

MIKROSCHADSTOFFREDUKTION AUF KLÄRANLAGEN IN NRW

Verfahren und Hinweise zur
Verfahrensauswahl

LANUK-Fachbericht 172



Vorwort

Der vorliegende LANUK-Fachbericht ist Teil einer Veröffentlichungsreihe des Landes Nordrhein-Westfalen, die den Handlungsrahmen zur Umsetzung der nordrhein-westfälischen Mikroschadstoffstrategie im Abwasser aufgezeigt.

Bereits erschienen in der Reihe der Veröffentlichungen ist als Entwurf der LANUK-Fachbericht „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Grundlagen für Planung, Betrieb und Überwachung“ (Stand November 2025), mit dem ein einheitlicher Vollzug im Hinblick auf Genehmigung und Selbstüberwachung von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion ermöglicht wird. Neben dem vorliegenden LANUK-Fachbericht wird zudem ein weiterer LANUK-Fachbericht mit einer Bestandsaufnahme zu Kosten und Energie sowie einer Auswertung zu Nachhaltigkeitsaspekten vorhandener Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion im Abwasser in Nordrhein-Westfalen erscheinen. Die LANUK-Fachberichte sind Bestandteil des Fachinformationssystems „Mikroschadstoffe NRW“, das von der Kompetenzstelle Mikroschadstoffe im Abwasser beim Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK NRW) betreut wird (www.mikroschadstoffe.nrw.de).

Die Mikroschadstoffstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen verfolgt einen umfassenden Maßnahmenansatz: Von der Quelle, bei der Anwendung bis hin zu nachgeschalteten Maßnahmen an Kläranlagen. Über das so genannte Multi-Barrieren-Konzept sind zur Verbesserung der Trinkwasserqualität zuletzt auch Maßnahmen bei der Trinkwasseraufbereitung zu prüfen und ggf. einzuleiten. Der Ausbau kommunaler Kläranlagen im Hinblick auf die Reduktion von Mikroschadstoffen im Abwasser erfolgte bisher nach einem immissionsseitigen Ansatz. Auf Grundlage der neuen Europäischen Kommunalabwasserrichtlinie (Richtlinie (EU) 2024/3019) werden zukünftig auch emissionsseitige Anforderungen zur Mikroschadstoffreduktion zu berücksichtigen sein, insbesondere für größere Kläranlagen. Daher werden in den nächsten zwei Jahrzehnten eine Reihe von kommunalen Kläranlagen zusätzlich mit Verfahrenstechniken zur Mikroschadstoffreduktion, den sogenannten vierten Reinigungsstufen, ausgestattet werden müssen, um Stoffeinträge über Abwassereinleitungen von kommunalen Kläranlagen in Gewässer so weit wie möglich zu reduzieren.

Der vorliegende LANUK-Fachbericht dient als Entscheidungshilfe für Betreibende kommunaler Kläranlagen, planende Ingenieurbüros und Behörden bei der Auswahl und Planung eines Verfahrens bzw. einer Verfahrensvariante zur Mikroschadstoffreduktion im Abwasser. Es werden Verfahren und Verfahrensvarianten nach dem Stand der Technik beschrieben, aktuelle Forschungs- und Entwicklungsbereiche aufgezeigt und Vorschläge für das Vorgehen bei der Verfahrenswahl im Planungsprozess dargestellt. Der LANUK-Fachbericht richtet sich zudem an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie die Fachöffentlichkeit.

Die Erstellung des vorliegenden LANUK-Fachberichts wurde durch das LANUK NRW, Fachbereich 57 „Kommunales und industrielles Abwasser“, beauftragt und durch ein Projektkonsortium, bestehend aus der Hydro-Ingenieure GmbH, der Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH sowie dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, realisiert.

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion	8
2.1	Differenzierung von Verfahrensvarianten	8
2.2	Oxidationsverfahren mit Ozon.....	11
2.2.1	Ozon vor Nachbehandlung.....	12
2.2.2	Aktuelle Forschung und Entwicklung zu Verfahren mit Ozon	15
2.3	Adsorptionsverfahren mit Pulveraktivkohle.....	15
2.3.1	PAK in separater Stufe mit Sedimentation und Rückführung (PAK-Stufe).....	16
2.3.2	PAK-Dosierung in Kontaktbecken vor einem Filter (PAK vor Filter).....	18
2.3.3	PAK-Simultandosierung in die biologische Stufe (PAK in Biologie)	20
2.3.4	PAK-Simultandosierung in einen Membranbioreaktor (PAK in MBR)	22
2.3.5	Aktuelle Forschung und Entwicklung zu PAK-Verfahren	24
2.4	Adsorptionsverfahren mit granulierter Aktivkohle	24
2.4.1	GAK-Festbettfiltration.....	25
2.4.2	GAK im Schwebebett.....	28
2.4.3	Aktuelle Forschung und Entwicklung zu GAK-Verfahren.....	29
2.5	Kombinationsverfahren	30
2.5.1	Kombinationsverfahren Ozon und GAK.....	30
2.5.2	Aktuelle Forschung und Entwicklung zu Kombinationsverfahren.....	32
2.6	Naturnahe Verfahren.....	33
2.6.1	Retentionsbodenfilter mit Aktivkohleadditiven	33
2.6.2	Aktuelle Forschung und Entwicklung zu naturnahen Verfahren.....	36
2.7	Sonstige Verfahren	36
2.7.1	Erweiterte Oxidationsprozesse.....	37
2.7.2	Membranverfahren.....	38
3	Verfahrensauswahl	39
3.1	Planungsgrundlagen und Auslegung.....	40
3.2	Vorauswahl möglicher Verfahrensvarianten	41
3.2.1	Randbedingungen auf der Kläranlage	42
3.2.2	Einflüsse des Einzugsgebiets der Kläranlage.....	45
3.2.3	Gewässerspezifische Anforderungen	45
3.2.4	Entwicklungsstand der Verfahren.....	46
3.2.5	Sonstige Vorgaben und Randbedingungen	47
3.3	Bewertungsmatrix / Wertungskriterien zum Variantenvergleich.....	47
3.3.1	Hauptkriterium Betrieb	50
3.3.2	Hauptkriterium Reinigungsleistung.....	51
3.3.3	Hauptkriterium Nachhaltigkeit	54
3.3.4	Hauptkriterium Planung.....	55
3.4	Gesamtbewertung inkl. Wirtschaftlichkeit	57
4	Zukünftige Herausforderungen und Ausblick	58
	Abkürzungsverzeichnis	61
	Literaturverzeichnis	62
	Abbildungsverzeichnis	68
	Tabellenverzeichnis	69

1 Einleitung

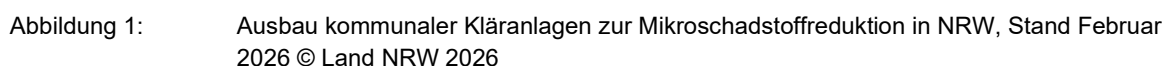
Der Ablauf kommunaler Kläranlagen ist für eine Reihe von Mikroschadstoffen (auch Spurenstoffe, Mikroverunreinigungen genannt) die relevanteste Quelle für Stoffeinträge in das Gewässersystem. Als Mikroschadstoffe werden hier organische Stoffe anthropogenen Ursprungs wie z. B. Arzneimittelwirkstoffe, Röntgenkontrastmittel, endokrine Disruptoren, Biozide und Chemikalien aus Haushalt, Gewerbe und Industrie bezeichnet, welche im Wasserkreislauf in Konzentrationen von wenigen Nanogramm pro Liter bis hin zu einigen Mikrogramm pro Liter vorkommen. In diesen Konzentrationen können Mikroschadstoffe und deren Transformationsprodukte bereits negative Auswirkungen auf die aquatische Umwelt haben. Sofern Mikroschadstoffe persistent und bioakkumulativ sind und in die Nahrungskette gelangen, können diese auch für den Menschen ein gesundheitliches Risiko darstellen.

Die am 01.01.2025 in Kraft getretene Europäische Kommunalabwasserrichtlinie (EU-KARL) fordert daher in Artikel 8 *Viertbehandlung* in Absatz 1 verbindlich, Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser im hohen Maße zu reduzieren. Zeitlich gestaffelt sollen bis Ende des Jahres 2045 alle Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 150.000 Einwohnerwerten (EW) und mehr mit einer Viertbehandlung zur Reduktion von Mikroschadstoffen (sogenannte vierte Reinigungsstufe) ausgestattet werden. Bei Anlagen in der Größenordnung von 10.000 EW und mehr richtet sich der Ausbau von Anlagen nach einem risikobasierten Ansatz. Hierzu sind in einer Liste die Gebiete aufzunehmen, in denen die Konzentration oder Akkumulation von Mikroschadstoffen aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen ein Risiko für die Umwelt oder die menschliche Gesundheit darstellt (Richtlinie (EU) 2024/3019). Die zeitlich gestaffelten Fristen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Fristen für den Ausbau der Kläranlagen zur Reduktion von Mikroschadstoffen gemäß Europäischer Kommunalabwasserrichtlinie (Richtlinie (EU) 2024/3019)

Frist 31.12.	Prozentsatz bezogen auf Anzahl der Kläranlagen 10.000 bis < 150.000 EW	Prozentsatz bezogen auf Anzahl der Kläranlagen ≥ 150.000 EW
2033	10 %	20 %
2036	30 %	-
2039	60 %	60 %
2045	100 %	100 %

Die Mitgliedstaaten sollen gemäß Artikel 8 Absatz 2 bis zum 31. Dezember 2030 eine Liste der Gebiete in ihrem Hoheitsgebiet erstellen, in denen die Konzentration oder Akkumulation von Mikroschadstoffen aus kommunalen Kläranlagen ein Risiko für die Umwelt oder die menschliche Gesundheit darstellt. Die Liste soll Entnahmegebiete für die Trinkwassergewinnung, Badegewässer und Gebiete mit Aquakulturtätigkeiten sowie weitere sieben Arten von Gebieten auf Basis einer noch durchzuführenden Risikobewertung umfassen. Die Liste der Risikogebiete ist erstmals im Jahr 2033 und dann periodisch wiederkehrend alle sechs Jahre zu überprüfen und erforderlichenfalls zu aktualisieren. Wie viele Kläranlagen laut der EU-KARL nach dem risikobasierten Ansatz auszubauen sind, lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht verlässlich beziffern, da die Methodik zur Risikobewertung bisher nicht vorliegt und durch einen Durchführungsrechtsakt zur EU-KARL geregelt werden soll.



Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen – Fachbericht 172
- 6 / 69 -

Wesentliche Aspekte sind die Kosten und der Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion, aber auch die Verfahren selbst, die grundsätzlich für die Reduktion von Mikroschadstoffen zur Verfügung stehen. Für technische Planungen und Ausführungen haben sich bisher die Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK), die Filtration über granuliert Aktivkohle (GAK) und die Ozonung in alleiniger Anwendung oder in Kombination durchgesetzt. Für die Integration der Technologien in den Prozess der Abwasserbehandlung sind sehr unterschiedliche Umsetzungsvarianten möglich. Betreibende stehen damit vor der Wahl aus einer großen Anzahl an technischen Möglichkeiten zur Umsetzung der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion.

Aufgrund dieser Erkenntnisse und der sich aus der nationalen Umsetzung der EU-KARL ergebenden grundsätzlichen Verpflichtungen hat das Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK NRW) ein Projekt in Auftrag gegeben. Zielsetzung ist die Erarbeitung einer Entscheidungshilfe für Betreibende kommunaler Kläranlagen, planende Ingenieurbüros und Behörden zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen nach aktuellem Wissensstand. Hierzu sind im Rahmen des Projektes zwei LANUK-Fachberichte mit unterschiedlichen inhaltlichen Schwerpunkten erstellt worden.

Der vorliegende LANUK-Fachbericht 172 „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Verfahren und Hinweise zur Verfahrensauswahl“ beschreibt die eingesetzten Verfahren und die sich daraus ergebenden technischen Verfahrensvarianten zur Reduktion von Mikroschadstoffen im Abwasser und gibt Hinweise zu deren Auswahl. Zusätzliche Hinweise zeigen, dass gängige Bau- und Planungsprozesse die zeitliche Umsetzung des Kläranlagenausbaus maßgeblich beeinflussen. Der Fachbericht soll mit den dargestellten Inhalten die fachlich Beteiligten in die Lage versetzen, eine fundierte Auswahlentscheidung für die Umsetzung einer vierten Reinigungsstufe zu treffen. Die Durchführung einer Machbarkeitsstudie/Bedarfsplanung wie auch weiterführender planerischer Arbeiten zur Integration einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion kann und soll durch diesen LANUK-Fachbericht nicht ersetzt werden.

Der ergänzende zweite LANUK-Fachbericht „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Bestandsaufnahme zu Kosten, Energiebedarf und Nachhaltigkeit“ (LANUK NRW, 2026, noch unveröffentlicht) stellt auf Basis einer umfassenden Datenerhebung in Nordrhein-Westfalen eine aktuelle Bestandsaufnahme von technischen Anlagen zur Reduktion von Mikroschadstoffen bzw. von vierten Reinigungsstufen auf kommunalen Kläranlagen dar. Die Datengrundlage der enthaltenen Auswertungen entstammt einer Betreiberumfrage von Kläranlagen mit in Betrieb oder Bau befindlicher Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion aus dem Frühjahr 2025 und bezieht sich damit auf Betriebsdaten vor Veröffentlichung der EU-KARL.

Die Entwicklung von Anlagen zur Reduzierung von Mikroschadstoffen (4. Reinigungsstufen) bei der Abwasserbehandlung in Nordrhein-Westfalen kann über das Fachinformationssystem des LANUK NRW unter <https://mikroschadstoffe.nrw.de/> abgerufen werden.

2 Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion

Zur Reduktion von Mikroschadstoffen auf kommunalen Kläranlagen kommen verschiedene Technologien zum Einsatz. Eine Abgrenzung zwischen den Technologien kann anhand des Wirkprinzips (z. B. Oxidation, Adsorption) oder des wichtigsten Betriebsmittels (z. B. Ozon, PAK, GAK) erfolgen. Einige dieser Technologien haben sich in der Praxis bereits etabliert. Die prominentesten Vertreter sind hierbei die in der Einleitung erwähnten Technologien unter Zugabe von PAK, GAK oder Ozon. Darüber hinaus werden in ersten großtechnischen Umsetzungen sowie in Forschung und Entwicklung neue Technologien erschlossen.

Die technische Umsetzung der zuvor genannten Technologien kann i. d. R. auf verschiedene Arten und Weisen erfolgen, sodass in der Praxis je Technologie unterschiedlichste Verfahrensvarianten zum Einsatz kommen. In diesem Kapitel wird eine Auswahl relevanter Verfahrensvarianten weitergehend beschrieben, wobei wichtige Merkmale sowie Vor- und Nachteile der Technologien und Verfahrensvarianten im Vordergrund stehen. Begleitet werden die Beschreibungen von Praxisbeispielen und Verweisen auf in Nordrhein-Westfalen umgesetzte Anlagen sowie einem Ausblick auf aktuelle Entwicklungen.

Dieser Bericht zielt nicht darauf ab, die Technologien allumfassend mitsamt ihrer Wirkmechanismen im Detail zu beschreiben. Hierzu und insbesondere für die Auslegung einzelner Verfahren wird auf die zitierte Literatur zu den jeweiligen Technologien verwiesen. Allen vorweg liefert die DWA Merkblattreihe DWA-M 285 in ihren Teilen 2 (DWA-M 285-2, 2021) und 3 (DWA-M 285-3, 2026) weitergehende Informationen.

2.1 Differenzierung von Verfahrensvarianten

Die Technologien zur Mikroschadstoffreduktion können in Form von verschiedenen Verfahrensvarianten umgesetzt werden. Die Einteilung des Reifegrades erfolgte gemäß der in Tabelle 2 beschriebenen Kriterien. Eine systematische Unterteilung in etablierte, großtechnisch erprobte und noch in Erprobung befindliche Verfahrensvarianten ist in Abbildung 2 dargestellt.

Tabelle 2: Angewandte Kriterien zur Unterscheidung des Reifegrades verschiedener umgesetzter Verfahrensvarianten (Bezug sind hier Referenzen in Deutschland, Schweiz und Österreich)

Reifegrad	Kriterien
Etablierte Verfahrensvarianten	• Anzahl großtechnischer Umsetzung > 2 • Effektivität: ≥ 80 %ige Reduktion erreichbar • Regelbetrieb erreicht
Großtechnisch erprobte Verfahrensvarianten	• Anzahl mindestens eine Referenz (veröffentlicht) • Effektivität: ≥ 80 %ige Reduktion erreichbar • Laufzeit: mindestens sechs Monate großtechnisch • großtechnischer Maßstab (keine Halbtechnik)
Noch in Erprobung / Entwicklung	• Anzahl: mindestens einmal pilotiert in DACH-Region • Effektivität: nachweislich ≥ 80 %ige Reduktion • mit unabhängiger Veröffentlichung • Potenzial für Großtechnik in den nächsten fünf Jahren

Die Technologien unterscheiden sich zunächst durch den allgemeinen Wirkmechanismus (adsorptiv, oxidativ, physikalisch, naturnah) bzw. aufgrund der Kombination verschiedener Wirkmechanismen. Eine weitergehende Unterscheidung zwischen den einzelnen Verfahrensvarianten erfolgt über verfahrenstechnische Alleinstellungsmerkmale.

In den Unterkapiteln des Kapitels 2 werden die den zuvor genannten Kriterien zufolge etablierten Verfahrensvarianten sowie ausgewählte Vertreter der großtechnisch erprobten Verfahrensvarianten weitergehend beschrieben. Je Technologie erfolgt außerdem in einem separaten Unterkapitel der Hinweis auf aktuelle Entwicklungen unter Auflistung relevanter Forschungsprojekte zu den in Erprobung/Entwicklung befindlichen Verfahren.

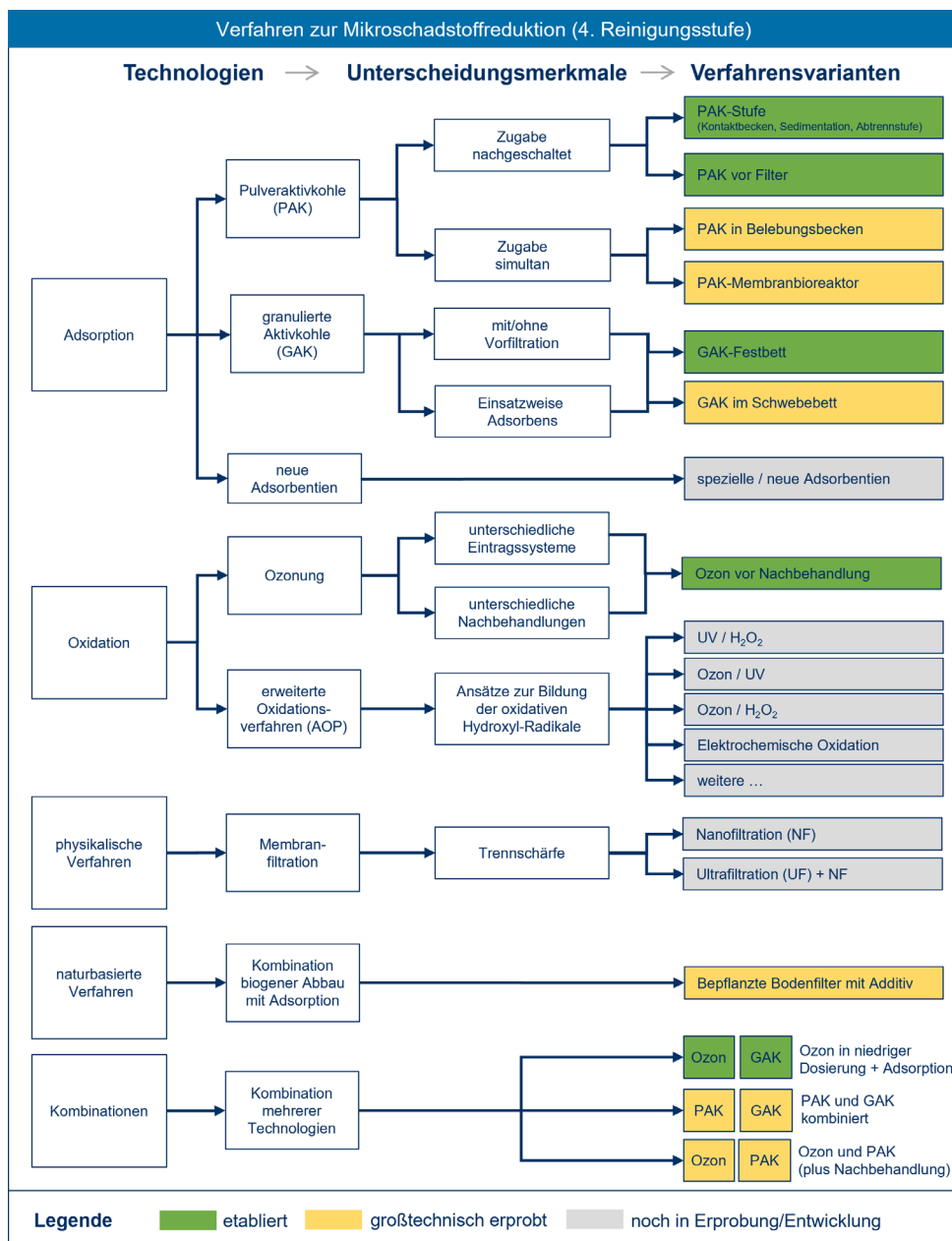


Abbildung 2: Überblick über Technologien und zu unterscheidende Verfahrensvarianten mit Einstufung in etablierte, großtechnisch erprobte und noch in Entwicklung befindliche Verfahren. (Hinweise: Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit, es sind nicht nur die in Nordrhein-Westfalen umgesetzten Verfahren aufgelistet; UV: Ultraviolette Strahlung, H₂O₂: Wasserstoffperoxid)

In Nordrhein-Westfalen wurden von den oben definierten Verfahrensvarianten die in Abbildung 3 dargestellten Varianten umgesetzt oder befinden sich in Planung bzw. Bau. Auch wenn einige Verfahren bzw. Verfahrensvarianten in Nordrhein-Westfalen noch nicht umgesetzt wurden, können diese teilweise aufgrund der in Deutschland und der Schweiz vorhandenen großtechnischen Praxiserfahrung als etabliert angesehen werden.

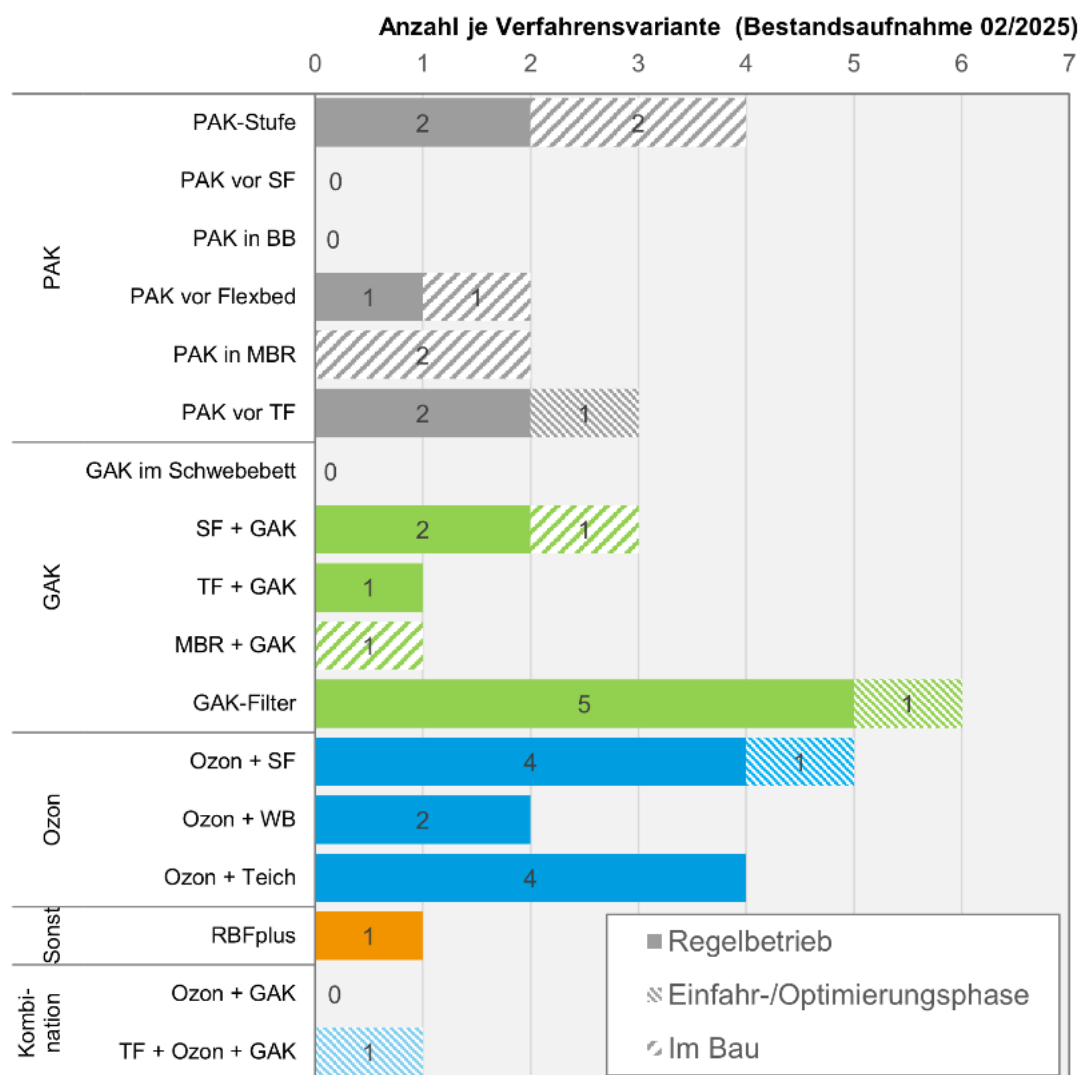


Abbildung 3: In Nordrhein-Westfalen umgesetzte oder in Bau befindliche Verfahrensvarianten (Auswertung aus eigenen Umfragedaten für n=35 Kläranlagen; Stand Februar 2025); WB: Wirbelbett

Abbildung 4 zeigt Beispiele von ausgewählten Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen.



