, den Energiebedarf und die Jahreskosten des Verfahrens ist von verschiedenen Parametern abhängig:

- Organische Belastung (eine hohe organische Belastung kann zu Fouling führen)
- Feststoffgehalt
- Trenngrenze der Membran
- Druckdifferenz: Sie wird höher, je kleiner die Trenngröße der Membran ist

Einfluss auf die Jahreskosten haben:

- Lebensdauer der Membranen
- Energiebedarf
- Anzahl der Reinigungen

Die Membrantechnik weist derzeit sowohl höhere Investitionskosten als auch Betriebskosten im Vergleich zu den derzeit etablierten Verfahren auf. Gleichzeitig ist aber eine starke Entwicklung in der Optimierung dieser Verfahrenstechnologie (Membranmaterialien, Trennpotential, Steuer- und Regelungstechnik) feststellbar, die die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens deutlich verbessern wird.

Kombinationsverfahren

Verfahrenskombinationen vereinen zum Beispiel die Adsorption von Spurenstoffen an Aktivkohle mit einer Membranfiltration. Die Membranstufe übernimmt die Abtrennung der Aktivkohle, Mikroplastik und multiresistenten Keimen. Somit gewährleistet dieses Verfahren nicht nur die Elimination von Mikroschadstoffen, sondern greift auch der zukünftigen Diskussion über die Abtrennung multiresistenter Keime und Mikroplastik nach Klärwerksabläufen vor.

In einer wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung ist der zusätzliche Mehrwert der kombinierten Membran- und Adsorptionstechnologie aufgrund zusätzlicher Eliminationspotentiale (Multibarrierensystem), wie etwa eine weitergehende Hygienisierung des Abwasserstroms zusehen und in einem Technologievergleich zu berücksichtigen. So können die zusätzlichen spezifischen Ausbaurkosten für UV-Desinfektionsanlagen mit ca. € 25.--/EW zur Hygienisierung von biologisch gereinigtem Abwasser angenommen werden. Damit wären rund 20% der Gesamtinvestitionskosten einer kombinierten Membran-Aktivkohle-Anlage, als Mehrwert gegenüber Anlagen, die nicht über dieses Leistungsspektrum verfügen gegenüberzustellen.

Nachgeschaltete biologische Verfahren

Mit dem Begriff „Nachgeschaltete biologische Verfahren“ sind Verfahren gemeint, die eine biologische Aktivität aufweisen und nach der biologischen Abwasserbehandlung angeordnet sind. Dazu zählen zum Beispiel Bodenfilter, Sandfilter, Abwasserteiche (Schönungsteiche) und Pflanzenkläranlagen (Constructed Wetland). Sie beruhen zumeist auf einer Kombination unterschiedlicher Prozesse. Für gelöste Stoffe ist

meist der biologische Abbau dominant. Feststoffe können durch Filterwirkungen zurückgehalten werden und es kann zu Sorptionsprozessen kommen. Umwandlungsprozesse können aufgrund der Sonneneinstrahlung von statten gehen.

5.4.3.3 Allgemeine Kriterien zur Verfahrensauswahl

Die örtlichen Randbedingungen in Hinblick auf die Integration einer Anlage zur Mikroschadstoffelimination sind bei der Verfahrensauswahl und der Ausarbeitung von Untervarianten zu berücksichtigen.

Eliminationsraten

Nach derzeitigem Kenntnisstand sind mehrere Verfahren zur Entfernung von Mikroschadstoffen geeignet. Die Verfahrensauswahl im Einzelfall ist abhängig von den örtlichen Gegebenheiten und den relevanten Zielvorgaben.

Platzbedarf und Flächenverfügbarkeit

Bei der Auslegung der vierten Reinigungsstufe ist es notwendig die örtlichen Randbedingungen der Bestandsanlagen (z. B. Flächenverfügbarkeit) zu berücksichtigen. Es könnten beispielsweise bereits vorhandene Verfahrens- und Bautechnik, wie Filtrationsanlage oder freie Beckenkapazität, für das neue System genutzt werden.