Abbildung 4: Beispiele für ausgeführte Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen, links: Ozongenerator Kläranlage Lemgo, Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo GmbH (Foto: Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo GmbH), Mitte: PAK-Silo Kläranlage Dülmen, Lippeverband (Foto: Hydro-Ingenieure GmbH), rechts: GAK-Kessel Kläranlage Harsewinkel, Stadt Harsewinkel (Foto: Hydro-Ingenieure GmbH)

2.2 Oxidationsverfahren mit Ozon

Ozon ist ein reaktives Gas, welches mit einer Vielzahl von Wasserinhaltsstoffen reagieren kann. Es reagiert nicht selektiv, sodass sowohl die Zielsubstanzen der organischen Mikroschadstoffe als auch in der Hintergrundmatrix enthaltene sonstige organische Verbindungen (häufig quantifiziert in Form des gelösten organischen Kohlenstoffes (DOC)) und anorganischen Verbindungen reagieren. Diese Reaktionen können direkt mit den Ozonmolekülen oder indirekt, über die zwischenzeitliche Erzeugung von reaktiven Radikalen, erfolgen. In beiden Fällen erfolgt eine partielle Oxidation (Transformation) der Wasserinhaltsstoffe zu Reaktionsprodukten. Durch die Reaktion reduziert sich die Ausgangskonzentration der organischen Mikroschadstoffe und es entstehen Transformationsprodukte, welche in vielen Fällen leichter biologisch abbaubar sind als ihre Ausgangsstoffe. Zudem entstehen durch die Reaktion der Hintergrundmatrix mit dem Ozon und den reaktiven Radikalen sogenannte Oxidationsnebenprodukte. Ein Beispiel dafür ist das potenziell kanzerogene Bromat, welches nicht biologisch abbaubar ist. Zur Reduktion erzeugter Transformationsprodukte und mancher Oxidationsnebenprodukte wird eine biologische und/oder adsorptive Nachbehandlung empfohlen, um mögliche ökotoxikologische Auswirkungen zu minimieren. Die Reduktion von Wasserinhaltsstoffen in der Hintergrundmatrix vor der Behandlung mit Ozon ist hierbei wichtig, um einerseits den Ozonbedarf zu reduzieren und die Bildung von Oxidationsnebenprodukten möglichst gering zu halten. Weitergehende Grundlagen zur Mikroschadstoffreduktion mittels Ozon und dessen detaillierte Verfahrensauslegung können dem Merkblatt DWA-M 285-3 entnommen werden.

2.2.1 Ozon vor Nachbehandlung

Abbildung 5 zeigt das Fließschema einer konventionellen Ozonanlage zur Mikroschadstoffreduktion inklusive der wichtigsten Komponenten, welche im Folgenden weitergehend beschrieben werden.

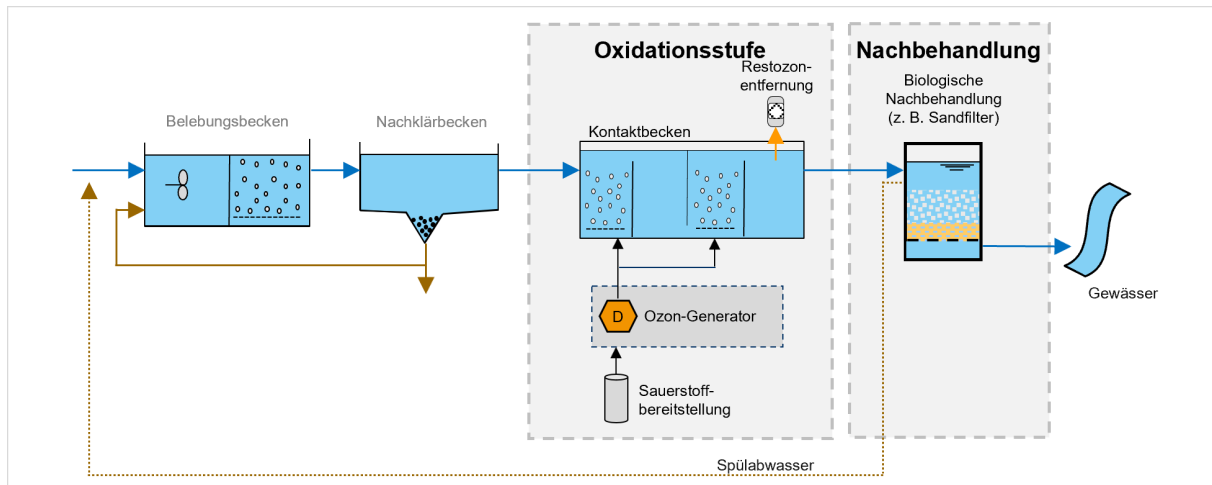


Abbildung 5: Verfahrensschema einer Ozonung vor biologischer Nachbehandlung (D = Dosierung)

Ozonerzeugung

Ozongas kann entweder aus Luftsauerstoff oder aus technischem Sauerstoff (oft auch bezeichnet als „Flüssigsauerstoff“) oder aus dem Englischen „Liquid Oxygen“ (kurz LOX) hergestellt werden. In der praktischen Umsetzung kommen bisher aus Effizienzgründen zumeist Systeme mit Ozonerzeugung aus technischem Sauerstoff zum Einsatz, da die Erzeugung aus Luftsauerstoff einen deutlich größeren Energiebedarf und eine größere Dimensionierung der gasführenden Infrastruktur in der vierten Reinigungsstufe bedeuten. Technischer Sauerstoff wird in flüssiger Form per Tankwagen geliefert und in Tanks vor Ort gespeichert. Die Umwandlung von technischem Sauerstoff in Ozongas erfolgt in einem Ozon-Generator vor Ort auf der Kläranlage.

Ozonreaktor und Gaseintrag

Der Eintrag des Ozongases in das Abwasser geschieht in einem hermetisch abgeriegelten Ozonreaktor mit einem Volumen ausreichend für ca. 15-30 Minuten Reaktionszeit bei Bemessungszufluss (DWA-M 285-3, 2026). Übliche Werte für die benötigte spezifische Ozondosis zur 80 %igen Mikroschadstoffreduktion liegen bei 0,3 bis 0,7 $\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$. In Nordrhein-Westfalen resultierten hieraus häufig absolute Ozondosen von ca. 2 bis 8 $\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{L}$. Absolute Dosen sind jedoch stark von der Zulaufqualität des Abwassers in die Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion abhängig und müssen darüber hinaus ggf. an die durch die EU-KARL neu definierten Indikatorsubstanzen zur Berechnung der 80 %igen Reduktion angepasst werden. Für eine exakte Auslegung werden Vorversuche zur Bestimmung der Ozonzehrung und Reduktionsleistung empfohlen. Hierbei sollte außerdem ab Bromidkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage von mehr als 150 $\mu\text{g}/\text{L}$ die Bromatbildung untersucht und Möglichkeiten zur Risikominimierung geprüft werden, um die Eignung dieser Technologie zu überprüfen (DWA-M 285-3, 2026).

Ozongas wird im Ozonreaktor derzeit durch keramische Diffusoren oder durch so genannte Injektoren in das Abwasser eingetragen. Für einen effizienten Gaseintrag werden bei dem Eintrag mit Diffusoren Mindesteinbautiefen von größer 5 m empfohlen, bei Injektorsystemen mindestens 4 m. Dabei kommen häufig mehrere Diffusorfelder zum Einsatz, um flexible Betriebseinstellungen zu ermöglichen. Bei dem Gaseintrag mittels Injektoren erfolgt die Einmischung des Ozons bereits in der Zulaufleitung. Auch bei sehr gut dimensionierten Reaktoren ist eine Restozonvernichtung im Abgasstrom vorzusehen, um den Austrag von Ozon in die Atmosphäre sicher zu verhindern und somit das Betriebspersonal zu schützen und ungewollte Umwelteinwirkungen zu vermeiden.

Nachbehandlung

Die zumeist biologische und/oder adsorptive Nachbehandlung nach der Ozonung dient der Reduktion von im Reaktionsvorgang erzeugten Transformationsprodukten und solchen Oxidationsnebenprodukten, welche durch das gewählte Nachbehandlungsverfahren reduziert werden können. Bromat, als ein prominenter Vertreter der Oxidationsnebenprodukte, bleibt von einer solchen Nachbehandlung unberührt, wohingegen beispielsweise Nitrosamine durch biologischen Abbau reduziert werden können. In der Praxis kommen hierzu i. d. R. die folgenden Nachbehandlungsverfahren zum Einsatz:

- **Raumfilter:** In Raumfiltern (z. B. Sandfilter) entwickelt sich bei entsprechenden Betriebsbedingungen eine biologisch aktive Schicht auf der Oberfläche des Filtersubstrats, welche zu einem biologischen Abbau der biologisch abbaubaren Transformationsprodukte und mancher Oxidationsnebenprodukte führt. Falls Bestandsfilterbauwerke existieren, können diese häufig für diesen Anwendungsfall genutzt bzw. umfunktioniert werden. Bei dieser Variante der Nachbehandlung bestehen Synergieeffekte mit der chemischen Phosphorelimination, welche bei der Planung berücksichtigt werden sollten.
- **Biologische Aktivkohlefilter (BAK):** Wenn die Ozondosis zur vollständigen Erreichung der geforderten Mikroschadstoffreduktion gewählt wird und zur Nachbehandlung eingesetzte GAK-Verfahren so betrieben werden, dass der biologische Abbau der Transformationsprodukte im Vordergrund steht, so spricht man von biologischen Aktivkohlefiltern. Trägt die GAK hingegen zu einem relevanten Maße adsorptiv zur Erreichung der Reduktionsziele der Mikroschadstoffe bei, so spricht man von einer Verfahrenskombination aus Ozon und GAK (siehe hierzu Kapitel 2.5).
- **Wirbel- und Festbettbioreaktoren:** Eine Nachbehandlung im biologisch aktiven Wirbelbett- oder Festbettreaktor wird ebenfalls angewendet. Hierbei findet ein biologischer Abbau in dem auf suspendierten Aufwuchskörpern befindlichen Biofilm statt. Allerdings liegen hierzu bisher weniger Erkenntnisse vor als zum Einsatz von Sand- oder BAK-Filtern (Sauter, 2024). Es müssen geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um den Austrag von Aufwuchskörpern in die Umwelt zu verhindern.
- **Schönungsteiche:** Im Einzelfall kommen in Nordrhein-Westfalen Schönungsteiche als biologische Nachbehandlung zum Einsatz. Die Wirkung von Schönungsteichen auf den biologischen Abbau von Reaktionsprodukten ist noch nicht abschließend untersucht. Der Einsatz vorhandener Schönungsteiche sollte im Einzelfall geprüft und bewertet werden.

Verfahrensvarianten der Ozonverfahren

Die Verfahrensschemata von Verfahrensvarianten der Ozonung werden durch die unterschiedliche Ausführung von Teilaspekten (z. B. Art der Ozonerzeugung, Art des Eintragungssystems) kaum verändert. Deshalb werden an dieser Stelle keine Vor- und Nachteile unterschiedlicher Verfahrensvarianten der Technologie Ozon gegenübergestellt.

Ozonverfahren wurden in Nordrhein-Westfalen beispielsweise an folgenden Standorten umgesetzt (Datenstand: Betreiberbefragung Frühjahr 2025):

- Mit anschließender Mehrschichtfiltration:
 - Aachen-Soers (Wasserverband Eifel-Rur, im Regelbetrieb)
- Mit anschließender Sandfiltration:
 - Lübbecke (Stadt Lübbecke, im Regelbetrieb),
 - Lemgo-Grevenmarsch (Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo GmbH, im Regelbetrieb),
 - Brühl (Stadt Brühl, im Bau),
 - Schloß Holte-Stukenbrock (Stadt Schloß Holte-Stukenbrock, im Regelbetrieb)
- Mit anschließendem Schönungsteich:
 - Bad Sassendorf (Lippeverband, im Regelbetrieb),
 - Augustdorf (Gemeindewerke Augustdorf, im Regelbetrieb),
 - Espelkamp (Stadtwerke Espelkamp AöR, im Regelbetrieb)
- Mit anschließendem biologisch aktivem Wirbelbett
 - Rheda-Wiedenbrück (Stadt Rheda-Wiedenbrück, im Regelbetrieb),
 - Warburg (Kommunalunternehmen Warburg, im Regelbetrieb)

Tabelle 3: Kläranlage Aachen-Soers als Beispiel für „Ozon vor Nachbehandlung“ in Nordrhein-Westfalen

Verfahrensbeispiel Kläranlage Aachen-Soers	
Auf der Kläranlage Aachen-Soers (458.300 EW) wird seit dem Jahr 2018 eine Ozonung als Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion im Vollstrom betrieben. Betrieben werden zwei parallele Ozonreaktoren mit einem Ozoneintrag über Diffusoren. Zur biologischen Nachbehandlung des Ablaufs der Ozonung wird die bereits vor dem Bau der vierten Reinigungsstufe vorhandene Mehrschichtfiltration genutzt.	
Allgemeine Informationen	
Betreiber:	Wasserverband Eifel-Rur
Ausbaugröße:	458.300 EW
Mikroschadstoffreduktion	
Verfahren:	Ozonung
Nachbehandlung:	Nachnitrifikation und Raumfilter (beides Bestand)
Inbetriebnahme:	2018
Q _{Auslegung,4. RS} :	2.899 m³/h (Vollstrom)
Komponenten / Bauwerke	
• Zulaufpumpwerk • 2 Ozonreaktoren parallel • 1 Sauerstofftank • Nachbehandlung (Bestand)	



Ozonstufe auf der Kläranlage Aachen-Soers, Wasserverband Eifel-Rur (Foto: Wasserverband Eifel-Rur)

2.2.2 Aktuelle Forschung und Entwicklung zu Verfahren mit Ozon

Neben einer möglichst effizienten Ozonерzeugung zur Reduktion des Energiebedarfs und Verbesserung der Bilanz der CO₂ Äquivalente (CO₂e) wird im Bereich der Oxidationsverfahren mit Ozon insbesondere die Eintrageeffizienz durch verschiedene, neuartige Eintragungssysteme (z. B. Ozonstarkwasser oder Ultraschall) erforscht. Des Weiteren gibt es Projekte, die eine Kombination von Ozon beispielsweise mit Biofilmreaktoren oder Ultrafiltration für einen effizienteren Einsatz untersuchen. Die Kombination von Ozon mit UV oder weiteren Oxidationsmitteln für eine weitergehende Oxidation wird im Kapitel 2.5 behandelt und stellt ebenfalls einen großen Forschungsbereich dar. Eine Übersicht über aktuell laufende Entwicklungen zum Thema Ozon gibt die nachfolgende Tabelle 4.

Tabelle 4: Überblick über neue Entwicklungen und aktuelle Projekte zum Einsatz von Ozon zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen

Kategorie	Bezeichnung	Quellen (und weiterführende Direktlinks in der Fußnote)	Bemerkung
Ozon- Eintragungssystem	Ozonstarkwasser	AirLiquide, 2025 ¹	Pilotierung Kläranlage Duisburg-Vierlinden
	USONiQ	Ederer et al., 2017 ² Türk et al., 2024 ³	derzeit Erprobung Kläranlage Hamminkeln
	ELOZONIQ	Böhler et al., 2025 ⁴	Aktuell laufendes Projekt Abwasserreinigungsanlage bzw. Kläranlage Höfe (eawag)
Ozon + Membran/ Ultrafiltration	HyFive	u.a. Werner et al., 2025 ⁵	Laufendes F&E-Projekt Uni Duisburg-Essen
Ozon + Biofilm	Microforce++	stowa, 2023 ⁶	Pilotierung in den Niederlanden

2.3 Adsorptionsverfahren mit Pulveraktivkohle

Eine Vielzahl von Mikroschadstoffen lassen sich adsorptiv auf der äußeren und insbesondere der hochporösen inneren Oberfläche von Aktivkohle binden. Durch das Vermahlen zu Pulveraktivkohle (PAK) kann diese bedarfsgerecht dosiert werden. PAK wird hierzu auf der Kläranlage in Vorlagesilos gelagert, welche pneumatisch befüllt werden. Vor dem Dosieren wird die PAK in einer Wäge- und Dosiereinheit abgewogen und mittels Injektordüsen nach dem Wasserstrahlpumpenprinzip in einem Betriebswasserstrom suspendiert. Hierbei kommt es zu einer Benetzung der PAK-Oberfläche. Die entstehende PAK-Suspension wird anschließend an der

¹ <https://de.airliquide.com/ihre-anwendung/ozon-starkwasser>

² https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32879_01-Hauptbericht.pdf

³ <https://www.lanuk.nrw.de/themen/wasser/abwasser/forschung-und-entwicklung-fe/berichte-zu-abgeschlossenen-fe-vorhaben>

⁴ <https://micropoll.ch/wp-content/uploads/2025/09/Erfa-Treffen-2025-auf-ARA-Hoefe-Vorstellung-Pilotversuch.pdf>

⁵ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.202500040?msocid=167fc002d8176ac5299bd699d9846b1b>

⁶ <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202023/STOWA-2023-49-microforce%2B%2B.pdf>

gewünschten Stelle auf der Kläranlage in den Prozess dosiert. Hierzu genügt ein freier Auslauf.

Neben Mikroschadstoffen können auch weitere Abwasserinhaltsstoffe an der PAK adsorbieren. Deshalb ist die Platzierung der Dosierstelle mitentscheidend für die benötigte PAK-Dosis. Prinzipiell gilt hierbei: je geringer die Konzentration der Hintergrundmatrix desto weniger Aktivkohle wird benötigt. So kann beispielsweise bei der Zugabe der Aktivkohle in den Ablauf der biologischen Reinigungsstufe eine geringere Aktivkohle-Dosierung erfolgen als bei einer Zugabe in das Belebungsbecken. Darüber hinaus unterliegt die Adsorption von Mikroschadstoffen an PAK einer Adsorptionskinetik, weshalb auch die zur Verfügung stehende Kontaktzeit zwischen PAK und Abwasser über den Wirkungsgrad und somit die benötigte Dosis entscheiden.

Es resultieren hieraus unterschiedliche, mögliche Verfahrensvarianten, welche in der Praxis bereits Umsetzung finden. Diese unterscheiden sich insbesondere in der Dosierstelle der PAK in den Prozess, dem zur Verfügung stehenden Kontaktvolumen und der daraus resultierenden Kontaktzeit mit dem Abwasser. Zusätzlich kann mit Gleich- oder Gegenstromführung der PAK gearbeitet werden. Hieraus ergeben sich die in Kapitel 2.3.1 bis 2.3.4 weitergehend beschriebenen Verfahrensvarianten.

Alle Verfahrensvarianten haben gemeinsam, dass für eine möglichst vollständige Abtrennung der Pulverkohle aus dem Abwasser i. d. R. eine anschließende Filtration zur Verhinderung von Aktivkohleschlupf in das Gewässer erforderlich ist. Diese kann beispielsweise als Raumfiltration (Sand- oder Mehrschichtfilter), als Tuchfilter oder als Membranfilter ausgeführt werden. Die PAK wird üblicherweise über die Schlammeschiene entsorgt, verbrannt und in Form von Klärschlammmasche deponiert.

2.3.1 PAK in separater Stufe mit Sedimentation und Rückführung (PAK-Stufe)

Eine verbreitete Auslegungsvariante der separaten PAK-Stufe stellt die Kombination aus PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken, die anschließende Anreicherung mittels einer Sedimentation und Rückführung der PAK in das Kontaktbecken dar (ursprünglich erforscht unter dem Namen „Ulmer Verfahren“). Bei diesem Verfahren erfolgt die Dosierung der PAK in ein separates, der biologischen Stufe nachgeschaltetes Kontaktbecken mit ca. 30 Minuten Aufenthaltszeit. Durch eine Dosierung von Fällmittel und häufig auch Flockungshilfsmittel agglomeriert die PAK zu Flocken und kann in einem nachgeschalteten Sedimentationsbecken größtenteils abgetrennt und in den Kontaktreaktor rückgeführt werden, sodass es zu einer Anreicherung der PAK in der Adsorptionsstufe (Kontakt- und Sedimentationsbecken) kommt. Hierdurch wird die Aufenthaltszeit der PAK von der des Abwassers entkoppelt, sodass die PAK nahezu vollständig beladen werden kann. Da die Adsorption in einer bereits durch die biologische Stufe gereinigten Abwassermatrix stattfindet, liegen weniger um die Adsorption konkurrierende Substanzen im Abwasser vor. Es steht außerdem eine im Vergleich zu den anderen Verfahrensvarianten besonders lange Kontaktzeit zwischen Abwasser und PAK zur Verfügung. Die benötigte Aktivkohledosis ist hier deshalb mit $\sim 1 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ deutlich geringer als bei anderen PAK-Verfahrensvarianten (DWA-M 285-2, 2021). In der Praxis werden in Nordrhein-Westfalen in dieser Verfahrensvariante Dosierungen zwischen 8 und $15 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{L}$ zum Erreichen der 80%-igen Reduktion eingesetzt.

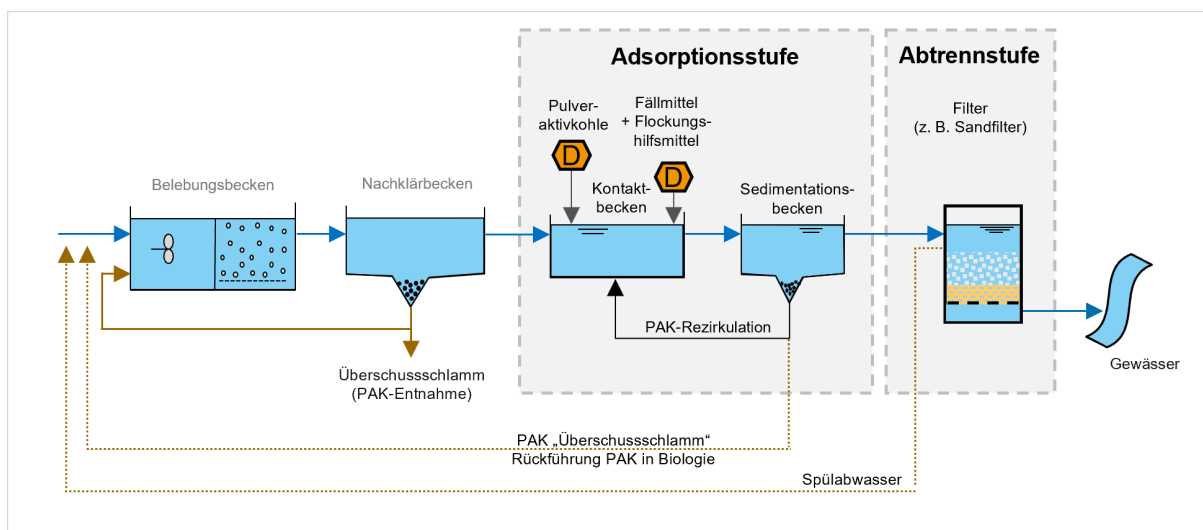


Abbildung 6: Verfahrensschema der PAK-Verfahrensvariante „PAK-Stufe“ mit Dosierung der Aktivkohle in eine separate Adsorptionsstufe; D: Dosierung

Die beladene PAK wird üblicherweise als Überschussschle aus der separaten Adsorptionsstufe entnommen und der biologischen Stufe zugeführt, aus welcher sie als Teil des Überschussschlamms entnommen wird. In der Regel kommen der Adsorptionsstufe nachgeschaltete Filtrationsverfahren zum Einsatz, um einen PAK-Abtrieb aus der Kläranlage zu verhindern. Hierbei können Synergien mit der gezielten Phosphorfällung genutzt werden.

Tabelle 5 : Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK-Stufe“ im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ geringer PAK-Bedarf (~1 mg_{PAK}/mg_{DOC}) (DWA-M 285-2, 2021)	– sehr großer Flächenbedarf (Kontaktbecken, Sedimentationsbecken, Filtrationsstufe) – hohe Investitionskosten

Diese Verfahrensvariante findet in Nordrhein-Westfalen Umsetzung auf den Kläranlagen (Datenstand: Betreiberbefragung Frühjahr 2025):

- Dülmen (Lippeverband, im Regelbetrieb)
- Lengerich (Stadtentwässerung Lengerich, im Bau)
- Steinhagen (Gemeinde Steinhagen, im Bau)

2.3.2 PAK-Dosierung in Kontaktbecken vor einem Filter (PAK vor Filter)

Bei der Verfahrensvariante „PAK vor Filter“ erfolgt die Dosierung der PAK entweder in ein den Filtern vorgeschaltetes Misch- und Kontaktbecken oder direkt in eine Zulaufleitung zur Filtration. Die Art des verwendeten Filters kann variieren. Häufig kommen bestehende Raumfilter zum Einsatz oder bei einem Neubau immer häufiger auch Tuchfilter. Bestandsraumfilter können hierbei gut genutzt werden, es sind jedoch die Betriebsparameter zu prüfen und an die neue Nutzungsart anzupassen. Zusätzliche Fällung/Flockung kann notwendig werden, um die PAK effizient abzutrennen und einen sicheren PAK-Rückhalt zu gewährleisten. Hierbei können Synergien mit der gezielten Phosphorfällung genutzt werden (DWA-M 285-2, 2021).

Für eine ausreichende Mikroschadstoffreduktion ist eine Kontaktzeit zwischen PAK und Abwasser von 20-30 Minuten erforderlich. Auch Kontaktvolumen in Zulaufgerinnen sowie der Filterüberstau bei abwärtsdurchströmten Filtern können zur Erhöhung der Kontaktzeit genutzt werden. Um einen Durchbruch der PAK durch Raumfilter zu vermeiden, sollten Filtergeschwindigkeiten von 15 m/h nicht überschritten werden (DWA-M 285-2, 2021). Im Rahmen der Planung ist zum einen der Bemessung des Filters (Teilstrom bzw. Vollstrom) hinsichtlich der Oberflächenbeschickung, der Raumbelastung und der sinnvollen PAK-Dosierstrategie besondere Aufmerksamkeit zu widmen und zum anderen auch die Leistungsfähigkeit der bestehenden Nachklärung (Teilstrom bzw. Vollstrom) zu berücksichtigen.

Bei der genannten Kontaktzeit wird die eingesetzte PAK nicht vollständig beladen. Für gewöhnlich wird deshalb die PAK mit dem Filterrückspülwasser der biologischen Reinigungsstufe zugeführt, in welcher die adsorptive Restkapazität der PAK genutzt werden kann. Die Beladungskapazität der Kohle wird daher aufgrund der langen Verweilzeit im System effizient genutzt. Da nur ein Teil der Adsorption in der schwach belasteten Abwassermatrix und ein Teil in der stärker belasteten Hintergrundmatrix der biologischen Stufe stattfindet, ist eine etwas höhere Dosiermenge erforderlich als bei der Verfahrensvariante mit Kontaktbecken und separater Sedimentationsstufe (vgl. Kapitel 2.3.1). Dies spiegelt sich in erforderlichen Dosierkonzentrationen von $\sim 1,5 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ wider. In Nordrhein-Westfalen kommen in dieser Verfahrensvariante Dosierkonzentrationen von 6 bis zu $16 \text{ mg}_{\text{PAK}}/\text{L}$ zum Einsatz (LANUK NRW, 2026, noch unveröffentlicht). Die Entnahme der beladenen PAK erfolgt in dieser Verfahrensvariante mit PAK-Rückführung im Rahmen der Überschussschlammentnahme der biologischen Stufe.

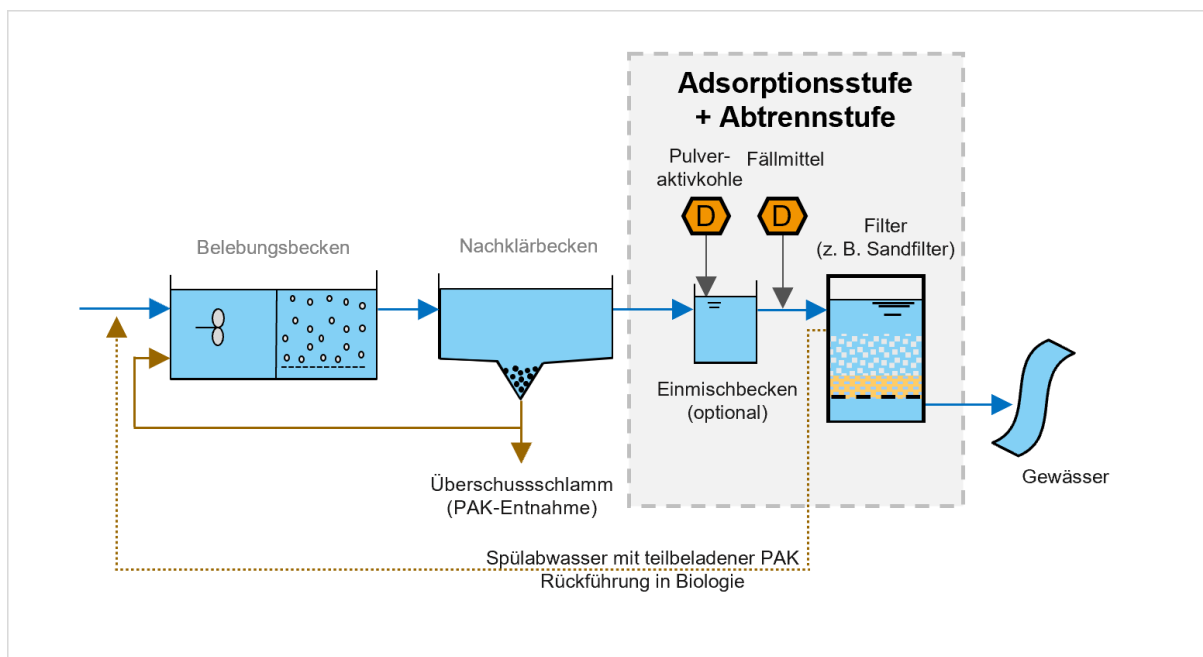


Abbildung 7: Verfahrensschema der PAK-Verfahrensvariante „PAK vor Filter“; D: Dosierung

In Tabelle 6 sind die Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK vor Filter“ im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie dargestellt.

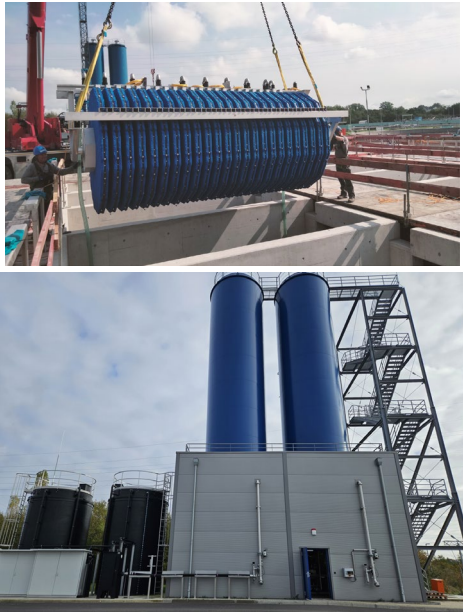
Tabelle 6: Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK vor Filter“ im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ es wird nicht zwangsläufig ein zusätzliches, separates Kontaktbecken benötigt (Einfluss auf Platzbedarf und Investitionskosten)	– erfordert mittlere PAK Dosierkonzentrationen zum Erreichen einer 80 %igen Reduktion der Mikroschadstoffe von bis zu ~1,5 mg_{PAK}/mg_{DOC} (DWA-M 285-2, 2021) – leicht erhöhte Investitionskosten im Falle der Konstruktion zusätzlicher Einmisch- und Kontaktreaktoren

Diese Verfahrensvariante befindet sich derzeit auf folgenden Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen in Betrieb oder im Bau (Datenstand: Betreiberbefragung Frühjahr 2025):

- Brilon (Ruhrverband, im Regelbetrieb)
- Greven-Reckenfeld (Stadt Greven, im Regelbetrieb)
- Barntrup (Stadt Barntrup, im Regelbetrieb)
- Herford (Stadt Herford /Herforder Abwasser GmbH, im Regelbetrieb)
- Dortmund-Deusen (Emschergenossenschaft, Einfahr- und Optimierungsphase)
- Bad Driburg, Herste (Abwasserwerk Stadt Bad Driburg, im Bau)

Tabelle 7: Kläranlage Dortmund-Deusen als Beispiel für die Umsetzung „PAK vor Tuchfilter“ in Nordrhein-Westfalen

Verfahrensbeispiel Kläranlage Dortmund Deusen	
Die Kläranlage Dortmund-Deusen der Emschergenossenschaft ist für 705.000 EW ausgelegt. Im Jahr 2025 wurde hier die Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion im Vollstrom in Betrieb genommen. Dabei wird PAK in ein Kontaktbecken mit nachgeschaltetem Tuchfilter dosiert. Auf eine zusätzliche Sedimentationsstufe wurde verzichtet. Das Kontaktbecken erfüllt zusätzlich die Funktion eines Belüftungsbeckens, um die Anforderungen an den erhöhten Sauerstoffgehalt bei Einleitung des Kläranlagenablaufes in die Emscher einhalten zu können. Ab einer Wassermenge von mehr als 3,4 m³/s wird die PAK-Dosierstelle vom Kontaktbecken in den Ablauf der Biologie umgeschaltet, um den Tuchfilter vor einer zu hohen Feststoffbelastung zu schützen.	
Allgemeine Informationen	
Betreiber:	Emschergenossenschaft
Ausbaugröße:	705.000 EW
Mikroschadstoffreduktion	
Verfahren:	PAK vor Filter
Nachbehandlung:	Tuchfilter
Inbetriebnahme:	2025
Q _{Auslegung, 4.RS} :	18.360 m³/h (Vollstrom)
Komponenten / Bauwerke	
• 1 PAK-Kontaktbecken • 1 Belüftungsbecken • 24 Tuchfilter (4 Straßen je 6 Module) • 2 PAK-Silos • 1 Fällmitteldosierstation • 1 Flockungshilfsmittel-Dosierstation	
 Tuchfiltermodul beim Einbau in das Filterbecken (oben) und PAK-Silo und Fällmittellagerbehälter (unten) auf der Kläranlage Dortmund-Deusen, Emschergenossenschaft (Fotos: Hydro-Ingenieure GmbH)	

2.3.3 PAK-Simultandosierung in die biologische Stufe (PAK in Biologie)

Die einfachste Variante von Pulveraktivkohleverfahren stellt die Dosierung von PAK in die biologische Stufe dar (häufig als „Simultandosierung“ bezeichnet; für die Dosierung in Membranbioreaktor-Verfahren siehe Kapitel 2.3.4). Die PAK wird größtenteils in den Belebtschlamm eingebunden und durch die Abtrennung in der Nachklärung über den Rücklaufschlamm im Prozess angereichert. Die Aufenthaltszeit der PAK im Prozess entspricht hierbei ungefähr dem Schlammalter des Belebtschlammes, sodass von einer weitestgehenden Beladung der PAK vor Entnahme als Anteil am Überschussschlamm auszugehen ist. Aufgrund der hochkonzentrierten Hintergrundmatrix kommt es zu einer gesteigerten Konkurrenzadsorption, sodass in dieser Verfahrensvariante höhere PAK-Dosierungen von bis zu 2,5 mg_{PAK}/mg_{DOC} benötigt werden. Dosierungen von 15 bis 20 mg_{PAK}/L sind für diese Verfahrensvariante üblich.

Nach heutigem Kenntnisstand wird zur gesicherten Abtrennung der PAK aus dem Abwasser im Ablauf der Nachklärung eine Filtration benötigt.

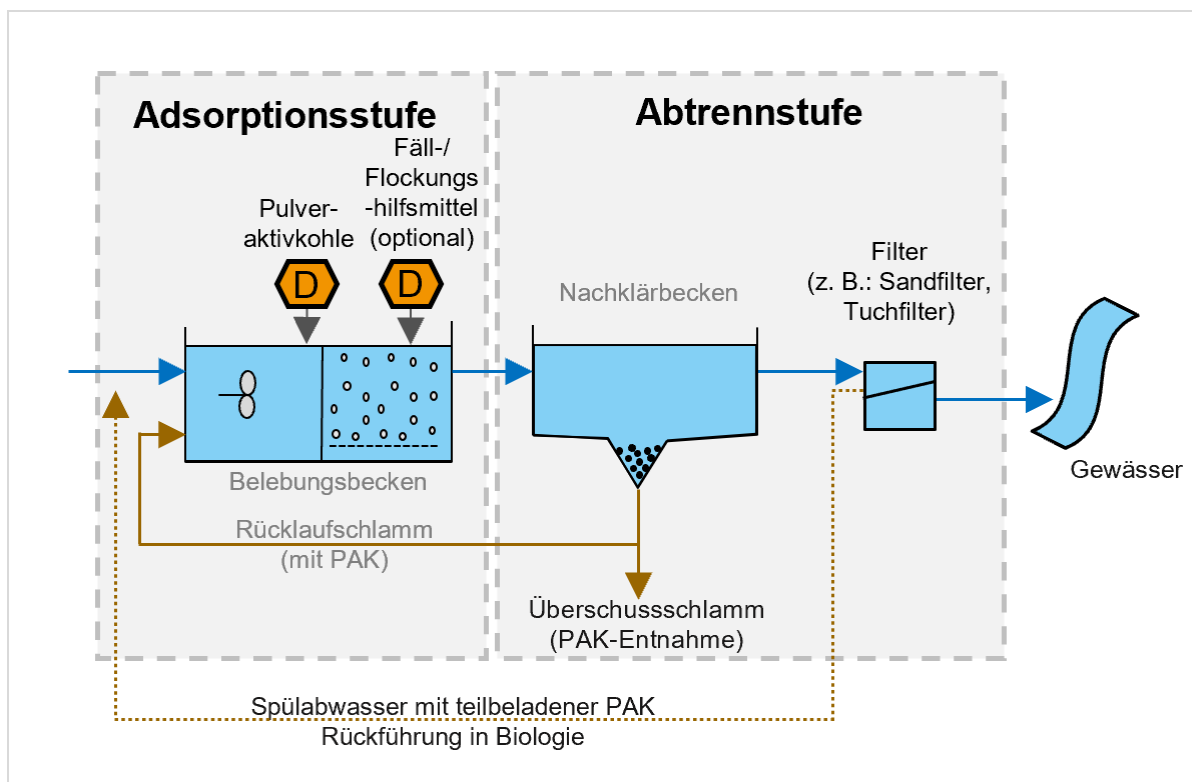


Abbildung 8: Verfahrensschema der Verfahrensvariante „PAK-Simultandosierung in die biologische Stufe“; D: Dosierung

In Tabelle 8 sind die Vor- und Nachteile dieser Verfahrensvariante aufgeführt.

Tabelle 8 : Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK in Biologie“ im Vergleich zu anderen Verfahrensvarianten derselben Technologie (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ keine zusätzlichen Kontakt-/Sedimentationsbecken erforderlich (geringer Platzbedarf, weniger Anlagentechnik und Energiebedarf, geringere Investitionskosten) + PAK-Einbindung in den Belebtschlamm führt zu Prozessstabilisierung und verbesserten Schlammeigenschaften	– erfordert hohe PAK-Dosierungen zum Erreichen einer 80 %igen Reduktion der Mikroschadstoffe von bis zu 2,5 mg_{PAK}/mg_{DOC} (DWA-M 285-2, 2021) – ggf. verringerte Adsorptionsleistung bei Regenwetter (verkürzte Aufenthaltszeiten der PAK durch hydraulischen Stoß)

Diese Verfahrensvariante findet in Nordrhein-Westfalen derzeit noch keine großtechnische Umsetzung, wird jedoch in vereinzelten Fällen als Übergangslösung angewandt. Im Falle der Notwendigkeit einer nachgeschalteten Filterstufe wird i. d. R. die Option „Dosierung vor einen Filter mit PAK-Rückführung“ bevorzugt, da diese zu geringeren benötigten PAK-Dosen führt. Gegebenenfalls haben auf die Art der Umsetzung jedoch auch weitere ökonomische Faktoren einen Einfluss (LANUK NRW, 2026, noch unveröffentlicht).

2.3.4 PAK-Simultandosierung in einen Membranbioreaktor (PAK in MBR)

Bei der Simultandosierung in Membranbioreaktoren (MBR) wird die PAK ebenfalls direkt in die biologische Stufe dosiert. Die PAK wird zusammen mit dem Belebtschlamm durch die Membran im MBR zurückgehalten und somit angereichert. Es kommen hierzu Ultrafiltrationsmembranen zum Einsatz, welche in der Regel eine Porengröße im Bereich von 0,02 bis 0,1 µm besitzen. Diese ermöglichen einen vollständigen Rückhalt partikulärer Stoffe. Mikroschadstoffe hingegen werden adsorptiv an die Aktivkohle gebunden und durch den Rückhalt der Aktivkohle und den Abzug über den Überschussschlamm abgetrennt. Am Markt verfügbare Membranprodukte unterscheiden sich stark in ihren Porengrößen, sodass bei der Auswahl auf die jeweiligen Produktkennzahlen geachtet werden muss. Eine Beständigkeit der Membran beim Einsatz von PAK sollte vom Hersteller geprüft worden sein.

Die PAK-Entnahme erfolgt bei dieser Verfahrensvariante ebenfalls über den Überschussschlamm. Aufgrund der sehr guten Abscheideleistung der Membran ist keine weitergehende Nachbehandlung erforderlich. Das Verfahren ist somit besonders platzsparend umsetzbar.

Durch den vollständigen Feststoffrückhalt können in MBR höhere Belebtschlammkonzentrationen im Bereich von 7 - 8 g/L oder mehr und dadurch höhere Schlammalter von 15 bis zu 60 Tagen als in konventionellen Belebtschlammverfahren erreicht werden (Judd, 2010). Dies führt bereits ohne die Zugabe von PAK im Vergleich zu konventionellen Belebtschlammverfahren zu einer leicht verbesserten Abbauleistung der Mikroschadstoffe (Bastian, 2023). Wie bei den unter 0 beschriebenen Verfahren mit Simultandosierung ist auch in dieser Verfahrensvariante die Hintergrundmatrix hochkonzentriert und deshalb ein erhöhter PAK-Bedarf von ca. 15 bis 20 mg/L zu erwarten.

Detaillierte Hinweise zu der Auslegung und Umsetzung der Simultandosierung in MBR liefern u. a. das Merkblatt DWA-M 227 (2014) zu MBR-Verfahren sowie für den Einsatz von PAK in MBR die Ergebnisse großtechnischer Pilotierungen u. a. in Bastian et al. (2021) oder Bastian (2023).

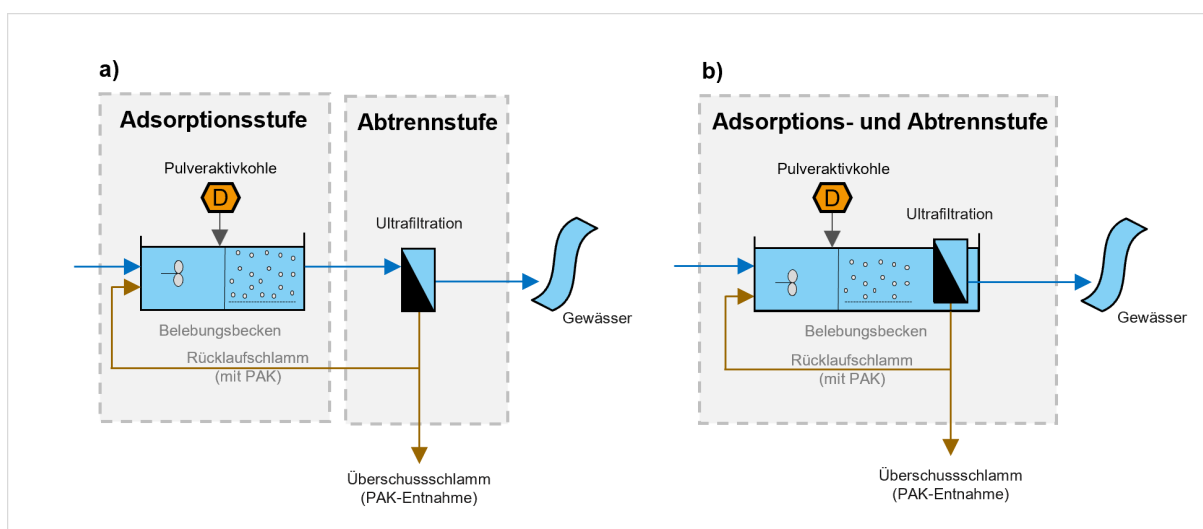


Abbildung 9: Verfahrensschema der Verfahrensvariante „PAK in MBR“ a) separater Membrantank, b) integrierte getauchte Membran im Belebungsbecken; D: Dosierung

In Tabelle 9 sind die Vor- und Nachteile der Verfahren aufgeführt.