Betriebssicherheit

Die Sicherheit des neuen Verfahrens muss durch die Verfahrenswahl und den fachgerechten Betrieb gewährleistet sein. In der modernen Verfahrenstechnik ist der Einsatz von Membrantrennprozessen weit verbreitet, da sie Betriebssicherheit, Kompaktheit, Energieeffizienz und Betrieb ohne gefährliche Chemikalien gewährleisten können.

Anforderungen an das Betriebspersonal

- Im laufenden Betrieb wird von einer geringen Arbeitsbelastung ausgegangen
- die Verfahren sind weitestgehend automatisierbar
- Personalbedarf entsteht z.B. bei der Reinigung der Membranen bzw. Adsorbens Austausch

Bezüglich der Qualifikation wird von keiner zusätzlich erforderlichen Ausbildung für das bereits bestehende Personal (mit Einschulung) ausgegangen.

Auslegungsschritte am Beispiel einer Verfahrenskombination (Mikrofiltration plus Aktivkohle)

Folgende Schritte werden bei der Auslegung empfohlen:

- **Bestimmung der Randbedingungen**
 - ✓ Ist-Zustand des zu behandelnden Feedstromes: Volumenstrom, Feststoffgehalt, Adsorptivkonzentration, Konzentration an Fremdstoffen, pH-Wert, Salzkonzentration
 - ✓ Soll-Zustand definieren bzw. geforderte Grenzwerte bzw. Reinheiten festlegen
- **Festlegung Membran und Adsorbens**
 - ✓ Festlegung der Membrane durch vergleichende Laborversuche
 - ✓ Festlegung des Adsorbens durch vergleichende Laborversuche
- **Festlegung der Regenerierungsmethode**
 - ✓ Abhängig von Art und Menge des eingesetzten Adsorbens
- **Dimensionierung der Adsorptionsanlage**
 - ✓ Bestimmung der benötigten Adsorbensmenge
 - ✓ Festlegung der Modulanzahl und des Höhen-Längen-Verhältnisses der Module
 - ✓ Entscheidung über die Verschaltung der Module
- **Plausibilitätsstudie**
 - ✓ Überprüfung, ob die Laufzeiten der Module mit den Regenerierungszeiten kompatibel sind
 - ✓ Überprüfung, ob der Druckverlust nicht zu hoch ist (Schädigung des Adsorbens, energetische Gesichtspunkte)
- **Auslegung und Festlegung der Peripherie**
 - ✓ Pumpen, Ventile, Steuerungseinrichtungen, Vorbehandlungsstufen, vor- oder nachgeschaltete Behälter.

5.4.3.4 Wirtschaftlichkeit

Auswertungen publizierter Machbarkeitsstudien für Maßnahmen zur Mikroschadstoffentfernung für Deutschland (Mikroschadstoffelimination in kommunalen Kläranlagen in NRW, Stand 05/2018)¹⁰ zeigen, dass die Investitionskostenabschätzungen, auch innerhalb der einzelnen Verfahrenstechnologie, in Abhängigkeit des Standortes und den spezifischen Rahmenbedingungen sehr große Unterschiede aufweisen. Rein aus wirtschaftlicher Sicht ist daher eine Präferenz für eine bestimmte Verfahrenstechnologie daher schwer abzuleiten. Die Membrantechnik weist derzeit sowohl höhere

¹⁰ Mikroschadstoffelimination in kommunalen Kläranlagen in NRW, Stand 05/2018, <https://www.masterplan-wasser.nrw.de/das-kompetenzzentrum/>