Tabelle 9: Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK in MBR“ im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ äußerst geringer Platzbedarf, keine zusätzlichen Kontaktbecken oder Filtrationsstufen notwendig + PAK-Einbindung in den Belebtschlamm m führt zu Prozessstabilisierung und verbesserten Schlammeigenschaften (z. B. Entwässerbarkeit) + Membranfiltration mit Synergieeffekten für weitergehende Qualitätsziele (z. B. Badegewässerqualität oder Wasserwiederverwendung)	– bei Neubau erhöhte Investitionskosten für MBR – exakte Dosierkonzentration zum Erreichen einer 80 %igen Reduktion noch nicht häufig genug untersucht, um einen zuverlässigen Prognosewert zu nennen. Deshalb sollte zunächst vom „worst case“ der Simultandosierung von 2,5 mg_{PAC}/mg_{DOC}, ausgegangen werden. – Ggf. Einflüsse von durch Regenwetter erhöhter hydraulischer Last bzw. im Regenwetterfall ggf. nur Teilstrombehandlung notwendig

Diese Verfahrensvariante findet in Nordrhein-Westfalen beispielsweise Umsetzung auf den Kläranlagen (Datenstand: Betreiberbefragung Frühjahr 2025):

- Kaarst-Nordkanal (Erftverband, im Bau)
- Flerzheim (Erftverband, im Bau)
- Leverkusen (Wupperverband, in Planung)
- Oelde (Stadt Oelde, in Planung)

Tabelle 10: Kläranlage Kaarst-Nordkanal als Beispiel für die Umsetzung „PAK in MBR“ in Nordrhein-Westfalen

Verfahrensbeispiel Kläranlage Kaarst-Nordkanal	
Die MBR-Kläranlage Kaarst-Nordkanal (80.000 EW) wird im Jahr 2026 um eine PAK-Dosierung erweitert. Vorausgegangen waren langjährige großtechnische Pilotversuche an einer der vorhandenen Straßen der Biologie. Die PAK-Dosierung erfolgt direkt in die Biologie, wobei die PAK über die vorhandene Membrantrennstufe zurückgehalten wird. Neben einer kontinuierlichen PAK-Dosierung wurde auch eine diskontinuierliche Zugabe untersucht.	
Allgemeine Informationen	
Betreiber:	Erftverband
Ausbaugröße:	80.000 EW
Mikroschadstoffreduktion	
Verfahren:	PAK in MBR
Nachbehandlung:	Abtrennung PAK durch Ultrafiltration (MBR)
Inbetriebnahme:	2026 (bezogen auf PAK-Dosierung)
Q _{Auslegung, 4.RS} :	1.881 m³/h (Vollstrom)
Komponenten / Bauwerke	
• 1 PAK-Silo mit Dosiereinheit • Membrantrennstufe (Bestand)	



Errichtung PAK-Silo auf der Kläranlage Kaarst-Nordkanal, Erftverband (Foto: Erftverband)

2.3.5 Aktuelle Forschung und Entwicklung zu PAK-Verfahren

Im Fokus der Forschung und Entwicklung von PAK-Verfahren steht unter anderem die Herstellung von Aktivkohlen auf Basis von biogenen Rohstoffen (z. B. Kokosnussschalen) oder „Abfallprodukten“ (bspw. Grünschnitt, Feinsiebgut von Kläranlagen). Des Weiteren gibt es einige Projekte zur Nutzung von Synergien zwischen PAK-Dosierung und Ultrafiltrationen als Nachbehandlungsstufe oder in einem MBR. Eine Auflistung der aktuellen Projekte und Entwicklungen zu PAK-Verfahren kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 11: Überblick über neue Entwicklungen und aktuelle Projekte zum Einsatz von PAK zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen

Kategorie	Bezeichnung	Quellen (und weiterführende Direktlinks in der Fußnote)	Bemerkung
neue Adsorptionsmaterialien	<i>ZeroTrace</i>	Gehrke et al., 2021 ¹	z. B. Komposit-Aktivkohlen
	<i>RIAS</i>	Rias, 2024 ²	Ressourcenschonende und integrierte Aktivkohleherstellung auf Kläranlagen
	<i>CirCles</i>	Uni Kassel, 2026 ³	Circular Economy urbaner Kohlenstoffflüsse durch innovative Verwertungspfade von Bioabfällen
PAK Rückhalt	<i>hydrograv adapt-PAK</i>	DBU, 2025 ⁴	adaptives Einlaufbauwerk Nachklärbecken Projekt „Schwarzes Gold“ Kläranlage Bad Berleburg
PAK + Membran (Ultrafiltration)	<i>PAK+UF 4.0</i>	Panglisch et al., 2021 ⁵	PAK und Ultrafiltration in verschiedenen Konstellationen
	<i>PAK MBR</i>	u. a. Bastian, 2023 ⁶	
	<i>FlexTreat</i>	FlexTreat, 2025 ⁷	

2.4 Adsorptionsverfahren mit granulierter Aktivkohle

Bei Verfahren zur Adsorption von Mikroschadstoffen an granulいた Aktivkohle (GAK) gelten grundsätzlich die gleichen Wirkmechanismen wie bei der Adsorption an PAK (siehe Kapitel 2.3). Der Unterschied besteht in der Größe der Aktivkohlekörner, welche einen Durchmesser von 0,6 bis 2,4 mm haben (DWA-M 285-2, 2021).

¹ <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/zerotrace.html>

² <https://projekt-rias.de/>

³ <https://www.uni-kassel.de/fb14bau/institute/institut-fuer-wasser-abfall-umwelt-iwau/siedlungswasserwirtschaft/forschung/circles>

⁴ <https://www.dbu.de/projektdatenbank/38353-01/>

⁵ <https://www.uni-due.de/imperia/md/content/wassertechnik/ufpak40lanuv.pdf>

⁶ <https://publications.rwth-aachen.de/record/959047>

⁷ <https://www.flextreat.rwth-aachen.de/>

GAK-Verfahren

Aufgrund der größeren Körner im Vergleich zur Pulverkohle müssen für eine vollständige Beladung der granulierten Aktivkohle längere Feststoffverweilzeiten ermöglicht werden. Dies geschieht in der Praxis bisher in Form von zwei Verfahrensvarianten: Als Festbettfiltration und in Form von Schwebebettreaktoren. Bei beiden Verfahren muss die granulierten Kohle nach möglichst vollständiger Beladung ausgetauscht werden. Eine Sondervariante bildet die Einbringung von GAK in Retentionsbodenfilter (siehe hierzu Kapitel 2.6.1).

Regenerierbarkeit

Der große Vorteil im Vergleich zu den PAK-Verfahren ist, dass einmal eingesetzte GAK reaktiviert und anschließend erneut eingesetzt werden kann. Bei diesem Reaktivierungsvorgang kommt es zu teilweisen Kohleverlusten, wovon jedoch Anteile als „regenerierte PAK“ genutzt werden können.

Im Vergleich zu anderen Technologien ergeben sich die in Tabelle 12 gelisteten Vor- und Nachteile.

Tabelle 12: Vor- und Nachteile der Technologie "Adsorption an GAK" im Vergleich zu anderen Technologien (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ GAK ist regenerierbar (positiver Einfluss auf CO₂e-Fußabdruck im vgl. zu PAK) + Adsorbens ist fixiert (keine Nachbehandlung zum Rückhalt der GAK notwendig)	– Weniger flexible Dosisanpassung bzw. im Festbett Redundanz notwendig – Leicht erhöhter Kohlebedarf im Vergleich zu PAK-Verfahren (wegen notwendiger Redundanzen)

In Kapitel 2.4.1 und 0 werden die Verfahrensvarianten Festbettfiltration und GAK im Schwebbett weitergehend beschrieben.

2.4.1 GAK-Festbettfiltration

Bei der Festbettfiltration wird GAK (ähnlich wie bei der Raumfiltration) in einem Filterbett von ca. 1,5 bis 3,0 m Mächtigkeit fixiert. Die Durchströmung kann je nach Umsetzung aufwärts oder abwärts erfolgen; die bauliche Umsetzung kann in einem offenen Betonbecken oder in einem geschlossenen Behälter erfolgen. Geschlossene Filter können im Freispiegelbetrieb oder als Druckkessel betrieben werden. Auch kontinuierlich gespülte Filtersysteme finden in der Praxis Anwendung. Die Auslegung erfolgt nach der notwendigen Kontaktzeit. Diese wird zumeist angegeben als Leerbettkontaktzeit (engl. "Empty Bed Contact Time" (EBCT)) und sollte bei maximalem Durchfluss 20 Minuten nicht unterschreiten. Die maximale Filtergeschwindigkeit ist produktabhängig und liegt zwischen 5 und 9 m/h (DWA-M 285-2, 2021). Bestandsfilter können prinzipiell zu GAK-Filtern umfunktioniert werden, es müssen jedoch zumeist Anpassungen in den Betriebseinstellungen (z. B. Rückspülprogramm, Filtergeschwindigkeiten etc.) vorgenommen werden (DWA-M 285-2, 2021).

Erreicht die GAK eine Beladung, welche so groß ist, dass Mikroschadstoffdurchbrüche absehbar sind, muss die GAK ausgetauscht werden. Dies ist nach ca. der 20.000 bis 30.000-fachen behandelten Abwassermenge im Vergleich zum Volumen des Filterbetts (Bettvolumen, BV) erreicht (VSA Micropoll, Böhler et al. 2023). In Nordrhein-Westfalen werden in der Praxis meist Austauschintervalle von unter 20.000 oder bis über 30.000 BV erreicht. Die exakte Abschätzung der erreichbaren Bettvolumina ist von Auslegungsdetails und der Abwasserzusammensetzung abhängig und muss durch regelmäßige Analytik überwacht werden. Messungen des Spektralen Absorptionskoeffizienten bei 254 nm (SAK_{254}) können potenziell als Frühwarnindikator für Durchbrüche verwendet werden (DWA-M 285-2, 2021).

Da bei GAK-Verfahren keine kurzfristige Anpassung der Dosierung möglich ist, müssen GAK-Anlagen mit ausreichend Redundanz versehen werden. Hierzu wird mindestens eine redundante Filterzelle benötigt. Bei einer ausreichenden Anzahl Filterzellen können betriebliche Optimierungen z. B. durch Reihenschaltung oder wechselnde Beschickung der einzelnen Filterzellen vorgenommen werden. Aufgrund dieses Erfordernisses weisen GAK-Filter in der Praxis häufig höhere Kohlebedarfe von 15 - 25 mg/L auf als andere Aktivkohleverfahren (VSA, 2025b).

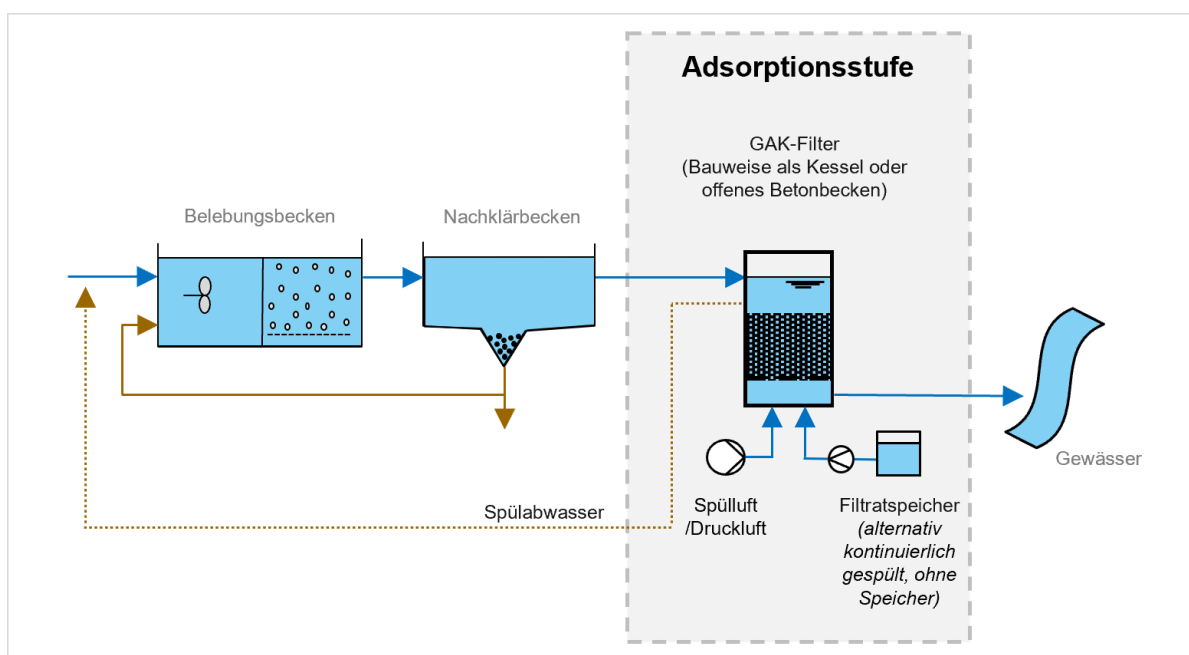


Abbildung 10: Verfahrensschema der Verfahrensvariante „GAK-Festbettfiltration“

Bei hohen Feststoffbelastungen im Zulauf zur GAK-Stufe empfiehlt es sich, die vorausgehenden Behandlungsstufen in Hinblick auf den Feststoffrückhalt zu optimieren oder ggf. eine vorgeschaltete Filtration vorzusehen. Grundsätzlich ist eine Optimierung der Nachklärbecken einer Vorfiltration vorzuziehen. Durch die Optimierung des Feststoffrückhalts kann die Anzahl an erforderlichen Rückspülungen verringert und somit der Betrieb der GAK-Filter optimiert werden (Fundneider, 2020). Für eine Vorbehandlung können Raum- oder Flächenfilter, aber auch Membranfilter eingesetzt werden. In Nordrhein-Westfalen sind fünf GAK-Filtrationsanlagen mit Vorfiltration umgesetzt bzw. im Bau (Stand: Februar 2025). Häufig ist

hierfür eine Nutzung von Bestandsfiltern der Grund, nicht eine zwangsläufig erforderliche Feststoffreduktion.

Optimale Betriebskonzepte, insbesondere auch die Kombination von GAK-Filtern mit der Phosphorfällung, sind noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung.

Wesentliche Vor- und Nachteile der Festbettfilter im Vergleich zu Schwebebettverfahren werden in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante GAK-Filtration im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ kein relevanter Feststoffabtrieb zu erwarten, deshalb keine zusätzliche Nachbehandlung erforderlich + prinzipiell ist die Nutzung von Sandfilterbauwerken durch Austausch des Filtermediums denkbar, jedoch sind ggf. größere Kontaktzeiten als bei der Bemessung von Sandfiltern erforderlich.	– Redundanz (mindestens in der eingesetzten GAK-Menge) notwendig, um Durchbrüche zu vermeiden – i. d. R. nur bei ausreichend guter Zulaufqualität des Abwassers aus der mechanisch-/ biologischen Kläranlage wirtschaftlich einsetzbar

Diese Verfahrensvariante kommt in Nordrhein-Westfalen auf folgenden Kläranlagen zum Einsatz (Datenstand: Betreiberbefragung Frühjahr 2025):

- Ohne Vorbehandlung:
 - Bergheim Glessen (Erftverband, im Regelbetrieb),
 - Gütersloh-Putzhagen (Stadt Gütersloh, im Regelbetrieb),
 - Vlotho (Vlothoer Wirtschaftsbetriebe, im Regelbetrieb),
 - Rietberg (Stadt Rietberg, im Regelbetrieb);
 - Obere Lutter (Abwasserverband Obere Lutter, im Regelbetrieb)
 - Rahden (Schumacher Kläranlagen GmbH, Einfahr- / Optimierungsphase),
- Mit Vorbehandlung (Filtration):
 - Borgholzhausen (Stadt Borgholzhausen, im Regelbetrieb),
 - Harsewinkel (Stadt Harsewinkel, im Regelbetrieb),
 - Bad Oeynhausen (Stadtwerke Bad Oeynhausen AöR, im Regelbetrieb),
 - Münster Hauptkläranlage (Stadt Münster, im Bau),
 - Nette (Niersverband, im Bau)

Tabelle 14: Kläranlage Gütersloh-Putzhagen als Beispiel für die Umsetzung „GAK-Filter“ in Nordrhein-Westfalen

Verfahrensbeispiel Kläranlage Gütersloh Putzhagen	
Auf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen (150.600 EW) wird seit dem Jahr 2022 eine GAK-Filtration im Teilstrom betrieben. Die zwölf GAK-Filter sind in Kesselbauweise in einer Leichtbauhalle aufgestellt und einer vorherigen Sandfiltration nachgeschaltet.	
Allgemeine Informationen	
Betreiber:	Stadt Gütersloh
Ausbaugröße:	150.600 EW
Mikroschadstoffreduktion	
Verfahren:	GAK-Filtration
Vorbehandlung	Blähtonfiltration (Bestand)
Nachbehandlung:	/
Inbetriebnahme:	2022
Q _{Auslegung, 4.RS} :	900 m³/h (Teilstrom)
Komponenten / Bauwerke	
• 1 Zulaufpumpwerk • 12 GAK-Kessel • 1 Filtratspeicher • 1 Spülabwasserspeicher	



Bau der GAK-Kesselhalle auf der Kläranlage Gütersloh Putzhagen, Stadt Gütersloh (Foto: Hydro-Ingenieure GmbH)

2.4.2 GAK im Schwebebett

Als Alternative zu Verfahren mit einer GAK-Festbettfiltration besteht die Möglichkeit, die GAK in suspendierter Form in Schwebebettreaktoren mit dem Abwasser in Kontakt zu bringen. Diese Verfahrensvariante ermöglicht eine quasi-kontinuierliche Entnahme beladener und Dosierung frischer GAK in den Prozess und reduziert somit notwendige separate Redundanzen. Gleichzeitig sind ausreichend große Kontaktbecken erforderlich, da für eine vollständige Beladung der GAK-Feststoffaufenthaltszeiten von ca. 80 bis 100 Tagen angesetzt werden. Diese Verfahrensvariante weist einen Aktivkohlebedarf von ca. 2 mg_{GAK}/mg_{DOC} auf (VSA, 2022). Dem Prozess kontinuierlich entnommene GAK kann batchweise regeneriert und wiederverwendet werden. Im Gegensatz zu GAK-Festbettfiltern erlaubt dieses Verfahren prinzipiell eine kurzfristige Dosieranpassung durch die Variation der zugegebenen GAK-Menge oder eine Anpassung des Zugabeintervalls. Konkrete Auslegungsgrößen sind derzeit noch nicht im deutschen technischen Regelwerk aufgeführt; es gibt jedoch erste großtechnische Referenzanlagen in der Schweiz, welche Hinweise auf mögliche Auslegungsgrößen liefern (VSA, 2025a).

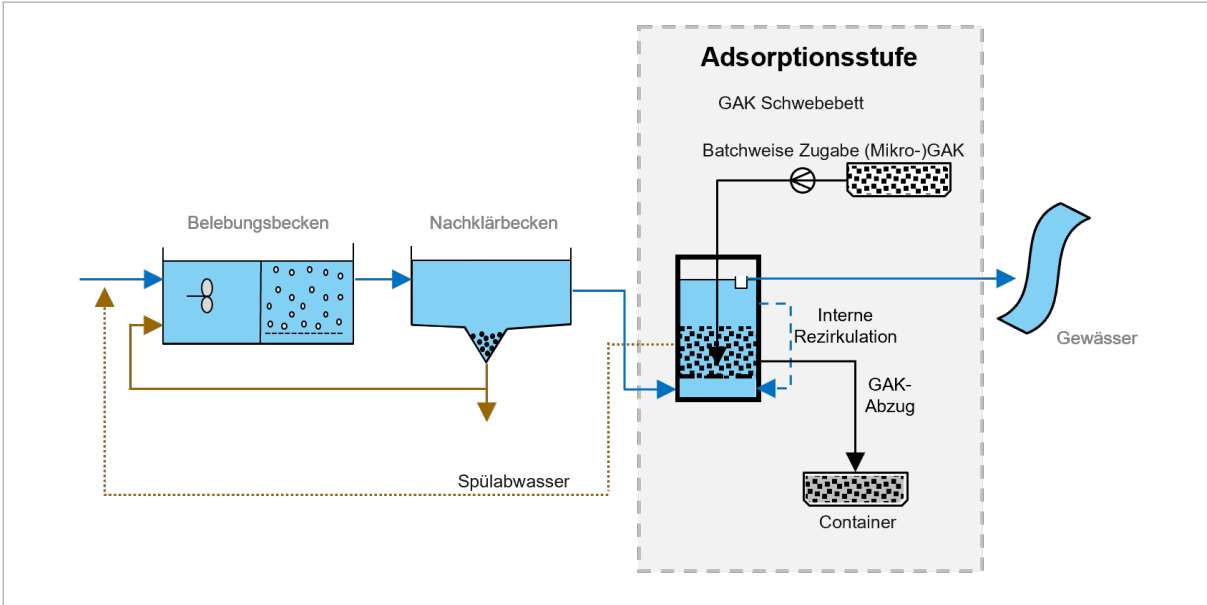


Abbildung 11: Verfahrensschema der Verfahrensvariante GAK im Schwebebett

Im Vergleich zu den GAK-Festbettfiltrationsverfahren bieten GAK-Schwebebettverfahren die in Tabelle 15 gelisteten Vor- und Nachteile.

Tabelle 15: Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante "GAK im Schwebebett" im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ Aktivkohle-Dosis von 2 mg_{GAK}/mg_{DOC} + keine so große Redundanz erforderlich wie bei GAK-Festbettfiltration	– kein Feststoffrückhalt bzw. Filterwirkung – keine Synergien zur Phosphorelimination – bisher kein Nachweis zum biologischen Abbau im Filter, daher bisher nicht für Kombinationsverfahren als Nachbehandlung nach Ozonstufe geeignet

Die Verfahrensvariante GAK im Schwebebett kommt in Nordrhein-Westfalen bisher nicht zum Einsatz; es ist jedoch auf Referenzanlagen in der Schweiz (Stand Ende 2025: sechs Anlagen Mit GAK im Schwebebett in Betrieb und neun in Planung/Bau und eine in Pilotierung) zu verweisen (VSA, 2025).

2.4.3 Aktuelle Forschung und Entwicklung zu GAK-Verfahren

GAK kommt neben den beschriebenen Anwendungen auch immer häufiger bei Kombinationsverfahren zum Einsatz (vgl. Kapitel 2.5) oder wird als Additiv bei naturnahen Verfahren verwendet (vgl. Kapitel 2.6). Daneben gibt es Synergien bei der Kombination mit einer Membranfiltration, da der partikelfreie Ablauf einer Ultrafiltration die Funktion der GAK auf einen reinen Adsorber beschränkt und so die Standzeit vergrößert. Nach den bisherigen Untersuchungen von Hillebrandt et al. (2024) oder Baresel et al. (2024) sind je nach betrachteten Substanzen durch die Kombination mit Membranfiltration deutlich mehr behandelbare Bettvolumina erreichbar (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Überblick über neue Entwicklungen und aktuelle Projekte zum Einsatz von GAK zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen

Kategorie	Bezeichnung	Quellen (und weiterführende Direktlinks in der Fußnote)	Bemerkung
Vorfiltration mit Membran / UF	MBR + GAK	Hillebrandt et al, 2024 ¹	Kläranlage Nette (Niersverband) bis zu 70.000 BV
		Baresel et al., 2024 ²	Kläranlage Himmerfjördsverket, Schweden bis zu 56.000 BV
GAK-Materialien	Siehe Kapitel Weiterentwicklung PAK-Verfahren (Kapitel 2.3.5)		
Kombination mit Ozon	Siehe Kapitel Kombinationsverfahren (Kapitel 2.5)		
Nutzung als Additiv bei naturnahen Verfahren	Siehe Kapitel zu naturnahen Verfahren (Kapitel 2.6)		

2.5 Kombinationsverfahren

Kombinationsverfahren aus verschiedenen Technologien zur Mikroschadstoffreduktion finden bereits jetzt Anwendung in der Praxis. Insbesondere die Kombination von oxidativen und adsorptiven Technologien birgt ein verbessertes Reduktionspotenzial für eine größere Bandbreite an Mikroschadstoffen, da hier verschiedene Wirkmechanismen miteinander kombiniert werden. Dies bedeutet auch, dass die einzelnen Verfahrensstufen eines Kombinationsverfahrens ggf. mit geringeren Betriebsmitteleinsätzen betrieben werden können als in den Kapiteln oberhalb beschrieben wurde, so lange in Summe die geforderte Reduktion erreicht wird. Solche Verfahrenskombinationen kommen bisher eher selten zum Einsatz, weshalb hier noch keine allgemeingültigen Auslegungsgrößen oder mögliche Dosisreduktionen genannt werden können. Zunächst werden solche Kombinationsverfahren aufgrund eines deutlich höheren Betriebsaufwandes und einer größeren Komplexität eher für größere Kläranlagen empfohlen (VSA, 2026).

2.5.1 Kombinationsverfahren Ozon und GAK

Das wohl bekannteste bisher angewandte Kombinationsverfahren ist die Kombination aus oxidativem und adsorptivem Verfahren in Form von Ozonung mit nachgeschalteter GAK-Festbettfiltration. Ein beispielhaftes Verfahrensschema für diese Verfahrenskombination ist in Abbildung 12 dargestellt.

¹ <https://projekte.niersverband.de/umbau-der-kläranlage-nette#c1247>

² <https://doi.org/10.3390/app14177759>

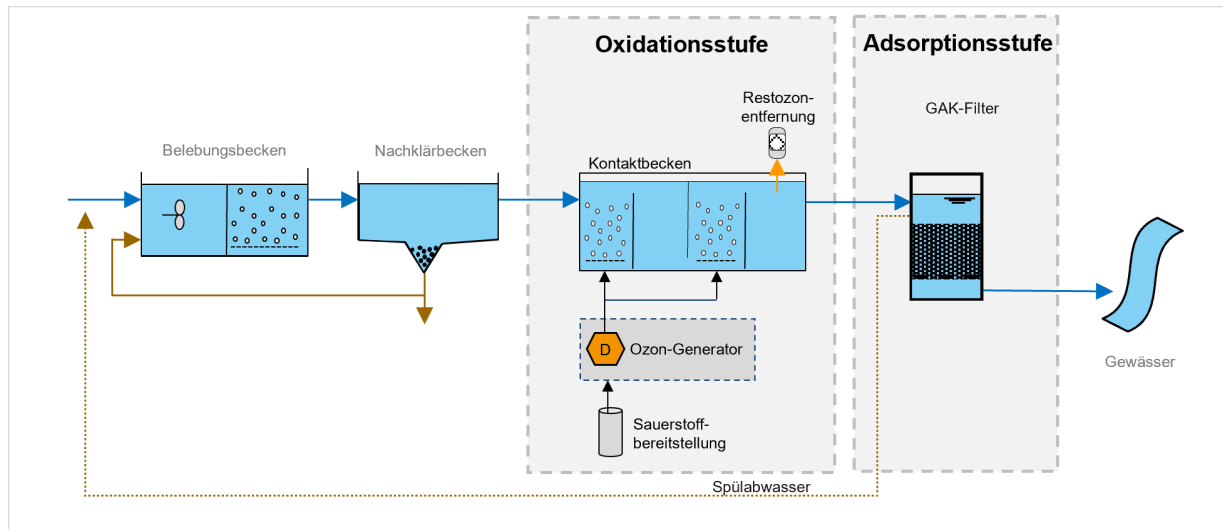


Abbildung 12: Verfahrensschema eines beispielhaft ausgewählten Kombinationsverfahrens aus Ozonung und GAK-Filtration; D: Dosierung

Durch die Kombination aus Oxidation und Adsorption wird ein breites Stoffspektrum reduziert. Dabei können die Betriebsmittel jeweils auf ein für den Wirkmechanismus optimalen Wert bzw. „Betriebspunkt“ vermindert werden, da die Oxidationsstufe nur die gut oxidierbaren Substanzen und die Adsorptionsstufe nur die gut adsorbierbaren Stoffe reduzieren muss. Insgesamt kann hierdurch eine Verringerung der Betriebskosten erreicht werden. Auf der Kläranlage Altenrhein (Schweiz) konnte beispielsweise nach fünf Jahren Betrieb noch eine 80 %ige Reduktion mit nur $0,1 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ bei einer Standzeit des GAK-Filters von etwa 63.000 BV erzielt werden (Thalmann & Egli, 2025, Alt 2018). Gegenüber den Betriebsmitteleinsätzen der Einzelverfahren ($\geq 0,3 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ und $\leq 20.000 \text{ BV}$) ist bei der Kombination damit unter Umständen jeweils etwa nur etwa ein Drittel der Betriebsmittel erforderlich, so dass auch bei Kombination beider Verfahren insgesamt eine Einsparung erzielt wird.

Ein weiterer Vorteil ist die Flexibilität beim Einsatz der Betriebsmittel. Je nach Situation (Marktpreis oder Verfügbarkeit) ist eine Anpassung der Betriebsführung und der einzusetzenden Dosiermengen möglich. Auch kann in bromidhaltigen Abwässern, in denen aufgrund des Risikos erhöhter Bromatbildung keine Mikroschadstoffreduktion in Form einer alleinstehenden Ozonung umsetzbar ist, ggf. ein Kombinationsverfahren zum Einsatz kommen, bei dem die Ozonosis aufgrund der Kombination mit einem anderen Wirkmechanismus geringer ausfallen kann.

Die genannten Vorteile sind jedoch mit einer höheren Komplexität und höheren Investitionskosten verbunden (Tabelle 17). Ob der Anstieg der Investitionskosten höher ist als die reduzierten Betriebskosten, hängt u. a. von den Randbedingungen wie z. B. umnutzbarer Bausubstanz ab (siehe auch Kapitel 3.2).

Tabelle 17: Vor- und Nachteile von Kombinationsverfahren mit Ozon und GAK gegenüber Verfahren mit einzelnen Wirkmechanismen (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ breitere Reduktionswirkung bei Kombination verschiedener Wirkmechanismen + erlaubt ggf. einen geringer konzentrierten Einsatz von Ozon bei bromidbelasteten Wässern + erlaubt ggf. geringere Ozondosen bei Ozonanlagen in Verbindung mit verlängerten Standzeiten von GAK-Filtern	– komplexes System (Instandhaltungsaufwand und Steuerung) – Aufstellfläche größer als beim Einsatz einer einzelnen Technologie – erhöhter Betriebsaufwand – erhöhter Investitionsbedarf

Diese Verfahrenskombination kommt in Nordrhein-Westfalen auf folgender Kläranlage zum Einsatz (Datenstand: Betreiberbefragung Frühjahr 2025):

- Kläranlage Schwarzbach (Stadt Werther, im Regelbetrieb)

2.5.2 Aktuelle Forschung und Entwicklung zu Kombinationsverfahren

Die Wirkmechanismen bzw. Technologien der Adsorption und Oxidation können auch mit anderen Verfahrensansätzen kombiniert werden. Die Ozonbehandlung wird beispielsweise auf der Kläranlage Moerfelden (Hessen) nicht mit GAK-Filtration, sondern mit einer PAK-Adsorptionsstufe kombiniert. Vorteil ist hierbei, dass durch die Abtrennstufe und Fällmitteldosierung zum PAK-Rückhalt (hier Tuchfiltration) eine Synergie zur Phosphorelimination besteht. Zudem ist die PAK-Dosierung noch flexibler einstellbar, so dass diese Kombination zwei sehr bedeutsame Stellschrauben für eine Optimierung bietet.

Eine weitere Entwicklung aus den Niederlanden ist das „BACF-Ozone“-Verfahren (engl. Biological Activated Carbon Filtration). Eine Kombination aus GAK gefolgt von Ozon, bei der die Adsorptionsstufe durch den gleichzeitigen biologischen Abbau von DOC deutlich bessere Bedingungen für die anschließende Ozonstufe schafft. Gleichzeitig wird in diesem Verfahren Sauerstoff aus der Restozonentfernung in den GAK-Filter rückgeführt. Dies begünstigt die biologische Aktivierung des GAK-Filters, ähnlich wie bei der Nachbehandlung von ozoniertem Abwasser durch biologische Aktivkohlefilter (BAK).

Tabelle 18: Überblick über neue Entwicklungen und aktuelle Projekte zu Kombinationsverfahren zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen

Kategorie	Bezeichnung	Quellen (und weiterführende Direktlinks in der Fußnote)	Bemerkung
GAK + Ozon	<i>Aurea® Technology "BACF Ozone"</i>	STOWA, 2023a ¹	GAK vor Ozon, mit O ₂ -Rückführung wird GAK biologisch aktiviert und entfernt DOC, dadurch weniger Ozon notwendig
Ozon + PAK	<i>Ozon + PAK + Tuchfilter</i>	Stadt Mörfelden-Walldorf, 2025 ²	Kombination Ozonreaktor und PAK-Dosierung vor Tuchfilter
Ozon + P-Elimination	<i>O-STEP</i>	Morgenschweis, 2025 ³	Kombination von Ozonung und denitrifizierende Aktivkohlefiltration mit Phosphor-Nachfällung

2.6 Naturnahe Verfahren

Naturnahe Verfahren sind technische Systeme, welche natürlichen Systemen nachgeahmt sind. Hierzu gehören beispielsweise Retentionsbodenfilter (RBF). Sie ermöglichen aufgrund von längeren Aufenthaltszeiten des Abwassers bzw. der im Filter zurückgehaltenen Abwasserinhaltsstoffen deren verbesserten biologischen Abbau im Vergleich zu konventionellen Belebtschlammverfahren. Diese längeren Aufenthaltszeiten werden durch geringe Beschickungsmengen je Flächeneinheit hervorgerufen. Deswegen sind naturnahe Verfahren häufig flächenintensiv. Gleichzeitig können sie, wenn korrekt betrieben, zu einer sehr guten Wasserqualität führen. Auch einige Mikroschadstoffe, welche im Kontext der konventionellen biologischen Reinigungsverfahren als persistent beschrieben werden, können in naturnahen Verfahren reduziert werden (FlexTreat, 2024).

Um auch biologisch persistente Stoffe reduzieren zu können, können klassische naturnahe Verfahren mit anderen Technologien zur Mikroschadstoffreduktion kombiniert werden. Am bekanntesten ist die Kombination eines RBF mit granulierten Aktivkohleadditiven, die im Folgenden weitergehend beschrieben wird. Auch der kombinierte Einsatz von naturnahen Verfahren mit anderen Adsorbentien oder Technologien/Wirkmechanismen ist denkbar.

Aufgrund des geringen Betriebsaufwandes für solche Verfahren werden diese immer häufiger als Lösung für kleine Kläranlagen mitbetrachtet.

2.6.1 Retentionsbodenfilter mit Aktivkohleadditiven

In Nordrhein-Westfalen wurde ein RBF mit eingebrachter granulierter Aktivkohle unter der Bezeichnung RBF^{plus} auf der Kläranlage Rheinbach (Erftverband) erstmalig großtechnisch umgesetzt und befindet sich seit mehreren Jahren im Regelbetrieb (siehe Praxisbeispiel Tabelle 20). In diesem Filter werden drei verschieden befüllte Segmente (zwei davon mit GAK-Anteilen; siehe Brunsch et al., 2020) zu Forschungszwecken miteinander verglichen. Der

¹ <https://www.haskoning.com/en/services/aurea>

² <https://www.moerfelden-walldorf.de/de/rathaus/gesellschaften/stadtwerke/klaeranlage>

³ https://www.stowa.nl/sites/default/files/2023-11/Poster_Aquatech_Waternet_O3STEP.pdf

Einbau der granulierten Aktivkohle erfolgte durch Einbringung in die Filterschichten während des Befüllens des RBF.

Das beschriebene Verfahren kann im Trockenwetterfall als Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion genutzt werden. Im Regenwetterfall steht der RBF^{plus} zur Pufferung und Mischwasserabschlagsbehandlung zur Verfügung. Eine solche Doppelnutzung bietet in Hinblick auf den Gewässerschutz ein sehr großes Synergiepotential in Bezug auf die Frachtreduktion von Abwasserinhaltsstoffen.

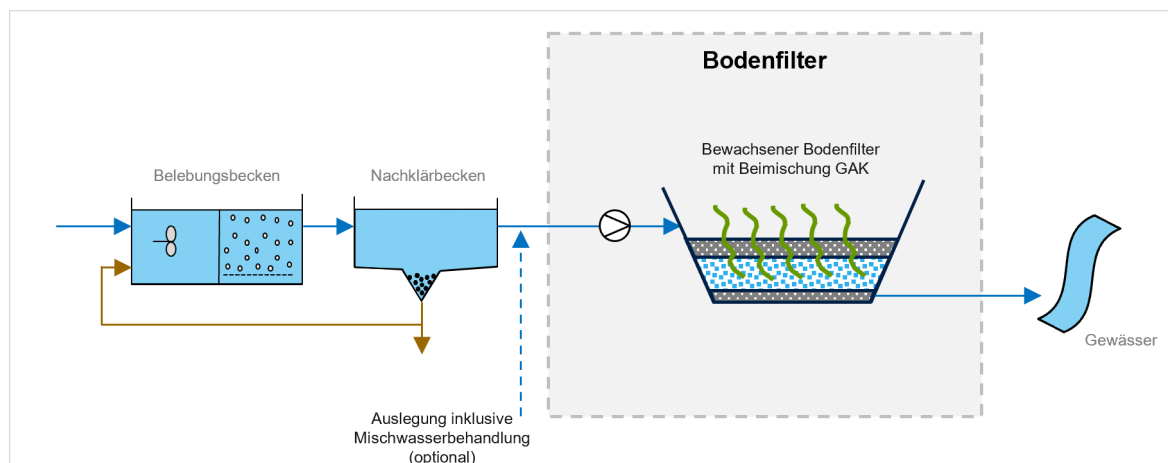


Abbildung 13: Verfahrensschema eines Retentionsbodenfilters mit Adsorptionsadditiven als Variante einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion

Ergebnisse von Untersuchungen aus dem Jahr 2023 – nach vier Jahren Betrieb des RBF^{plus} – deuten auf eine über 80 %ige Reduktion der EU-KARL Indikatorsubstanzen in dem im Segment mit der höchsten GAK-Beimischung behandelten Abwasser hin (FlexTreat, 2024). Die Standzeit bis zur Notwendigkeit eines Wechsels des Filtermaterials bzw. des dort enthaltenen Adsorptionsadditives kann bisher noch nicht abgeschätzt werden. Ob auch bei Regenwetter eine ausreichende Mikroschadstoffreduktion gewährleistet ist, ist bisher nicht bekannt. Eine solche Doppelnutzung bietet in Hinblick auf den Gewässerschutz ein sehr großes Synergiepotential in Bezug auf die Frachtreduktion von Abwasserinhaltsstoffen.

Tabelle 19: Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante Retentionsbodenfilter mit Adsorptionsadditiven (nicht abschließend)

Vorteile	Nachteile
+ Geringer Betriebs- und Wartungsaufwand + Synergistischer Einsatz als 4. RS und zur Mischwasserentlastungsbehandlung möglich	– Sehr großer Flächenbedarf – Bisher unbekannte Standzeit der eingebrachten GAK

Diese Verfahrensvariante kommt in Nordrhein-Westfalen zum Einsatz auf folgender Kläranlage (Datenstand: Betreiberbefragung Frühjahr 2025):

- Kläranlage Rheinbach (Erftverband, im Regelbetrieb)

Tabelle 20: Kläranlage Rheinbach als Beispiel für die Umsetzung eines naturnahen Verfahrens mit Additiven in Nordrhein-Westfalen

Verfahrensbeispiel Kläranlage Rheinbach	
Der Erftverband hat sich auf der Kläranlage Rheinbach mit 27.000 EW Ausbaugröße für einen innovativen Weg bei der vierten Reinigungsstufe entschieden. Im Rahmen des Baus eines Retentionsbodenfilters wurde dem Filtermaterial in zwei der drei Kammern GAK beigemischt. Der Retentionsbodenfilter ist seit 2019 in Betrieb und liefert seitdem wichtige Erkenntnisse zur Mischwasserbehandlung sowie zur Mikroschadstoffreduktion bei Trockenwetter.	
Allgemeine Informationen	
Betreiber:	Erftverband
Ausbaugröße:	27.000 EW
Mikroschadstoffreduktion	
Verfahren:	Retentionsbodenfilter mit Aktivkohle als Additiv (RBF ^{plus})
Vorbehandlung	Sandfiltration (Bestand)
Nachbehandlung:	/
Inbetriebnahme:	2019
Q _{Auslegung, 4.RS} :	180 m³/h (Teilstrom)
Komponenten / Bauwerke	
• 1 Retentionsbodenfilter mit 3 Segmenten • GAK-Beimischung	



Retentionsbodenfilter^{plus} auf der Kläranlage Rheinbach des Erftverbands (Foto: Erftverband, Kläranlage Rheinbach)

2.6.2 Aktuelle Forschung und Entwicklung zu naturnahen Verfahren

Die Eignung verschiedener Adsorbentien (z. B. GAK, Zeolithe, etc.) sowie deren optimale Menge und Einbringungsform zur Mikroschadstoffreduktion in naturnahe Verfahren ist noch Gegenstand der Forschung (Tabelle 21).

Tabelle 21: Aktuelle Entwicklungen im Bereich naturnaher Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen

Kategorie	Bezeichnung	Quellen (und weiterführende Direktlinks in der Fußnote)	Bemerkung
Retentionsbodenfilter RBF mit Additiv	<i>FlexTreat</i>	FlexTreat, 2025 ¹	Als Vorbehandlung vor z. B. UV-Desinfektion
	<i>ARA</i>	Ahring et al., 2024 ²	Dezentral z. B. bei Krankenhäusern zur Reduktion antibiotikaresistenter Bakterien
Additive in naturnahen Verfahren	<i>Pavitra Ganga (FH Bochum)</i>	Ofiera et al., 2024 ³	Modifizierte bepflanzte Bodenfilter mit Biokohle, granulierter Aktivkohle (GAK) und natürlichem Zeolith
	<i>SpurO (RPTU)</i>	RPTU, 2025 ⁴	Parallelschaltung von naturnahen (Bodenfilter) und technischen (GAK-Filter) Verfahren
	<i>TUM Projekt</i>	TUM, 2025 ⁵	Kombination aus Biofiltration und Adsorption
Bodenfilter auch ohne Additive	<i>Naturnahe Verfahren zur Nachbehandlung nach Ozonung</i>	Sauter et al., 2021 ⁶	Nachbehandlung nach Ozonung
	<i>Luxemburg</i>	Venditti et al., 2022 ⁷	Auch ohne Additiv getestet oder mit biogener Aktivkohle aus Rohabwasserbestandteilen hergestellt

2.7 Sonstige Verfahren

Neben den etablierten Verfahren zeigen auch weitere Verfahren und Wirkmechanismen ein Potenzial, welches die zukünftige Anwendung in der Praxis erwarten lässt. Zu diesen Verfahren gehören insbesondere die nachfolgend genannten (Aufzählung nicht abschließend).

¹ [FlexTreat - Flexible und zuverlässige Konzepte für eine nachhaltige Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft | RWTH Aachen University | DE](#)

² <https://www.erftverband.de/veroeffentlichung-des-abschlussberichtes-zum-forschungsprojekt-ara/>

³ <https://pavitra-ganga.eu/en>

⁴ <https://bauing.rptu.de/ags/wir/forschung-projekte/projekte-detailansicht/news/spuro>

⁵ <https://www.cee.ed.tum.de/sww/forschung/weitergehende-wasseraufbereitung/elimination-von-spurenstoffen-auf-kleinen-kläranlagen-10000-ew/>

⁶ <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ew/d1ew00312g>

⁷ <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153234>

2.7.1 Erweiterte Oxidationsprozesse

Die erweiterten Oxidationsprozesse („Advanced Oxidation Processes“ (AOP)) bilden eine Alternative zu herkömmlichen Oxidationsverfahren, welche durch eine Bestrahlung mit UV oder durch die Zugabe zusätzlicher Reagenzien zu einem Standardoxidationsmittel (bspw. Ozon oder Wasserstoffperoxid H_2O_2) zu der Erzeugung besonders reaktiver Spezies führen. Das wichtigste oxidierende Radikal, dass bei den meisten AOP gebildet wird, ist das Hydroxyl-Radikal ($\cdot\text{OH}$). Aber auch andere oxidierende Spezies wie Sulfat- oder Chlornradikale kommen teilweise zum Einsatz (Miklos et al., 2018; Hübner et al., 2024). Aufgrund vieler Kombinationsmöglichkeiten gibt es eine große Anzahl an AOP-Verfahren. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind hier u. a. folgende Verfahren zu nennen:

- Bestrahlungsbasierte AOP-Verfahren mit UV
 - Bestrahlung mit UV in Kombination mit Wasserstoffperoxid
 - Bestrahlung mit UV und Zugabe von Titan(IV)-oxid (Titandioxid, TiO_2)
 - Photo-Fenton-Oxidation ($\text{UV} + \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$)
- Ozonbasierte AOP-Verfahren
 - Ozonung in Kombination mit Zugabe von Wasserstoffperoxid
 - Ozonung in Kombination mit Bestrahlung mit UV
 - Ozonung in Kombination mit Ultraschall
- Katalytische AOP-Verfahren
 - Fenton-Reaktion ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$)
- Sonstige AOP-Verfahren
 - Elektrochemische Oxidation
(direkte Oxidation durch Elektronentransfer oder indirekt über OH-Radikale)
 - Plasmabasierte Verfahren

Die AOP-Verfahren können viele persistente und komplexe Mikroschadstoffe reduzieren. Zudem sind die Reaktionsgeschwindigkeiten teilweise sehr schnell. Manche Verfahren können gar vollständig ohne Chemikalienzugabe auskommen oder ermöglichen eine vollständige Mineralisation ohne Transformationsprodukte. Ihre großtechnische Anwendung wird jedoch derzeit durch mehrere Herausforderungen eingeschränkt. So funktioniert der Fenton- oder Photo-Fenton-Prozess beispielsweise vorzugsweise bei pH-Werten unter drei. Daneben fallen auch Kosten für die Reagenzien und für den Stromeinsatz an. Die Bestrahlung mit UV ist zudem sehr sensitiv in Bezug auf die Lichtdurchlässigkeit (Transmission) des Abwassers. Neue Entwicklungen bei den Verfahren, wie beispielsweise optimierte Reaktoren oder neue Oxidationsmittel, führen jedoch zu einer Effizienzsteigerung (Satyam & Patra, 2025).

Aufgrund der genannten Einschränkungen gibt es bisher keinen großtechnischen Einsatz von AOP-Verfahren bei der Behandlung von kommunalem Abwasser. Einzelne Verfahren sind dagegen bereits bei der Trinkwasser-, Sickerwasser- oder Grundwasserbehandlung im Einsatz sowie als Vorbehandlung von industriellem Abwasser zur Verbesserung der Leistung nachgeschalteter Behandlungsschritte.

2.7.2 Membranverfahren

Im Bereich der Membranfiltration wird zwischen porösen und so genannten „dichten“ Membranen unterschieden.

Poröse Membranen (hierzu werden Mikrofiltrationsmembranen und Ultrafiltrationsmembranen gezählt) können in ihrem Funktionsprinzip mit der Oberflächenfiltration (z. B. Tuchfiltration) verglichen werden. Sie besitzen eine definierte Porengröße und halten insbesondere ungelöste Stoffe aufgrund des Größenunterschiedes von Partikel oder Kolloid zu Pore zurück. Ultrafiltrationsmembranen haben üblicherweise – je nach Produkt – Porengrößen im Bereich von 0,01 bis 0,1 µm. Im Rahmen der Betriebsoptimierung hat sich gezeigt, dass diese Arten der Membranfiltration im Ablauf der Nachklärung bereits mit geringen Druckdifferenzen im Bereich 100 bis 500 mbar betreibbar sind (Melin & Rautenbach, 2007). Da hierbei der Partikelrückhalt im Vordergrund steht, sind poröse Membranen jedoch nicht alleinstehend zur Reduktion von Mikroschadstoffen geeignet und müssen mit Technologien mit anderen Wirkmechanismen kombiniert werden.

Die zu den dichten Membranverfahren zählenden Nanofiltrations- und Umkehrosmosemembranen können im Gegensatz zu porösen Membranen auch relevante Mengen gelöster Stoffe zurückhalten. Hierbei können bei den dichten Membranen keine definierten Poren mehr erkannt werden. Abtrennmechanismen basieren auf Lösungs- und Diffusionsmechanismen durch das Membranmaterial. Als Triebkraft gilt hier ebenfalls die Druckdifferenz, welche sich jedoch im Bereich oberhalb einiger Bar befinden muss, um relevante Durchflussmengen zu erreichen. Im Vergleich zu den porösen Membranen erhöht sich entsprechend der energetische Aufwand zur Druckerzeugung deutlich, wenn auch kein weiteres Betriebsmittel (wie bei Ozon oder Aktivkohle) für die Mikroschadstoffreduktion zum Einsatz kommt.

Entscheidend für die Menge an Mikroschadstoffen, die durch dichte Membranen zurückgehalten werden, sind die Trenneigenschaften der eingesetzten Membran in Relation zu den Stoffeigenschaften des jeweiligen Mikroschadstoffes. Die Rückhalteleistung trifft häufig für ein breites Spektrum an Mikroschadstoffen und vielen weiteren Abwasserinhaltsstoffen zu. Um ökonomisch betrieben werden zu können, erfordern die dichten Membranverfahren bisher jedoch ein hohes Maß an Vorbehandlung. Häufig ist vor der Behandlung mit Nanofiltration oder Umkehrosmose eine Sandfiltration oder Ultrafiltration notwendig. Erste Forschungsprojekte testeten nun erfolgreich den Einsatz von direkter Nanofiltration, also ohne Vorbehandlung, im Ablauf der biologischen Stufe (STOWA, 2023b).

Aufgrund der noch notwendigen aufwändigen Vorbehandlung und einem hohen Energiebedarf kommen dichte Membranverfahren bisher in der DACH-Region nicht zur Reduktion von Mikroschadstoffen aus kommunalem Abwasser zum Einsatz.

3 Verfahrensauswahl

Die Entscheidungsfindung zur optimalen Verfahrensvariante der vierten Reinigungsstufe auf einer Kläranlage stellt einen zentralen Planungsprozess zu Projektbeginn dar, der maßgeblich von vielfältigen Einzelaspekten sowie standortspezifischen Rahmenbedingungen beeinflusst wird. Entsprechend ist eine ganzheitliche Betrachtung Grundvoraussetzung für einen nachhaltigen Projekterfolg. In diesem Zusammenhang ist nicht nur der Status Quo der jeweiligen Kläranlage zu berücksichtigen, sondern es sind auch Antworten auf aktuelle Zukunftsfragen bzw. die „Fragen von morgen“ zu diskutieren, um eine fundierte Verfahrensentscheidung treffen zu können.

Die Beeinflussung und die Wechselwirkungen der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion mit anderen Abwasserreinigungszielen, z. B. Anforderungen an die Phosphor- und/oder Stickstoffreduktion gemäß EU-KARL, können von ausschlaggebender Bedeutung sein. Die Themen der Nachhaltigkeit bzw. des weitestgehenden Ressourcenschutzes sind vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele bzw. der Energieneutralität ebenfalls von besonderem Interesse. Die Reinigungsleistung in Bezug auf Mikroschadstoffe hinsichtlich der Breite des erfassbaren Stoffspektrums ist genauso zu erwähnen wie eine Vielzahl weiterer Planungsaspekte.