Investitionskosten als auch Betriebskosten im Vergleich zu den derzeit etablierten Verfahren auf. Gleichzeitig ist aber eine starke Entwicklung in der Optimierung dieser Verfahrenstechnologie (Membranmaterialien, Trennpotential, Steuer- und Regelungstechnik) feststellbar, die die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens deutlich verbessern wird. In einer wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung ist ferner der zusätzliche Mehrwert der kombinierten Membran- und Adsorptionstechnologie aufgrund zusätzlicher Eliminationspotentiale (Multibarriensystem), wie etwa eine weitergehende Hygienisierung des Abwasserstroms zusehen und in einem Technologievergleich zu berücksichtigen. So können die zusätzlichen spezifischen Ausbaurkosten für UV-Desinfektionsanlagen mit ca. € 25.--/EW zur Hygienisierung von biologisch gereinigtem Abwasser angenommen werden (Müller et.al, 2009¹¹). Damit wären rund 20% der Gesamtinvestitionskosten einer kombinierten Membran-Aktivkohle-Anlage, als Mehrwert gegenüber Anlagen, die nicht über dieses Leistungsspektrum verfügen gegenüberzustellen.

Auf Basis der Erkenntnisse aus Machbarkeitsstudien können für die derzeit gängigsten Verfahrenstechnologie nachfolgende Richtwerte angesetzt werden.

Ozonung

Die durchschnittlichen Investitionskosten betragen € 41,6/EW mit einer Bandbreite in Abhängigkeit der Ausbaugröße von 7,7 €/EW bis 133,3 €/EW. Die durchschnittlichen jährlichen Betriebskosten werden mit 2,98 €/EW bei einer Bandbreite von 0,50 €/EW bis 13,3 €/EW beziffert.

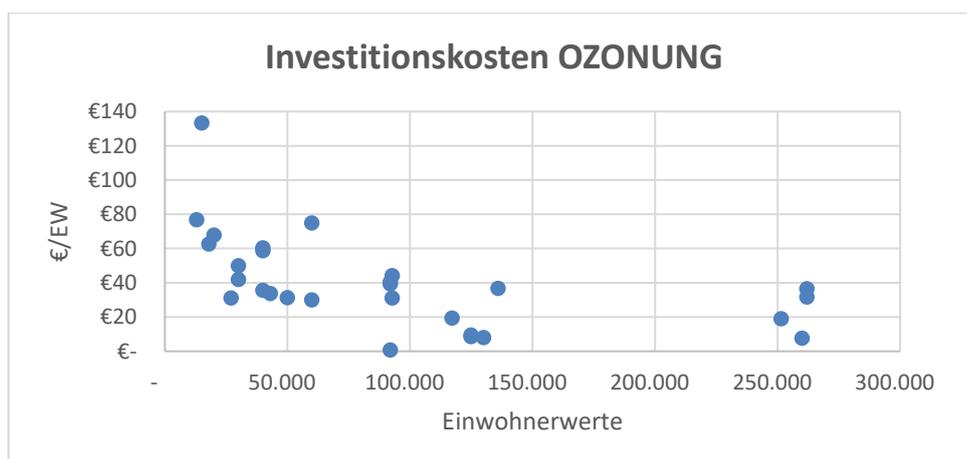


Abbildung 16: Investitionskosten je Einwohnerwert für Ozonanlagen zur Mikroschadstoffelimination

11 Müller, K., Bleisteiner, S., Pirchner, A., Gnirss, R., & Hübner, M. (2009). Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser. KA - Abwasser, Abfall(6), S. 593-599.

Pulveraktivkohle

Die durchschnittlichen Investitionskosten betragen € 67,2/EW mit einer Bandbreite in Abhängigkeit der Ausbaugröße von 12,3 €/EW bis 167 €/EW. Die durchschnittlichen jährlichen Betriebskosten werden mit 5,35 €/EW bei einer Bandbreite von 0,54 €/EW bis 13,9 €/EW beziffert.

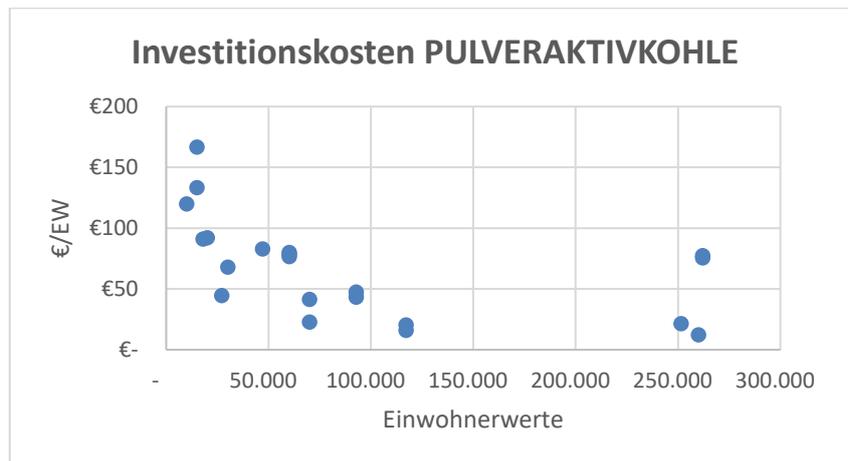


Abbildung 17: Investitionskosten je Einwohnerwert für Verfahren mit Pulveraktivkohle zur Mikroschadstoffelimination

Granulierte Aktivkohle

Die durchschnittlichen Investitionskosten betragen € 33,0/EW mit einer Bandbreite in Abhängigkeit der Ausbaugröße von 9,7 €/EW bis 70,6 €/EW. Die durchschnittlichen jährlichen Betriebskosten werden mit 3,90 €/EW bei einer Bandbreite von 1,15 €/EW bis 10,7 €/EW beziffert.

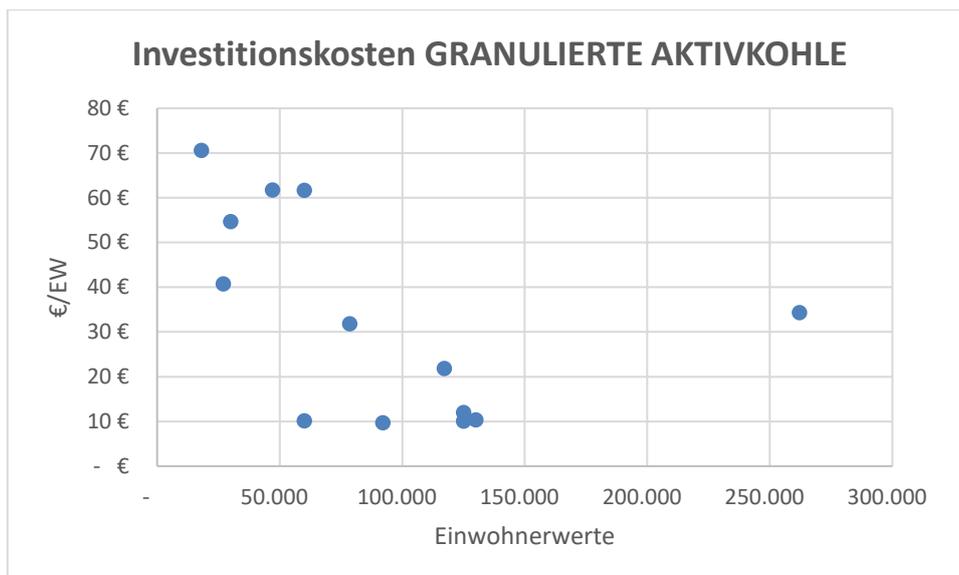


Abbildung 18: Investitionskosten je Einwohnerwert für Verfahren mit Aktivkohle/Druckfilter zur Mikroschadstoffelimination

Technologievergleich

			mit 1 m/s Überströmung
	Ozonung¹	Aktivkohle- Druckfilter¹	Membran- Aktivkohle²
Investitionskosten €/EW	€ 49,10	€ 12,80	€ 41,93
Betriebskosten €/EW/a	€ 3,47	€ 5,11	€ 7,88

- 1 Kreuzinger, N., Haslinger, J., Kornfeind, L., Schaar, H., Saracevic, E., Winkelbauer, A., Wieland, A. (2015). *KomOzAk Endbericht - Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer mit Ozon sowie Aktivkohle für die Entfernung organischer Spurenstoffe*. Wien: BUNDESMINISTERIUM.
- 2 Kostenschätzung aus dem Pilotprojekt „Innovatives Multibarrierensystem zur selektiven Abwasserbehandlung (Land Steiermark 2022)

5.5 Ablaufschema

WEITERGEHENDE ABWASSERBEHANDLUNG ZUR MIKROSCHADSTOFF ELIMINATION

Querschnittsmaterie:

Entwicklung und Durchführung von Maßnahmen zur Information und Sensibilisierung von Öffentlichkeit sowie von ausgewählten Berufsgruppen aus den Bereichen Gesundheit (Ärzte, Apotheker), Pflege, Bildung, Abfallwirtschaft.