Es werden in den folgenden Kapiteln zuerst Hinweise zur Planung und Auslegung (siehe Kapitel 3.1) sowie zur Vorauswahl möglicher Verfahrensvarianten (siehe Kapitel 3.2) gegeben. In einem zweiten Schritt wird die ganzheitliche Betrachtung durch eine Bewertungsmatrix und die Vorstellung der Wertungskriterien (siehe Kapitel 3.3) erweitert, um die Entscheidungsgrundlage für die Verfahrensauswahl (siehe Kapitel 3.4) verbunden mit einer Sensitivitätsbetrachtung vorzustellen.

Ziele der Verfahrensauswahl

- Optimale Verfahrensvariante für die standortspezifischen Rahmenbedingungen
- Ganzheitliches Vorgehen und Berücksichtigung weitergehender Ziele und Aspekte
- Schrittweise Erarbeitung im Rahmen einer Bedarfsplanung oder Machbarkeitsstudie

Methodik der Verfahrensauswahl

1. Planungsgrundlagen und Auslegung
2. Verfahrensvorauswahl zur weiteren Betrachtung
3. Variantenvergleich in einer Bewertungsmatrix
4. Gesamtbewertung inkl. Wirtschaftlichkeit

Mit der hier vorgestellten Methodik ist eine schrittweise Erarbeitung der Verfahrensauswahl zur Mikroschadstoffreduktion möglich, die im Anschluss durch eine detaillierte Berücksichtigung der standortspezifischen Rahmenbedingungen und der wirtschaftlichen Auswirkungen mittels einer Machbarkeitsstudie/Bedarfsplanung vertieft werden kann. Die DWA erarbeitet zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Fachberichts das Merkblatt DWA-M 285-1 „Weitergehende Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 1: Kriterien der Verfahrensauswahl“ (DWA-M 285-1, Gelbdruck in Vorbereitung für 2026), welches zukünftig ebenfalls als Hilfestellung für die Entscheidung zur Verfahrensauswahl herangezogen werden kann.

3.1 Planungsgrundlagen und Auslegung

Um im Rahmen des Prozesses der Verfahrensauswahl eine belastbare Entscheidung treffen zu können, müssen vorab übergeordnet die standortspezifischen Verhältnisse untersucht werden. Zu diesen Planungsgrundlagen, welche frühzeitig zur weiteren Auslegung und Verfahrenswahl zu klären sind, zählen:

- Durchführung eines erweiterten Monitorings (Mikroschadstoffscreening)
- Festlegung der Auslegungswassermenge

Zu den Grundlagen für Planung, Betrieb und Überwachung von Anlagen mit vierter Reinigungsstufe hat das LANUK NRW unabhängig von dem vorliegenden Dokument einen LANUK-Fachbericht im Entwurf veröffentlicht, in dem u. a. Hinweise zu den zwei genannten Themenbereichen des erweiterten Monitorings und zur Auslegungswassermenge gegeben werden (LANUK NRW, 2025, Entwurf mit Stand November 2025; siehe <https://mikroschadstoffe.nrw.de/publikationen>).

Im Rahmen der Verfahrensauswahl ist ein erweitertes Monitoring (auch Mikroschadstoffscreening genannt) die Grundlage der weiteren Betrachtungen (vgl. LANUK NRW, 2025, Entwurf mit Stand November 2025 und DWA-A 198, Gelbdruck mit Stand Februar 2022). Ein adäquates Messprogramm gibt Aufschluss über im Ablauf der Kläranlage vorhandene Mikroschadstoffe und ermöglicht somit Aussagen zu deren Vorkommen und über eventuell quantitativ auffällige Einzelsubstanzen. Entsprechend können bei der Auswahl der Verfahren solche bevorzugt werden, deren Wirkmechanismen (oxidativ/adsorptiv) in Bezug auf die gemessenen Mikroschadstoffe und deren Eigenschaften als besser geeignet erscheinen. Des Weiteren sollte, im Zuge einer Messkampagne, das Abwasser auf Bromid untersucht werden, da erhöhte Konzentrationen im Zulauf der vierten Reinigungsstufe die Verfahrenseignung einer oxidativen Verfahrenslösung beeinflussen könnten (DWA-M 285-3, 2026).

Die Festlegung der Auslegungswassermenge ist von grundlegender Bedeutung für die verfahrenstechnische Dimensionierung der Mikroschadstoffreduktion und hat unmittelbar Auswirkungen auf die Auswahl geeigneter Verfahren. Der hohe Einfluss der hydraulischen Belastung auf die Dimensionierung und damit auch auf die Wirtschaftlichkeit (Investitions- und Betriebskosten) erfordert in der Regel eine fachliche Begleitung. Eine detaillierte Auswertung der Zuflussswassermengen zur Kläranlage ist unerlässlich, um sowohl eine Unter- als auch eine Überdimensionierung zu vermeiden und einen langfristig bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Gemäß EU-KARL sind die Proben zum Nachweis der Mikroschadstoffreduktion so zu nehmen, dass diese die Verschmutzung bei Trockenwetterabfluss widerspiegeln. Darüber hinaus sind gemäß bisherigen Handlungsempfehlungen weitere Anforderungen an die Reinigungsleistung bzw. den Betrieb der vierten Reinigungsstufen einzuhalten (KomS, 2020; KOM-M.NRW, 2016; LANUK NRW, 2025, Entwurf mit Stand November 2025), wenngleich diese neben dem maximalen Trockenwetterabfluss z. B. eine Behandlung von mindestens 70 % der Jahresabwassermenge in der vierten Reinigungsstufe empfehlen.

Die zuständigen Genehmigungsbehörden können abweichende und individuelle Anforderungen an die zu behandelnde Abwassermenge stellen, insbesondere bei erhöhten Anforderungen aus dem Gewässerschutz heraus (immissionsbasierte Betrachtung) oder z. B. bei Einzugsgebieten mit erhöhtem Anteil an Trennkanalisationen. Diese spezifischen Vorgaben müssen zwingend im Rahmen einer weitergehenden Planung detailliert abgeklärt und integriert werden. Für eine erste Bemessung der vierten Reinigungsstufe kann der maximale

Trockenwetterabfluss mit mindestens 70 % der Jahresabwassermenge angesetzt werden. Es wird empfohlen, mindestens die Betriebsdaten der letzten fünf Jahre auszuwerten und die Jahresganglinien auf besondere Auffälligkeiten oder Extremwetterperioden zu untersuchen, um diese ggf. aus der Auswertung auszuschließen (vgl. LANUK NRW, 2025, Entwurf mit Stand November 2025).

3.2 Vorauswahl möglicher Verfahrensvarianten

Für die Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen stehen verschiedene Verfahrensvarianten zur Verfügung (siehe Kapitel 2). Bevor einzelne Verfahrensvarianten als konkrete Planungskonzepte weiterverfolgt und bewertet werden (siehe Kapitel 3.3), sollte zunächst eine begründete Vorauswahl getroffen werden. Diese dient dazu, die Anzahl der zu betrachtenden Verfahren auf i. d. R. drei bis vier einzugrenzen.

Der Prozess der Vorauswahl sollte die in Abbildung 14 aufgelisteten Aspekte berücksichtigen. Dabei ist keine feste Reihenfolge oder Abfolge vorgegeben. Die einzelnen Aspekte werden in den nächsten Abschnitten näher erläutert und Beispiele gegeben. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Es sollten insbesondere für die Beurteilung der Einsatzfähigkeit der Verfahren auch weitere Dokumente hinzugezogen werden (z. B. DWA-M 285-1, Gelbdruck geplant für 2026).

Das Ziel der Vorauswahl ist keine abschließende Bewertung der Verfahrensvarianten. Stattdessen steht die fachlich begründete Abwägung zur Eignung bestimmter Verfahren im Vordergrund. Für die Durchführung der Vorauswahl ist eine vorherige Kenntnis der projektspezifischen Randbedingungen erforderlich. Die Vorauswahl kann anhand harter Ausschlusskriterien erfolgen, alternativ ist auch der Einsatz einer vereinfachten Wertungsmatrix denkbar.

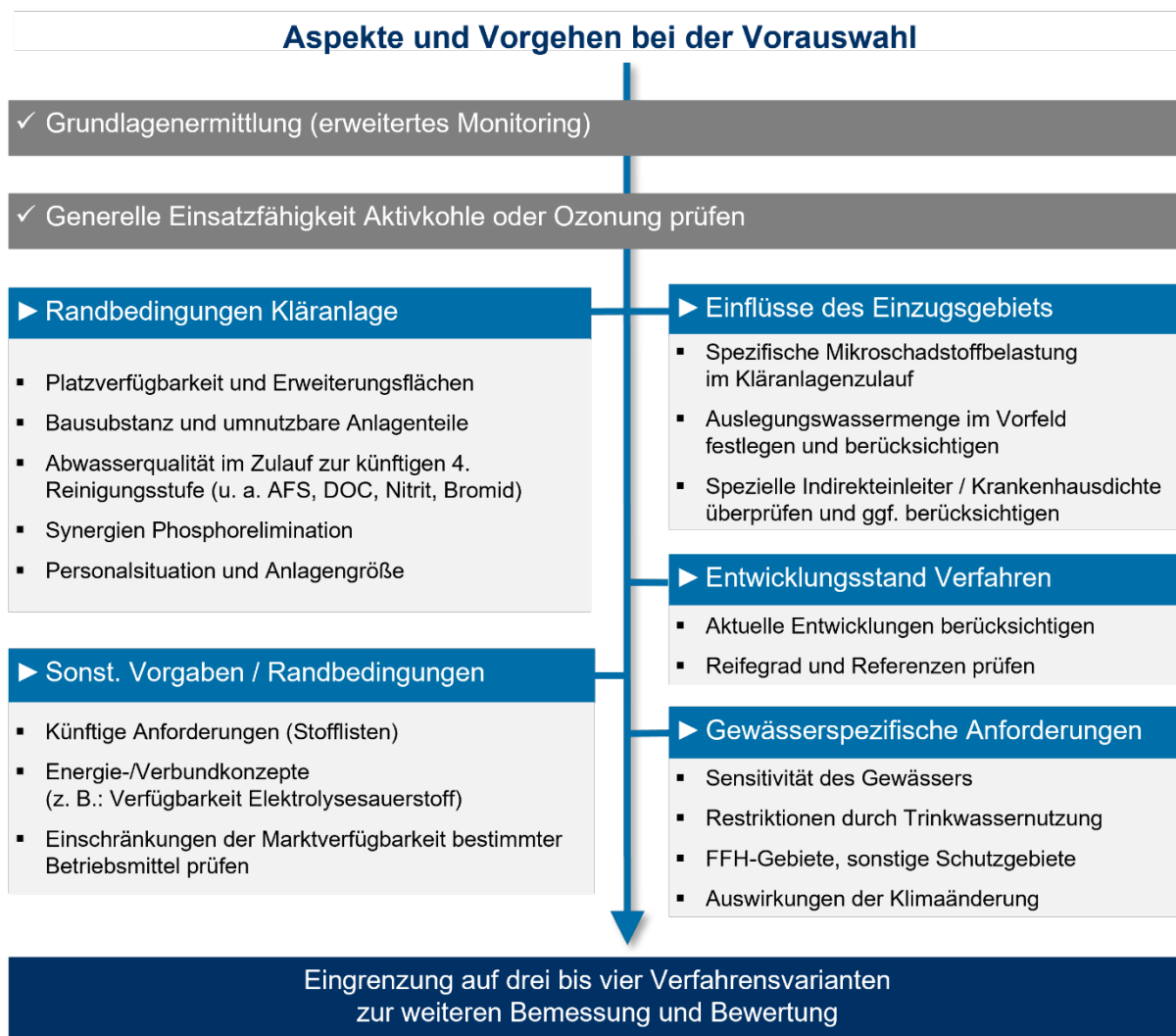


Abbildung 14: Zu berücksichtigende Aspekte für die Vorauswahl zu untersuchender Verfahrensvarianten zur Mikroschadstoffreduktion (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

3.2.1 Randbedingungen auf der Kläranlage

Die vorhandene **Bausubstanz** sowie bestehende Anlagenteile, die umgenutzt werden können, haben einen Einfluss auf die Verfahrensauswahl zur Mikroschadstoffreduktion. Das schließt jedoch nicht aus, dass Verfahren auch ohne die Nutzung der vorhandenen Bausubstanz integriert werden können. Die Nutzung der Bausubstanz kann aber dazu führen, dass bestimmte Verfahrensvarianten unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten günstigere Ausgangsbedingungen haben und somit eher bei der weiteren Betrachtung einbezogen werden sollten. Durch den Einsatz vorhandener Bausubstanz lassen sich zudem eine verbesserte Ökobilanz und eine höhere Wirtschaftlichkeit erzielen; entsprechende Ansätze sind bereits vielfach umgesetzt. Die Möglichkeiten hierzu sind sehr vielfältig. Es werden nachfolgend nur einzelne Beispiele genannt:

- Ungenutzte oder freiwerdende Beckenvolumina der biologischen Reinigungsstufe können als Kontaktzone oder Sedimentationsbereiche für Verfahren mit Pulveraktivkohle (z. B. PAK-Stufe) eingesetzt werden.

- Vorhandene Flockungsfiltrationsanlagen können auf sehr verschiedene Arten genutzt werden; als Vorbehandlung (Vorfiltration), als Hauptstufe (Umrüstung zu GAK-Filter; Alt, 2022; oder zu Ozonreaktoren; u. a. Alt, 2018), als Abtrennstufe (PAK vor Sandfilter oder PAK-Stufe) oder auch als Nachbehandlung (Ozon mit Sandfilter). In diesen Fällen sind insbesondere die Wechselwirkungen zur weitergehenden Phosphorelimination und gewässerspezifische Anforderungen zu beachten. Hier sind in der Regel weitere Aspekte und die genaue Ausführung der vorhandenen Abwasserfiltration bei der Entscheidung zur Vorauswahl mit einzubeziehen.
- Eine vorhandene oder hinsichtlich strenger Stickstoffanforderungen geplante Membranbelebungsanlage begünstigt bestimmte Verfahren, die betrachtet werden sollten. Beispielsweise die Direktdosierung von PAK (PAK-MBR) oder auch nachgeschaltete Adsorptionsstufen (GAK-Filter mit Vorfiltration).

Vorhandene **Erweiterungsflächen** bzw. der Baugrund und die **Platzverfügbarkeit** haben ebenso einen Einfluss auf die Verfahrensvorauswahl. Die Flächenverfügbarkeit auf kommunalen Kläranlagen ist oftmals deutlich eingeschränkt. Vielfach besteht zugleich ein Konflikt mit anderen geplanten Nutzungen, wie beispielsweise Ausbaureserven für die biologische Reinigungsstufe oder Erweiterungsflächen für die Klärschlammbehandlung /-verwertung oder Phosphorrückgewinnung. Neben dem Flächenbedarf ist die verfahrenstechnische und hydraulische Integration des Standorts von großer Bedeutung. Eine bevorzugte Positionierung ist in der Regel zwischen dem Nachklärbecken und dem Auslaufbauwerk, um eine optimale hydraulische Anbindung zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang ist auch eine mögliche zukünftige Erweiterung der vierten Reinigungsstufe und deren konzeptionelle Auswirkung auf die Lageplananordnung zu berücksichtigen (modulare Anordnung). Teilweise sind verbliebene Freiflächen zudem mit besonderen Restriktionen verbunden, die den Baugrund oder die Anbindung betreffen und neben der Platzverfügbarkeit dazu führen, dass bestimmte Verfahren zu bevorzugen sind. Die folgenden Beispiele sollen einen Eindruck darüber geben, welchen Einfluss die verfügbaren Flächen haben können und worauf zu achten ist:

- Sind Freiflächen limitiert, kann es sinnvoll sein, bestimmte platzsparende Verfahrensvarianten zu betrachten. Dazu gehören u. a. Abwasserfiltrationsverfahren mit hohen Filtergeschwindigkeiten, neue Ozoneintragsverfahren, die den Reaktionsraum verkleinern, bestimmte doppelstöckige Ausführungen oder kompakte Verfahren.
- Ist die Platzverfügbarkeit dagegen kein limitierender Faktor können auch beispielsweise naturnahe Verfahren, wie bepflanzte Bodenfilter mit Additiven, in Betracht gezogen werden.
- Bei einem baulich schwierigen Baugrund, mit beispielsweise hohen Anforderungen an Grundwasserhaltung, können ggf. eher Verfahrensvarianten mit wenig hydraulischen Verlusten oder eine höhere Anordnung (geringer Eingriff in den Baugrund, höhere Energiekosten) in Betracht gezogen werden.

Die **Abwasserqualität im Zulauf zur künftigen vierten Reinigungsstufe** kann einen großen Einfluss auf die Verfahrensauswahl haben. Hiermit sind in diesem Kontext insbesondere Standardabwasserparameter, wie die organische Hintergrundbelastung (DOC), Nitrit oder die abfiltrierbaren Stoffe (AFS), sowie Bromid gemeint. Diese Parameter werden sowohl durch das Einzugsgebiet als auch durch die vorhandene Verfahrenstechnik und Betriebsweise auf der Kläranlage beeinflusst. Je nach Situation können sich beispielsweise folgende Aspekte für die Verfahrensvorauswahl ergeben:

- **Abfiltrierbare Stoffe:** Hohe AFS-Konzentrationen, bedingt durch eine hydraulische Überlastung der Nachklärbecken und dem damit verbundenen erhöhten partikulären Anteil im Ablauf, können nachteilig für bestimmte Verfahren mit Abwasserfiltration sein, da diese dann deutlich häufiger gespült werden müssen (z. B. GAK-Filter).
- **Nitrit-Konzentration:** Hohe Nitrit-Konzentrationen deuten auf eine Limitierung der Nitrifikation hin und hätten beispielsweise den Einfluss, dass Ozon vermehrt gezehrt würde und somit weniger mit den Mikroschadstoffen reagieren könnte bzw. sich der Ozonbedarf und somit auch der Energiebedarf erhöhen würde. Ggf. steigt auch der Einfluss auf die Mutagenität durch die Bildung von Nitrosaminen, welche meist aber durch die biologische Nachbehandlung wieder abgebaut werden. Es ist daher genau zu prüfen inwieweit hier Optimierung möglich ist.
- **DOC-Konzentration:** Der DOC stellt die summierte Hintergrundbelastung mit organischen Kohlenstoffverbindungen dar, deren Abbau mit dem der Mikroschadstoffe konkurriert. Eine niedrige bzw. hohe DOC-Konzentration betrifft fast alle gängigen Verfahrensvarianten, indem entweder die erforderliche Ozon- oder PAK-Dosis sinkt bzw. steigt oder die GAK einem niedrigeren bzw. höheren Austauschintervall unterliegt.
- **Bromid:** Bei einer Ozonung des Abwassers können erhöhte Bromidkonzentrationen zu einer Bromatbildung führen und somit die Verfahrenseignung beeinflussen (vgl. Kapitel 2.2.1).

Betreibende von Kläranlagen sehen sich in Zukunft – letztlich auch aufgrund gestiegener Anforderungen durch die EU-KARL (Richtlinie (EU) 2024/3019) – mit erhöhten Herausforderungen in Bezug auf die **Phosphorelimination** konfrontiert. Die Einführung einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen kann vielfältige Synergiepotenziale mit der Phosphorelimination bieten. Insbesondere Filtrationsverfahren, die im Zuge der vierten Reinigungsstufe eingesetzt werden, können doppelt genutzt werden: Einerseits zur Rückhaltung adsorptiv gebundener Mikroschadstoffe oder zur biologischen Nachbehandlung, andererseits zur Abscheidung der bei der chemischen Phosphorfällung entstehenden Flocken. Dadurch wird die vorhandene Anlagentechnik effizienter genutzt und Investitions- wie Betriebskosten können reduziert werden. Insgesamt bietet die Verknüpfung der Mikroschadstoffreduktion mit der weitergehenden Phosphorelimination nicht nur ökologische Vorteile, sondern auch wirtschaftliche und betriebliche Synergieeffekte.

Als weitere Randbedingung der Kläranlage spielen auch die **Personalsituation und die Anlagengröße** eine Rolle. Die Integration einer Mikroschadstoffreduktion ist immer mit einem Mehraufwand für das Personal verbunden. Häufig betrifft dies insbesondere die Einfahr- und Optimierungsphase und kann mit Erreichen eines Regelbetriebs ggf. wieder abnehmen. Generelle Aussagen zu einzelnen Verfahrensvarianten können dabei nicht getroffen werden und sind im Einzelfall zu berücksichtigen. Folgende Beispiele können aber genannt werden:

- **Personalsituation:** Bei eingeschränkter Personalsituation sollte auf eine hohe Automation der Verfahren geachtet werden.
- Einem hohen **Betriebsaufwand** kann aber für alle Verfahren auch mit einer frühzeitigen Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren, wie beispielsweise einer Abdeckung offener Filterbecken zur Vermeidung von Algenbildung, der Verwendung von einfachen Regelkonzepten für die Betriebsmitteldosierungen sowie Wartungsverträgen von maschinentechnischen Anlagenkomponenten, entgegengewirkt werden.

Zusätzlich sollte bei der Vorauswahl der Verwertungspfad der Klärschlämme berücksichtigt werden. Beim Einsatz von Verfahrensvarianten zur Mikroschadstoffreduktion, bei denen PAK über den Überschussschlamm abgeführt wird, ist eine landwirtschaftliche Nutzung zu vermeiden.

3.2.2 Einflüsse des Einzugsgebiets der Kläranlage

Das jeweilige Einzugsgebiet der kommunalen Kläranlage kann Auswirkungen auf die stoffliche Abwassermatrix im Rohabwasser und auch Einfluss auf die hydraulischen Lastfälle haben. Im Rahmen eines erweiterten Abwassermonitorings sollte zunächst die Abwasserzusammensetzung im Ablauf der Kläranlage auf Mikroschadstoffe überprüft werden (siehe „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Grundlagen für Planung, Betrieb und Überwachung“, LANUK NRW (2025, Entwurf mit Stand November 2025)). Darüber hinaus kann eine Beprobung des Kläranlagenzulaufs Informationen über die Mikroschadstoffreduktion der Kläranlage vor der 4. Reinigungsstufe liefern. Auch die Bromidkonzentration sollte überprüft werden. Hierbei ist anzumerken, dass das erweiterte Monitoring daher im Sinne der anderen Aspekte der Grundlagenermittlung auch im Kläranlagezulauf erweitert werden sollte (siehe Kapitel 3.2.1 Abwasserqualität im Zulauf). Das Einzugsgebiet kann beispielhaft folgenden Einflussfaktoren aufweisen:

- Eine besonders hohe Krankenhausdichte (hohe Anzahl an Krankenhausbetten im Verhältnis zur Anzahl an Einwohnern im Einzugsgebiet der Kläranlage) kann dazu führen, dass zum einen die stoffliche Belastung – aufgrund „verlagerter“ Emissionen durch externe Einwohner als Krankenhaus-Patienten – tendenziell höher ist und zum anderen hohe Konzentrationen krankenhausspezifischer Abwasserbelastungen vorliegen. In besonderen Fällen könnte hier beispielsweise unter Abwägung anderer Faktoren ein Kombinationsverfahren mit hoher Breitbandwirkung für möglichst viele Parameter sinnvoll sein.
- Größere Anteile an Trennkanalisationen im Einzugsgebiet können dazu führen, dass die in der vierten Reinigungsstufe behandelte Abwassermenge höher zu wählen und ggf. auf eine Vollstrombehandlung auszulegen ist.

3.2.3 Gewässerspezifische Anforderungen

Bereits im dritten Bewirtschaftungsplan 2022 – 2027 zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie für Nordrhein-Westfalen (MULNV, 2021) wurde durch Programmmaßnahme 4 „Ausbau kommunaler Kläranlagen, Reduzierung sonstige Einträge“ ein risikobasierter Ansatz zur Bewertung von Mikroschadstoffen und Reduzierung der stofflichen Belastung der Gewässer verfolgt. Dieser findet auch bei der Aufstellung der 4. Bewirtschaftungsplanung für Nordrhein-Westfalen Berücksichtigung, die bis Ende 2026 im Entwurf zu erfolgen hat. Dieser Ansatz steht im Einklang mit den Zielen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie, nach der Maßnahmen vorrangig dort umzusetzen sind, wo relevante Auswirkungen auf den Gewässerzustand zu erwarten sind. Ein Einfluss auf die Verfahrensauswahl kann sich u. a. durch folgende Aspekte ergeben:

- **Auslegungswassermenge:** Die Sensitivität des Gewässers gegenüber Mikroschadstoffeinträgen spielt eine zentrale Rolle, insbesondere bei geringem Abfluss, niedriger

Verdünnung oder einem ökologisch hochwertigen Wasserkörper. In diesem Zusammenhang wurden für einzelne Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen immissionsbezogene Anforderungen abgeleitet. Die Auslegungswassermenge der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion wurde dabei teilweise entsprechend höher festgelegt, um eine ausreichende Entlastung des Gewässers sicherzustellen. Zusätzliche Restriktionen können sich ergeben, wenn das Gewässer, in welches die Kläranlage einleitet, im Gewässerverlauf unterhalb zum Zwecke der Trinkwassernutzung relevant ist. Besondere Anforderungen ergeben sich zudem bei Einleitungen in oder im Einflussbereich von Fauna-Flora-Habitat (FFH) Gebieten, da erhöhte Schutzansprüche in Bezug auf den ökologischen Zustand sowie hinsichtlich Stoffeinträgen bestehen.

- **Relevanz für kleinere Kläranlagen (10.000 bis < 150.000 EW):** Die zukünftige Bewertung der Risiken in möglichen Risikogebieten gemäß den Definitionen der EU-KARL kann dazu führen, dass auch kleinere Kläranlagen (mit 10.000 bis < 150.000 EW) mit einer vierten Reinigungsstufe ausgebaut werden müssen. Die Größe der Kläranlage hat einen Einfluss auf die Verfahrensauswahl, da kleinere Kläranlagen von hohen spezifischen Kosten der Mikroschadstoffreduktion betroffen sein können und hier Einsparpotenziale und entsprechende Verfahrensansätze zu betrachten sind.
- **Immissionsorientierte Betriebsweise:** Eine flexible immissionsorientierte Betriebsweise der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion ist bisher nicht vorgesehen. Verfahren mit hoher Breitbandwirkung können bei einer immissionsbasierten Zielsetzung vorteilhaft sein.
- **Auswirkungen der Klimaänderungen:** Darüber hinaus sind bei der Verfahrenswahl auch die möglichen Auswirkungen der Klimaänderungen zu berücksichtigen, da z. B. veränderte Abflussregime, häufigere extreme Niederschläge und steigende Wassertemperaturen die Empfindlichkeit der Gewässer gegenüber Mikroschadstoffeinträgen weiter erhöhen können.
- **Zusätzliche Anforderungen an Ablaufqualität:** Mit Veröffentlichung der Richtlinie 2026/805/EU (auch als „Water Package“ bekannt), die am 10. Mai 2026 in Kraft getreten ist, wurde auch die Europäische Richtlinie über Umweltqualitätsnormen (UQN) 2008/105/EG (Richtlinie 2008/105/EG) geändert (Richtlinie (EU) 2026/805). Je nach Ausgestaltung und Umsetzung in deutsches Recht (Oberflächengewässerverordnung) können sich hieraus zusätzliche Anforderungen an die Ablaufqualität der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion ergeben.

3.2.4 Entwicklungsstand der Verfahren

Im Zuge der Beschreibung der Technologien und Verfahrensvarianten wurde in Kapitel 2 zu jeder Technologie auch ein Einblick in aktuelle Entwicklungen gegeben. Es ist damit zu rechnen, dass die Anzahl an etablierten Verfahrensvarianten in den nächsten Jahren noch deutlich ansteigen wird. Die Verfahrensauswahl sollte sich immer auf den neuesten Stand der Technik beziehen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Verfahren eine ausreichend belegte technische Reife aufweisen. Folgende Aspekte sollten je nach Technologie beispielhaft im Blick behalten werden, da sie künftig Auswirkungen auf die Verfahrensauswahl haben können:

- **Adsorptionsverfahren (PAK und GAK)**

- Die künftige Marktverfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von biogener PAK kann dazu führen, dass Verfahrensvarianten mit PAK-Dosierung auch bei kritischer Betrachtung der Nachhaltigkeit zukünftig attraktiver werden.
- Die Synergien von PAK mit Membrantechnik sind bekannt, gleichzeitig aber zum Teil noch immer Stand der Forschung und können in Zukunft neue Erkenntnisse liefern.
- Bei GAK-Filtern sind die Vorteile einer Vorfiltration noch nicht abschließend belegt und es können neue Erkenntnisse mit belastbaren Praxiserfahrungen entstehen.
- GAK-Filter im Schwebebettverfahren sind derzeit nur in der Schweiz etabliert. Je nach Erfahrungsstand könnten die Vorteile der Verfahrensvariante auch für Anlagen in Deutschland in Zukunft interessant werden.
- **Oxidationsverfahren mit Ozon**
 - Neue oder modifizierte Ozon-Eintragsverfahren führen zu deutlich kompakteren Reaktorkonzepten.
 - Vorbehandlungen mit z. B. Ultrafiltration können den Ozoneinsatz deutlich effizienter werden lassen, sind jedoch noch Bestandteil der Forschung und Entwicklung.
- **Kombinationsverfahren**
 - Bisher ist nur die Kombination von Ozon und GAK etabliert. Aber weitere sinnvolle Kombinationen sind je nach Fragestellung in Zukunft mit neuen Erkenntnissen über Synergien zu erwarten.

3.2.5 Sonstige Vorgaben und Randbedingungen

Die sonstigen Rahmenbedingungen mit Einfluss auf die Verfahrensvorauswahl können sehr betreiber- und ortsspezifisch sein. Folgende Beispiele können genannt werden:

- **Rechtliche Anforderungen:** In Zukunft könnten sich die rechtlichen Anforderungen hinsichtlich der zu reduzierenden Parameter verändern. Neu geregelte Substanzen und deren Adsorbierbarkeit oder Oxidierbarkeit können Einfluss auf die Verfahrensauswahl haben.
- **Marktverfügbarkeit Betriebsstoffe:** Die Marktverfügbarkeit bestimmter Betriebsmittel kann sich in Zukunft drastisch verändern. Je nach Situation hat die Verfügbarkeit der eingesetzten Produkte einen großen Einfluss auf das Verfahren, welches gewählt werden sollte.
- **Weitergehende Energie- und Verbundkonzepte:** In Zukunft können weitergehende Energie- und Verbundkonzepte dazu führen, dass möglicherweise am Standort (oder in unmittelbarer Nachbarschaft) Reinsauerstoff beispielsweise aus Projekten zur Wasserstoffproduktion mit bestimmten Elektrolyseurtechnologien zur Verfügung steht. Damit bestehen theoretisch in einem solchen Fall günstige Voraussetzungen für eine Ozonerzeugung aus Elektrolysesauerstoff.

3.3 Bewertungsmatrix / Wertungskriterien zum Variantenvergleich

Bewertungsmatrizen sind in der Praxis bewährte Planungsinstrumente, die sich als Entscheidungsgrundlage für die finale Auswahl und zum Vergleich der Verfahrenstechnologien der vierten Reinigungsstufe anbieten (Alt, 2025). Die vielfältigen Einzelaspekte sowie

standortspezifischen Rahmenbedingungen, u. a. wie in den vorausgegangenen Kapiteln benannt, können übersichtlich und transparent in die Bewertung einfließen.

Die folgende Bewertungsmatrix und die darauf aufbauende Gesamtbewertung zum Variantenvergleich soll Betreibenden, Genehmigungsbehörden und Planerinnen und Planern – auf Basis der in Kapitel 2 dargestellten Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahrensvarianten – eine fundierte Erstbetrachtung ermöglichen. Diese Verfahrensauswahl kann im Rahmen einer anschließenden Bedarfsplanung vertieft analysiert und schließlich zur Festlegung einer Vorzugsvariante weiterentwickelt werden. Vor dem Hintergrund der gestiegenen Komplexität und der Vielzahl von Einflussfaktoren ist die Festlegung der maßgebenden Kriterien in einer Bewertungsmatrix – unter Berücksichtigung der Projektziele – ein wesentlicher Schritt der Entscheidungsunterstützung.

In der Regel werden die Hauptkriterien unterschieden in:

- nicht-monetäre Aspekte
- monetäre Aspekte (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung)

In dem vorliegenden Fachbericht wird auf die monetären Aspekte bzw. die Ergebnisse einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gemäß den Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien) nicht näher eingegangen. Zur Erzielung einer ausreichenden Kostengenauigkeit wird grundsätzlich empfohlen, eine Bedarfsplanung oder eine Machbarkeitsstudie durchzuführen. Häufig wird das Hauptkriterium der Wirtschaftlichkeit mit 20 bis 40 % einer Gesamtbewertung angesetzt, während die nicht-monetären Aspekte mit 60 bis 80 % deutlich dominanter gewichtet werden. Es wird an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass aufgrund der unterschiedlichen Vor-Ort-Randbedingungen von Kläranlagen (Hydraulik, Platzbedarf, Nutzung vorhandener Bausubstanz etc.) immer wieder eine Einzelfallbetrachtung als sinnvollste Lösung zur Ermittlung von belastbaren Investitionskosten notwendig ist. Pauschale Ansätze anhand von Kostenkurven sind zur Erzielung einer aussagekräftigen Kostengenauigkeit nicht geeignet. Hierbei spielt neben der großen Schwankungsbreite der Kostenkurven u. a. auch eine Rolle, dass die „erstgenannte Zahl der Investitionskosten“ im Rahmen von öffentlichen Planungsprozessen heute eine immer wichtigere Rolle spielt. Vertrauen in ein Vorhaben erhält man u. a. mit einer belastbaren und vorausschauenden Kostenplanung.

Im Weiteren wird in Abbildung 15 beispielhaft eine Bewertungsmatrix mit Wertungskriterien vorgestellt, die in der Praxis bereits häufig angewendet und erfolgreich umgesetzt wurde. Die Bewertungsmatrix bietet eine erste fundierte Möglichkeit Verfahrensvarianten miteinander und unter Einbeziehung standortspezifischer Kriterien zu vergleichen. Die in der Bewertungsmatrix genannten Verfahrensvarianten wurden beispielhaft gewählt und haben keinen bewertenden Charakter. Die Wertungskriterien sind unter folgenden übergeordneten Hauptkriterien strukturiert:

- Betrieb
- Reinigungsleistung
- Nachhaltigkeit
- Planung

Je nach individuellen Randbedingungen und Zielsetzungen der Projektaufgabe kann diese Bewertungsmatrix um weitere Wertungskriterien ergänzt bzw. reduziert werden. Analog

können die Wichtungen der Einzelkriterien bedarfsgerecht angepasst werden. Zum Beispiel ist die Relevanz des Einzelkriteriums "Kombination mit der Phosphorelimination" von 10 auf 15 % oder mehr anzuheben, falls erhöhte Anforderungen zu Phosphor aus einem weitergehenden Gewässerschutz bestehen. In solch einem Fall kann dann im Gegenzug z. B. das Einzelkriterium "Breite des Stoffspektrums der Reduktion" von 10 auf 5 % oder weniger reduziert werden. Bei einer weitergehenden Bedarfsplanung oder Machbarkeitsstudie ist die Einbeziehung monetärer Kriterien unverzichtbar und dient in der Gesamtheit der Festlegung einer Verfahrensvariante.

Die Relevanz der einzelnen Wertungskriterien zueinander wird mit einer **Wichtung (W)** in Form von Prozentwerten festgelegt. Die Summe der Wichtung aller Kriterien entspricht 100 %. Unter Abzug der monetären Aspekte mit einer Wichtung von z. B. 30 % lassen sich die Wertungskriterien der nicht-monetären Aspekte mit in der Summe von 70 % darstellen.

			Variante 1 PAK+Tuchfilter		Variante 2 Ozon+Raumfilter		Variante 3 GAK-Filter		Variante 4 Ozon + GAK	
Kriterium		w (%)	PZ	WZ	PZ	WZ	PZ	WZ	PZ	WZ
Hauptkriterium Betrieb										
Redundanzen / Betriebssicherheit	10,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Flexibilität beim Einsatz von Betriebsstoffen	5,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Hauptkriterium Reinigungsleistung										
Breite des Stoffspektrums zur Mikroschadstoffreduktion	10,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Kombination mit P-Elimination	10,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Weitergehende Anforderungen	5,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Hauptkriterium Nachhaltigkeit										
Energiebedarf	15,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Ressourcenschutz (CO ₂ -Bilanz)	5,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Hauptkriterium Planung										
Platzverhältnisse / Flächenbedarf	5,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Stufenweiser Ausbau	5,0			0,00		0,00		0,00		0,00
Zwischenwertung ohne Jahreskosten	70			0,00		0,00		0,00		0,00
Rangfolge (ohne Jahreskosten)			1		2		3		4	
Höhe der Jahreskosten	30	Summe X		Summe X		Summe X		Summe X		
			0,00		0,00		0,00		0,00	
Gesamtwertung mit Jahreskosten	100			0,00		0,00		0,00		0,00
Rangfolge (mit Jahreskosten)			1		2		3		4	

Abbildung 15: Beispielhafte Bewertungsmatrix zur Kosten-Nutzen-Betrachtung verschiedener Verfahrensvarianten von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion (PZ = Punktzahl, W = Wichtung, WZ = Wertungszahl)

Anhand einer stichpunktartigen Einzelbewertung erfolgt anschließend die Vergabe einer **Punktzahl (PZ)** für jedes Einzelkriterium. Für die Vergabe der Punktzahl kann beispielhaft eine Skala von 1 (nicht ausreichend) bis 5 (sehr gut) gewählt werden (Tabelle 22).

Tabelle 22: Bewertungsskala der Einzelkriterien

Bewertung	Punktzahl (PZ)
nicht ausreichend	1
ausreichend	2
befriedigend	3
gut	4
sehr gut	5

Mittels Multiplikation der **Wichtung (W)** und der **Punktzahl (PZ)** wird die **Wertzahl (WZ)** bestimmt, welche die Wertigkeit eines jeden Einzelkriteriums definiert. Anhand der Summe der Wertzahlen wird die Rangfolge der Projektvarianten zueinander ermittelt. Sinnvollerweise wird die Bewertungsmatrix so aufgebaut, dass anhand einer Zwischenwertung ohne Berücksichtigung der monetären Aspekte zunächst die fachlich sinnvollste Lösung ermittelt und erst dann unter Einbeziehung der monetären Aspekte im Anschluss eine Gesamtbewertung erfolgt.

Die Variante mit der Rangfolge 1 stellt dann im Sinne der Gesamtbewertung die beste Lösung dar.

3.3.1 Hauptkriterium Betrieb

Nach wie vor ist in Kläranlagenprojekten, wie z. B. bei der Implementierung einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion (vierte Reinigungsstufe), die Frage der Redundanz und der Betriebssicherheit wie auch der Flexibilität bei Einsatz von Betriebsstoffen einer der entscheidendsten Einflussfaktoren, um diese langfristig stabil und effizient über viele Jahre hinweg betreiben zu können.

Redundanzen und Betriebssicherheit (10 %)

Die Bewertung des Teilkriteriums *Redundanzen und Betriebssicherheit* kann anhand einer Vielzahl von Betriebserfahrungen, die zum Teil bereits aus bis zu 15 Jahren für die gängigen Technologien vorliegen, vorgenommen werden. Redundanzen sind hierbei häufig planerisch beeinflussbar, wobei die Betriebssicherheit maßgeblich von den Erfahrungswerten aufseiten der Betreibenden wie auch der Planenden abhängt. Der Aufwand für die betriebliche Handhabung der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion wird häufig unterschiedlich eingeschätzt und unterliegt einer subjektiven Bewertung. So spielt der Ausfall eines GAK-Filters bei geplanten sechs oder zwölf Filtern eine geringere Rolle, als wenn eine Ozonstraße oder ein PAK-Silo außer Betrieb genommen werden muss, wenn jeweils nur eine ein- oder zweistraßige Ausführung vorhanden ist. Auf der anderen Seite ist im Detail zu hinterfragen, welche Betriebskomponenten tatsächlich im Falle eines Ausfalls betroffen sind und nicht kurzfristig

ersetzt werden können (Wartungsvertrag oder Reserveaggregate vor Ort vorhalten). Die Minimierung von Betriebsrisiken sollte im Vordergrund stehen und in Planung sowie Abwicklung angemessen berücksichtigt werden.

Vor-Ort-Besichtigungen von vierten Reinigungsstufen mit unterschiedlichen Technologien, die sich in Betrieb befinden, helfen, Erkenntnisse insbesondere zu hier relevanten Betriebserfahrungen gemeinsam zu diskutieren und intensiv auszutauschen. Solche Vor-Ort-Besichtigungen erweisen sich immer wieder als sinnvoll und werden empfohlen, um der Entscheidungsbedeutung der Verfahrensauswahl insbesondere auch in Hinsicht auf betriebliche Belange dieses Hauptkriteriums gerecht zu werden. Ein fachlicher Austausch kann beispielsweise u. a. im Rahmen von DWA Kläranlagennachbarschaften oder Fachveranstaltungen wie dem forum:mikroschadstoffe in NRW erfolgen.

Flexibilität beim Einsatz der Betriebsstoffe (5 %)

Die Variabilität im Betrieb ist bei den verschiedenen Verfahrensvarianten unterschiedlich einzuschätzen. Eine veränderbare PAK-Konzentration kann direkten Einfluss auf die Reduktion der Mikroschadstoffe nehmen, während eine GAK-Filtration deutlich weniger Einflussfaktoren aufweist. Der Austausch der Aktivkohle selbst oder eine unterschiedlich starke Belastung anhand der Oberflächenbeschickung ergeben hier deutlich weniger Spielraum. Demgegenüber kann die Ozonkonzentration abhängig vom DOC im Ablauf der Nachklärung bzw. der Abwassermatrix sowie dem Ziel der Mikroschadstoffreduktion problemlos verändert und anhand geeigneter Dosierstrategien angepasst werden. Verfahrenskombinationen von zwei Technologien bieten mehr Flexibilität als sie in den Einzeltechnologien gegeben ist und können langfristig zusätzliche Vorteile bieten, falls sich z. B. Reinigungsanforderungen zukünftig verändern. Bei sich verändernden Marktpreisen von Aktivkohle oder Sauerstoff zur Ozonerzeugung kann die höhere Flexibilität auch wirtschaftlich relevante Dimensionen annehmen und damit deutliche Betriebskostenvorteile aufweisen.

3.3.2 Hauptkriterium Reinigungsleistung

Im vorgenannten Beispiel ist das Hauptkriterium der Reinigungsleistung mit 25 % bewertet worden (siehe Abbildung 15). Dies spiegelt zum einen die Wichtigkeit des primären Zieles einer vierten Reinigungsstufe wider und macht deutlich, dass der damit verbundene Gewässerschutz höchste Bedeutung erhält. Die Schutzbedürftigkeit der Gewässersysteme mit ggf. höheren Qualitäts- und Nutzungsanforderungen (z. B. in FFH-Gebieten oder Trinkwassernutzung oder Wasserwiederverwendung) sowie eine hohe Belastungssituation über den entsprechenden Abwasseranteil am Gewässer verdeutlichen die Wichtigkeit der Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen. Mit Inkrafttreten von EU-KARL zum Jahresbeginn 2025 wird zukünftig eine vierte Reinigungsstufe für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße ≥ 150.000 EW verpflichtend und auch für eine bisher unbekannte Anzahl von kleineren Kläranlagen – in Abhängigkeit eines risikobasierten Ansatzes – gefordert. Während in den letzten Jahren die Listen für Indikatorsubstanzen des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS, 2018) oder des Landes Nordrhein-Westfalen (KOM-M.NRW, 2016) galten, ist nunmehr eine neue, einheitliche Regelung Grundlage zukünftiger Planungsaufgaben (LANUK NRW, 2025, Entwurf mit Stand November 2025). Abhängig von den Ergebnissen eines erweiterten Monitorings oder der vorhandenen Gewässersituation kann es sinnvoll oder angeraten sein höhere Anforderungen an die Mikroschadstoffreduktion und/oder bezogen auf einzelne

Mikroschadstoffparameter zu stellen, welche die in der EU-KARL definierten Mindestziele übersteigen und in der Planung zu berücksichtigen sind. So können beispielsweise aufgrund der Wichtigkeit von einzelnen Parametern, z. B. bei hohen Anteilen industriellen Abwassers oder Krankenhausabwassers, ebenfalls Anpassungen an der Wichtung des Hauptkriteriums von z. B. 25 % auf 30 % bedarfsgerecht vorgenommen werden, um der Bedeutung dieses Kriteriums noch mehr gerecht zu werden.

Breite des Stoffspektrums zur Reduktion (10 %)

Unabhängig von der Forderung einer 80 %igen Reduktion für ausgewählte Indikatorsubstanzen ist mittlerweile bekannt, dass durch die Wirkmechanismen der Oxidation (Ozon) und Adsorption (Aktivkohle) verschiedene Mikroschadstoffe unterschiedlich gut entfernt werden können. Verfahrenskombinationen von z. B. Ozon und GAK sind in der Lage, durch die Anwendung der zwei unterschiedlichen Wirkmechanismen eine hohe Breitbandwirkung an Reduktion zu erzielen. Je nach eingestellter Ozonkonzentration und erreichbarem Bettvolumen der Aktivkohle bzw. zugehörigem Austauschintervall sind eine gute bis sehr gute Reduktion unter Beachtung des erforderlichen Ressourceneinsatzes gegeben. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass ein Einzelverfahren (also keine Verfahrenskombination) als vollwertige vierte Reinigungsstufe anzusehen ist, mit welcher die Anforderungen an die Mikroschadstoffreduktion erreicht werden können. Verfahren, die oxidative und adsorptive Wirkmechanismen kombinieren, erfassen jedoch ein breiteres Spektrum an Substanzen und ermöglichen eine gezieltere sowie effizientere Entfernung von Mikroschadstoffen (RedOxA, 2022). Bei Kombinationsverfahren ist ein optimierter Betrieb im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen, sodass das Reinigungsziel mit vertretbarem Aufwand erzielt werden kann. Praxisbeispiele belegen z. B. bei der Verfahrenskombination Ozon und GAK die Vorteile reduzierter Betriebskosten infolge vermindertem Ozonbedarfs in der ersten Stufe und hohem erzielbarem Bettvolumen in der nachfolgenden Aktivkohleanlage (u. a. Alt, 2018; Thalmann & Egli, 2025).

Kombination mit P-Elimination (10 %)

Neben den Anforderungen an die Reduktion der Mikroschadstoffe sind in der EU-KARL auch weitergehende Anforderungen an die Phosphorelimination formuliert. Auch aus den immissionsseitigen Anforderungen der EU-WRRL ergeben sich weiterhin Anforderungen an die Nährstoffreduzierung zur Zielerreichung. Aus planerischer Perspektive sind beide Zielsetzungen integrativ zu betrachten, um potenzielle Synergieeffekte zu identifizieren und zu nutzen. Dies ermöglicht die Entwicklung eines langfristig investitions- und betriebseffizienten Anlagenbetriebs und ist Grundlage nachhaltigen Projekterfolges. Die Wichtung dieses Kriteriums hat gemäß der standortspezifischen Randbedingungen und Anforderungen zu erfolgen.

In wenigen Planungsaspekten sind die Wechselwirkungen derart groß, wie zwischen der Mikroschadstoffreduktion und der weitestgehenden Phosphorelimination. Während Phosphorüberwachungswerte von 1 mg/L oder höher nur in seltensten Fällen Maßnahmen über die klassische Fällmitteldosierung bis zur Zwei-Punkt-Dosierung hinaus erfordern, ist eine verschärfte Phosphor-Anforderung von z. B. 0,5 mg/L oder weniger in der Regel nur mit Einsatz von Filtrationstechnologien möglich (DWA-A 202, 2011). Während die klassische Raumfiltration nach wie vor bei höchsten Anforderungen eine bewährte Technologie darstellt, sind aktuell eine Vielzahl von Tuchfiltern sowie kontinuierlich gespülte Raumfilter in Planung bzw. in Betrieb, die sich als deutlich wirtschaftlicher herausstellen können. Verfahrenstechnologien der Mikroschadstoffreduktion unter Einsatz von Filtrationstechnologien, wie z. B. einer

Tuchfiltration bzw. Raumfiltration, haben trotz ihrer wirtschaftlichen Aufwendungen dann im Vergleich Vorteile, wenn die Anforderungen an die Phosphorelimination sehr hoch sind oder vorhandene Filteranlagen berücksichtigt werden können. Die Vorteile einer weitgehenden partikulären Phosphorentnahme werden neben der Reduktion von Mikroschadstoffen weitgehend kostenneutral mit zur Verfügung gestellt. Andere Verfahrenstechnologien, wie z. B. die Ozonung mit anschließendem Wirbelbettreaktor, erzielen hingegen keine zusätzliche Phosphorelimination.