1. Festlegung des Betrachtungsraums (Gewässersystem) mit den bestehenden Nutzungen und Schutzzielen



2. Ermittlung der Belastungssituation

- ✓ Monitoring, Modellierung



3. Priorisierung von Handlungsoptionen

- ✓ Quellen- und anwendungsbezogene Maßnahmen
- ✓ Strukturelle Maßnahmen im Bereich Kläranlagen
 - ✓ Auswahl von Kläranlagen



4. Auswahl von Kläranlagen

- ✓ Beitrag zur Erreichung von Schutzzielen
 - ✓ Aufwand und Nutzen
- ✓ Synergieeffekte (P-Elimination, Hygienisierung)
 - ✓ Erweiterungsbedarf



5. Umsetzung

- ✓ Verfahrensauswahl
 - ✓ Zielvorgaben
- ✓ Eingliederung in Anlagenbestand
 - ✓ Umweltauswirkungen
 - ✓ Evaluation

Die Handlungsempfehlungen sind nicht als abgeschlossen zu verstehen, sondern sollen mit fortschreitender Erfahrung angepasst und ergänzt werden, um möglicherweise noch nicht bekannten Problemstellungen zukünftig begegnen zu können. Bei der Überarbeitung ist ein Zusammenwirken von Behördenvertretern, Betreibern sowie Akteuren aus der Forschung anzustreben, um den Anforderungen an eine zukunftsfähige Strategie zum Umgang mit Mikroschadstoffen gerecht zu werden.

6 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Versuchsaufbau</i>	4
<i>Abbildung 2: Systemkombination</i>	5
<i>Abbildung 3: Aufbau Rohrmodul</i>	5
<i>Abbildung 4: Versuchsaufbau</i>	6
<i>Abbildung 5: Aufbau der Versuchsanlage in der Kläranlage</i>	8
<i>Abbildung 6: Chromatogramm – Non Target Analyse</i>	9
<i>Abbildung 7: Eliminationsraten pharmazeutischer Wirkstoffe</i>	9
<i>Abbildung 8: Eliminationsraten pharmazeutischer Wirkstoffe durch eine 4. Reinigungsstufe</i>	13
<i>Abbildung 9: Tubular Modul</i>	14
<i>Abbildung 10: Kostenvergleich unterschiedlicher Verfahren zur Mikroschadstoff Elimination (Investitions- und Betriebskosten)</i>	18
<i>Abbildung 11: Übersicht Spurenstoffe nach Anwendungsgebieten (Pinnekamp, Mousel, Palmowski, & Beier, 2015)</i>	19
<i>Abbildung 12: Übersicht über verschiedene Verfahren der Spurenstoffelimination</i>	24
<i>Abbildung 13: Schema einer Ozonungsanlage</i>	25
<i>Abbildung 14: Fließschema einer PAK-Behandlung</i>	26
<i>Abbildung 15: Membranmodule in der Kläranlage HÜNXE (Quelle: Emschergenossenschaft/Lippeverband)</i>	27
<i>Abbildung 16: Investitionskosten je Einwohnerwert für Ozonanlagen zur Mikroschadstoffelimination</i> ..	31
<i>Abbildung 17: Investitionskosten je Einwohnerwert für Verfahren mit Pulveraktivkohle zur Mikroschadstoffelimination</i>	32
<i>Abbildung 18: Investitionskosten je Einwohnerwert für Verfahren mit Aktivkohle/Druckfilter zur Mikroschadstoffelimination</i>	33