Für die gleichzeitige Nutzung einer GAK-Filtration zur Mikroschadstoffreduktion und Phosphorelimination liegen bislang nicht ausreichend Betriebserfahrungen hinsichtlich der Wechselwirkungen bzw. Synergien vor. Vor diesem Hintergrund wird diese Thematik derzeit in mehreren Forschungsprojekten untersucht (SOLIDUS, 2022; DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6, 2025; Hybrid-GAK, 2024). Erste Versuchsergebnisse sind positiv und lassen darauf schließen, dass die Mikroschadstoffreduktion durch die vorherige Fällmittelzugabe und Abscheidung der entstehenden Flocken im GAK-Filter nicht negativ beeinflusst wird, wenngleich zum Teil mit häufigeren Spülintervallen gerechnet werden kann.

Aus Erfahrung bietet es sich an, die Ziele der Phosphorelimination zu einem frühen Projektzeitpunkt in Abstimmung mit den Projektbeteiligten einschließlich der Genehmigungsbehörden abzuklären und auf Grundlage der erzielten Ergebnisse eine weitere Planung bzw. Gesamtbewertung vorzunehmen.

Weitergehende Anforderungen (optionale 5 %)

An weitergehenden Anforderungen können beispielsweise die Vermeidung des Eintrags von Mikroplastik in die Gewässer oder hygienische Anforderungen an das einzuleitende Abwasser genannt werden. Häufig sind solche weitergehenden Anforderungen optional und angelehnt an weitergehende Ziele (bspw. Einhaltung von Badegewässerqualität oder Wasserwiederverwendung).

Mikroplastik ist in der Umwelt und insbesondere in Flüssen und Meeren allgegenwärtig; entsprechend ist die Thematik häufig Gegenstand gesellschaftspolitischer Diskussion. Über die Kanalisation werden erhebliche Mengen an Mikroplastik den Kläranlagen zugeführt. Die klassischen Reinigungsstufen von mechanischer Vorreinigung bis zur biologischen Reinigungsstufe entfernen durch die Einbettung in die gebildete Biomasse und die Überschussschlammmentnahme Mikroplastik bereits in einem hohen Umfang. Filtrationsverfahren eignen sich zum fast vollständigen Rückhalt von Mikroplastik auf den Kläranlagen. Vor diesem Hintergrund sind Verfahrenstechnologien unter Einsatz einer Filtration allesamt in der Lage, eine gute bzw. sehr gute Entnahmeleistung von Mikroplastik zur Verfügung zu stellen. Ohne Einsatz von Filtrationstechnologien ist dem gegenüber eine geringere Mikroplastikreduktion zu verzeichnen. Vor diesem Hintergrund ist eine Berücksichtigung des Teilkriteriums möglich.

Beim Einsatz von Ozon in Konzentrationen zur Mikroschadstoffreduktion in Abwasser kann auch eine teilweise Reduktion von z. B. für Badegewässer oder die Wasserwiederverwendung relevanter Indikatororganismen, wie *Escherichia coli* oder Intestinale Enterokokken, stattfinden (FlexTreat, 2024). Die Reduktionsleistung kann hierbei nicht mit der aus dem Trinkwasserbereich gleichgesetzt werden, da dort andere Dosierkonzentrationen und Aufenthaltszeiten in einer deutlich unterschiedlichen Wassermatrix zum Einsatz kommen. Für die Betrachtung sind passende Literaturen aus dem Abwasserbereich heranzuziehen. Für eine gezielte Keimreduktion bietet sich aus Wirtschaftlichkeitsgründen häufig auch die Kombination mit Filtrations-

und/oder Desinfektionsverfahren (z. B. UV-Desinfektion) an. Auch die zur Vor- oder Nachbehandlung der vierten Reinigungsstufe verwendeten Filtrationsverfahren können zu einer moderaten Keimreduktion beitragen (FlexTreat, 2024). Grundsätzlich ist zu beachten, dass eine Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion nicht mit dem Ziel der Hygienisierung ausgelegt ist.

Die Einhaltung vorgegebener Konzentrationswerte für hygienische Parameter bzw. deren definierte Reduktion wird beispielsweise im Rahmen der Badegewässerrichtlinie (EU 2006/7/EG) oder den Anforderungen für Wasserwiederverwendung (DWA-M 1200-1, Gelbdruck mit Stand September 2025) gefordert. Letztere beinhaltet zusätzlich im Rahmen der zu erstellenden Risikomanagementpläne weitergehende Anforderungen an die Auseinandersetzung mit und ggf. Reduktion von Mikroschadstoffen (ggf. Erweiterung des zu reduzierenden Substanzspektrums im Vergleich zu den EU-KARL Anforderungen zur Mikroschadstoffreduktion allein). Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen hierbei ein großes Synergiepotential zwischen der vierten Reinigungsstufe und der weitergehenden Desinfektion von kommunalem Abwasser (FlexTreat, 2024).

Liegen keine weitergehenden Reinigungsziele vor, so können die optionalen 5 % in der Gewichtung der Matrix vernachlässigt werden oder anderen, als wichtig erachteten Aspekten zugeschrieben werden.

3.3.3 Hauptkriterium Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit ist aktuell mehr denn je Bestandteil gesellschaftlicher und politischer Diskussion. Insbesondere bei Umweltprojekten steigt die Bedeutung von Nachhaltigkeit zunehmend. In der EU-KARL ist sie insbesondere in Artikel 11 in Form der Energieneutralität (häufig auch erweitert als Klimaneutralität diskutiert) für den Abwassersektor von konkreter Bedeutung.

Bei der Bewertung von Technologieentscheidungen ist deshalb neben dem Hauptkriterium der Reinigungsleistung die Nachhaltigkeit heutzutage der wichtigste Aspekt geworden, um höchsten Anforderungen an eine belastbare Bewertung und einer langfristig nachhaltigen Technologieentscheidung gerecht zu werden.

Zur quantitativen Bewertung von Nachhaltigkeit setzt sich in der Praxis mehr und mehr die CO₂e-Bilanz als Werkzeug durch. Teil davon sind insbesondere der Energiebedarf und der Ressourcenschutz (siehe auch LANUK-Fachbericht „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Bestandsaufnahme zu Kosten, Energiebedarf und Nachhaltigkeit“, im Folgenden „LANUK NRW, 2026, noch unveröffentlicht“).

Energiebedarf (15 %)

Der Energiebedarf lässt sich im Rahmen einer Bilanzierung quantitativ ermitteln und als vergleichendes Kriterium für die Verfahrensauswahl heranziehen (LANUK NRW, 2026, noch unveröffentlicht). Pauschale Aussagen zu dem Energiebedarf je Verfahrensvariante sind nicht möglich, sondern es erfordert eine individuelle Betrachtung je nach Ausführung und Situation vor Ort. Auch wenn der Strombedarf einer Verfahrensvariante höher ist, können die CO₂e-Emissionen im Vergleich aufgrund anderer Betriebsmittel trotzdem besser ausfallen. Derartige Zusammenhänge werden in der CO₂e-Bilanz berücksichtigt, weshalb diese zusätzlich zu einer reinen Energiebetrachtung heranzuziehen ist.

Neben der Ozonerzeugung aus Flüssigsauerstoff beeinflussen erforderliche Pumpwerke und andere verfahrensspezifische Komponenten den Energiebedarf. Insbesondere Raumfiltrationsverfahren wie die GAK-Filtration zeichnen sich im Gegensatz zu einer Ozonung durch hohe hydraulische Verluste aus, welche einen hohen Energiebedarf bedingen. Demgegenüber ist der Einsatz von PAK in der Regel mit einem geringeren Energiebedarf verbunden, sofern kein Raumfilter zur PAK-Abtrennung eingesetzt wird.

Ressourcenschutz (5 %)

Der Ressourcenschutz kann vielseitige Aspekte wie z. B. den Material- und Ressourcenverbrauch, stoffliche Kreislaufführung, Flächenverbrauch und CO₂e-Emissionen berücksichtigen. Um den Ansprüchen einer zukunftsgerechten und nachhaltigen Investitionsentscheidung vollumfänglich gerecht zu werden, hat sich in der Praxis zumeist eine CO₂e-Bilanz etabliert. Für mehr Details zur Erstellung einer CO₂e-Bilanz wird auf den LANUK-Fachbericht „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Bestandsaufnahme zu Kosten, Energiebedarf und Nachhaltigkeit“ (2026, noch unveröffentlicht) verwiesen. Hierdurch wird eine separate ökologische Emissionsbetrachtung ermöglicht, die die qualitative Aussagekraft der Bewertungsmatrix an dieser Stelle deutlich verbessert. Der Ressourceneinsatz wird über die entsprechenden CO₂-Äquivalente berücksichtigt.

Insbesondere die bewusste Anpassung von Vergabekriterien in der Praxis wird mitentscheiden, inwieweit man bereit ist, neben den wirtschaftlichen Kriterien auch ressourcenschonende Aspekte maßgeblich zu fördern.

Der Betriebsmittelverbrauch hat einen besonders großen Einfluss auf die CO₂e-Bilanz der vierten Reinigungsstufe. Hierbei sind folgende Entwicklungen deutlich erkennbar:

- Vor dem Hintergrund der zurzeit noch nicht möglichen Reaktivierung von pulverisierter Aktivkohle und dem Vorteil der Reaktivierung von granulierter Aktivkohle ist das Bestreben im Markt, hier zukünftig noch bessere Lösungen zu erzielen, ungebrochen hoch. Die Verwendung von biogener Aktivkohle wird zunehmend an Bedeutung gewinnen, um auch in diesem Aspekt dem Ziel der Nachhaltigkeit möglichst nahe zu kommen (LANUK NRW, 2026, noch unveröffentlicht). Dies spiegelt sich bereits in der aktuellen Marktsituation und einem Bestreben der Aktivkohlehersteller hin zu biogenen Rohstoffen wider (DWA-AG 8-6, 2024). Auch in aktuellen Projekten in der Praxis finden sich entsprechende Entwicklungen (u. a. Alt et al., 2024).
- Der Einfluss der aufgewendeten Energie (z. B. insb. bei der Ozonerzeugung) auf den CO₂e-Fußabdruck ist insbesondere vom verwendeten Strommix abhängig. So wird sich, je nach Anteil der Eigenenergie der Kläranlage, der CO₂e-Fußabdruck zukünftig stets mit dem deutschen Strommix bzw. dem individuellen Strommix der Kläranlage verändern (LANUK NRW, 2026, noch unveröffentlicht).

3.3.4 Hauptkriterium Planung

Als klassisches Kriterium der Projektplanung gelten die Vor-Ort-Randbedingungen und damit die bestehenden Platzverhältnisse und der zugehörige Flächenbedarf der einzelnen Verfahrensvarianten der vierten Reinigungsstufe. Ebenso kann die Möglichkeit eines stufenweisen Ausbaus der in Betracht kommenden Verfahrensstufe im Hinblick auf langfristige und ggf. bislang noch nicht definierte Reinigungsziele sowie möglichen zusätzlichen

Kläranlagenanschlüssen berücksichtigt werden. Beide Aspekte sind für eine Vielzahl von Betreibenden nach wie vor von besonderem Interesse. Die Möglichkeit der zeitlichen Streckung von erforderlichen Maßnahmen im Fall des stufenweisen Ausbaus kann bei Investitionsentscheidungen eine besondere Rolle spielen.

Platzverhältnisse / Flächenbedarf (5 %)

In Nordrhein-Westfalen werden viele Kläranlagen unter beengten Platzverhältnissen betrieben. Nichtsdestotrotz gibt es immer wieder Beispiele von Kläranlagen, die genügend Flächenangebote für zukünftige Erweiterungen zur Verfügung stellen können.

Lösungskonzepte mit einer Direktdosierung von PAK, z. B. im Belebungsbecken mit einer Filtration, können ähnlich wie das Ozonverfahren mit anschließender Filtration einen sehr geringen Platzbedarf aufweisen. Dem gegenüber sind Verfahrenskombinationen von z. B. Ozon und GAK wie auch Verfahrenskonzepte einer GAK-Filtration mit einem vergrößerten Flächenbedarf verbunden. Die Bewertung des Flächenbedarfes anhand von Lageplandarstellungen ist einfach möglich und verdeutlicht den Flächenbedarf visuell wie auch mit konkreten Angaben.

Option für stufenweisen Ausbau der vierten Reinigungsstufe (5 %)

Im Hinblick auf zukünftige Anforderungen an die Abwasserreinigung ist es entscheidend, Synergieeffekte zwischen der Mikroschadstoffreduktion und z. B. einer weitergehenden Phosphorelimination frühzeitig in der Planung zu berücksichtigen. Dabei sollte die Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion nicht isoliert betrachtet, sondern in eine übergeordnete Gesamtkonzeption eingebunden werden, die mögliche Erweiterungen und zusätzliche Reinigungsziele von Beginn an berücksichtigt.

Ein mögliches Szenario sieht vor, zunächst die weitergehende Phosphorelimination – etwa durch den Einsatz einer Tuchfiltration – zu realisieren. Diese kann bereits so dimensioniert und angeordnet werden, dass sie später mit einer vorgeschalteten PAK-Dosierung sowie entsprechenden Misch- und Kontaktbecken ergänzt werden kann. Auf diese Weise ließe sich die Anlage mit vergleichsweise geringem Mehraufwand um eine Mikroschadstoffreduktion erweitern. Ein alternatives Vorgehen wäre die stufenweise Realisierung einer Ozonung mit anschließender biologischer Nachbehandlung (z. B. Wirbelbettreaktor) in Kombination mit einer nachgeschalteten Tuchfiltration zur Phosphorelimination. In diesem Fall ist es weniger entscheidend, welche Verfahrensstufe zuerst errichtet wird. Wesentlich ist vielmehr, dass im Sinne eines wirtschaftlichen Gesamtkonzepts ausreichend Platzreserven eingeplant und eine hydraulisch sinnvolle Anbindung, z. B. im Rahmen eines Grobkonzepts berücksichtigt werden.

Darüber hinaus könnte die Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion so ausgelegt werden, dass diese zukünftig um weitere Verfahren mit komplementären Wirkprinzipien ergänzt werden kann. So könnte beispielsweise zunächst eine Ozonung mit entsprechender Nachbehandlung errichtet und zu einem späteren Zeitpunkt um eine GAK-Filtration oder eine Tuchfiltration mit PAK-Dosierung erweitert werden.

Zusammenfassend ist die Mikroschadstoffreduktion nicht nur als einzelne Verfahrensstufe, sondern in einem Gesamtkonzept mit möglichen weiteren Anlagenerweiterungen zu betrachten. Die unterschiedlichen Verfahren der Mikroschadstoffreduktion bieten verschiedene Möglichkeiten der stufenweisen Erweiterung, auch in Abhängigkeit der örtlichen Randbedingungen und Anforderungen, welche individuell zu betrachten sind.

3.4 Gesamtbewertung inkl. Wirtschaftlichkeit

Die Bewertung der jeweiligen Zwischenergebnisse der einzelnen Hauptkriterien ermöglicht eine schrittweise Vorgehensweise zum besseren Verständnis der nicht-monetären Kriterien. Aufgrund der hohen Wichtung von z. B. 70 %, wie am Beispiel der vorgestellten Bewertungsmatrix, sind die nicht-monetären Aspekte dominant und stellen damit einen wesentlichen Teil der Entscheidungsgrundlage zum Verfahrensvergleich dar.

Aus Erfahrungen bietet es sich an, die jeweiligen Hauptkriterien und deren Unterkriterien intensiv im Projektteam aus Betreibenden und Planenden zu diskutieren und die Gewichtung der zugehörigen Kriterien vorab festzulegen. Diese gestufte Vorgehensweise ermöglicht ein besseres Verständnis aller einzelnen Kriterien im Projektteam und sensibilisiert für die Projektziele und deren Auswirkungen. Die Transparenz eines gestuften Vorgehens in zwei Schritten ermöglicht eine weitgehende Neutralität zugunsten einer objektiven Betrachtung.

Die zugehörige **Gesamtbewertung** mit den separaten Zwischenergebnissen der

- nicht-monetären und
- monetären Aspekte (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung)

schaftt darüber hinaus die Grundlage, über die monetären Aspekte im Vergleich zu den nicht-monetären Aspekten zu diskutieren. Häufig ergibt sich eine unterschiedliche Reihenfolge der Lösungskonzepte, da nicht immer die günstigsten auch mit der besten Bewertung z. B. der Kriterien des Betriebs, der Reinigungsleistung oder der Nachhaltigkeit einhergehen.

Grundsätzlich ist eine **Sensitivitätsbetrachtung** ein weiterer Schritt zum verbesserten Gesamtverständnis der Bewertung und dies sollte nicht nur dann gemacht werden, wenn zwei verschiedene Lösungskonzepte sehr nahe beieinanderliegen. In der Praxis kommt es immer wieder vor, dass eine Entscheidung auf den ersten Blick nur schwer möglich erscheint. Hier hilft die Sensitivitätsbetrachtung und kann weitere Orientierung bzw. Entscheidungsunterstützung bieten. Dies sollte nicht nur dazu führen, dass z. B. die nicht-monetären Aspekte statt mit 70 % höher oder niedriger gewichtet werden, um deren Einfluss zu bewerten, sondern neue bewertete Unterkriterien können auch bei gleichbleibenden Hauptkriterien zu Veränderungen der Gesamtbewertung führen. Eine deutliche Erhöhung des Unterkriteriums der weitestgehenden Phosphorelimination bis hin zum genauen Gegenteil (die Phosphorelimination ist kein Projektziel) schafft eine voll umfängliche Transparenz, die Bewertungsmatrizen grundsätzlich ermöglichen. Einfache Excel-Tabellen sind von allen Projektbeteiligten ohne großen Aufwand veränderbar, um eine individuelle Einzelbewertung vornehmen zu können.

4 Zukünftige Herausforderungen und Ausblick

Die zukünftigen Herausforderungen zum Thema Mikroschadstoffe im Abwasser stehen unter anderem in Zusammenhang mit EU-KARL und den Anforderungen an den Gewässerschutz gemäß EU-WRRL. In Abbildung 16 sind einige dieser Herausforderungen dargestellt (nicht abschließend).

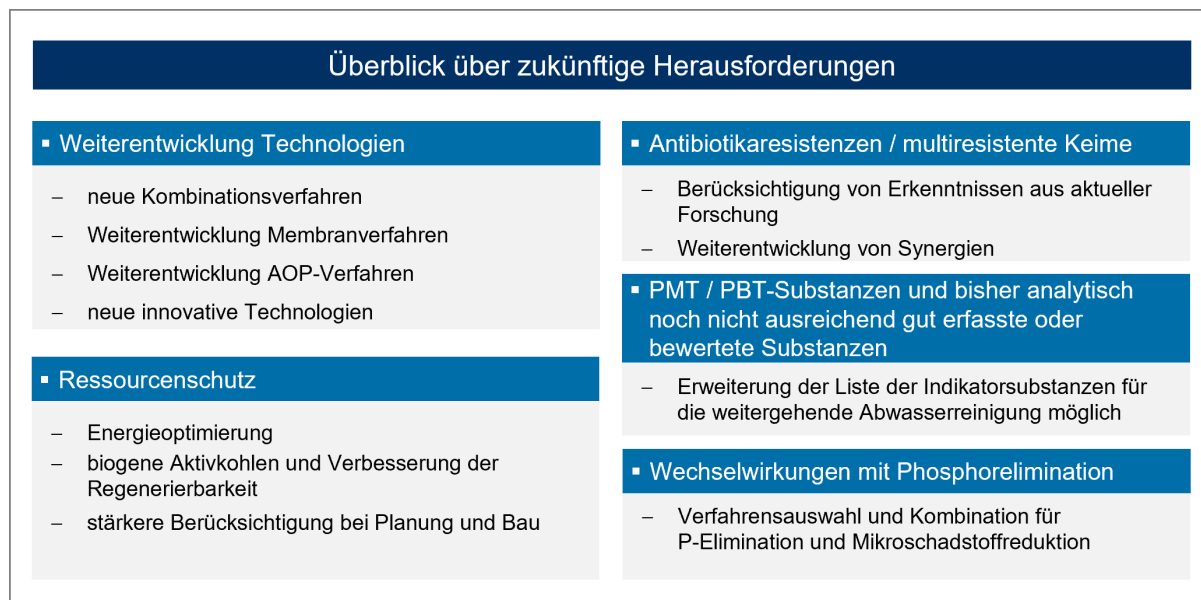


Abbildung 16: Ausgewählte zukünftige Herausforderungen

Neben den gängigen Verfahren der Ozonung, dem Einsatz von pulverisierter und granulierter Aktivkohle nehmen aktuell Kombinationsverfahren und neue, innovative Technologien an Bedeutung zu (z. B. GAK im Schwebebett, Direktdosierung PAK, Starkwasserozonung etc.). Die Betriebserfahrungen in der großtechnischen Anwendung werden zeigen, ob es den neuen Verfahrenstechnologien gelingt, die angestrebte Reduktionen betriebsstabil zu erreichen und sich am Markt wirtschaftlich zu etablieren. Der zunehmende Einsatz von MBR-Technik in Verbindung mit Ozon oder Aktivkohle zur Mikroschadstoffreduktion ist in diesem Kontext aktuell in Nordrhein-Westfalen und deutschlandweit ebenfalls festzustellen und zeigt die positive Dynamik derzeitiger Veränderungen auf.

Eine besondere Bedeutung hat in diesem Zusammenhang die Änderung der europäischen Richtlinie über Umweltqualitätsnormen (UQN) 2008/105/EG, die mit der Richtlinie 2026/805/EU geändert wurde. Die Änderungsrichtlinie wurde am 20. April 2026 veröffentlicht und ist am 10. Mai 2026 in Kraft getreten. Die Mitgliedstaaten müssen die neuen Anforderungen bis zum 21.12.2027 in nationales Recht umsetzen.

Für den Stoff Diclofenac wird durch die Änderungsrichtlinie eine Jahresdurchschnittsnorm (JD-UQN bzw. AA-EQS, annual average environmental quality standard) in Höhe von 0,04 µg/l vorgegeben. Bei sehr hohen Zulaufkonzentrationen von Diclofenac zur vierten Reinigungsstufe, einer hohen Belastung des Gewässers durch die Kläranlage und/oder eine hohe Vorbelastung des Gewässers aus oberhalb der Einleitstelle gelegenen Kläranlagen kann der vorgegebene JD-UQN-Wert in der Mischungsrechnung unter Umständen nicht erreicht werden. Darüber hinaus könnte sich mit der Umsetzung der UQN-Richtlinie über die

Oberflächengewässerverordnung in bundesdeutsches Recht im Einzelfall Reinigungsanforderungen ergeben, die den Vorgabewert der EU-KARL mit einer mittleren Reduktion der betrachteten zwölf Einzelsubstanzen in Höhe von 80 % übersteigen.

Es ist daher nicht auszuschließen, dass eine immissionsseitige Betrachtung der Mikroschadstoffreduktion über die Anforderungen der EU-KARL hinaus zusätzlich an Bedeutung gewinnen und eine Individualbetrachtung von Kläranlagen in Verbindung mit einer Priorisierung des Anlagenausbaus erforderlich werden kann. Kombinationsverfahren und modular aufgebaute Reinigungsstufen mit einer Erweiterbarkeit auf ergänzende oder modifizierte Verfahren können in diesem Fall zusätzliche Sicherheiten für Behörden wie auch Planer und Betreiber von kommunalen Kläranlagen bieten und sollten ggf. mit angedacht werden.

Vor dem Hintergrund der gesellschaftspolitischen Diskussion des Klimaschutzes wird der Stellenwert der Nachhaltigkeit auch in der Mikroschadstoffreduktion zunehmen und zukünftig stärker als bisher planerisch beachtet werden müssen. Die Verfahrensauswahl als einer der ersten Schritte der Planung wird zukünftig noch komplexer, um dem Ziel der ganzheitlichen Planung unter Berücksichtigung aller relevanten Kriterien gerecht zu werden. Bereits heute sollten auch Antworten auf die Fragen von morgen gefunden werden, die die Zukunftsfähigkeit der Verfahrenskonzepte aufzeigen und deren Anpassungsfähigkeit bei veränderten Rahmenbedingungen ausreichend flexibel unter Beweis stellen. Diesem Anspruch ist u. a. durch eine frühe Festlegung der Projektziele der Mikroschadstoffmaßnahmen und eine sehr hohe Planungsqualität zu begegnen.

Als Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung sind Bewertungsmatrizen seit langer Zeit fachlich anerkannt und müssen um aktualisierte Kriterien nach heutigen und zukünftigen Maßstäben angepasst werden. Die Ermittlung einer CO₂e-Bilanz der verschiedenen Verfahrenskonzepte sowie die vergleichende Bewertung sollten zukünftig in Zusammenhang mit den Nachhaltigkeitsaspekten ein wesentliches Kriterium in der Anwendung von Bewertungsmatrizen sein. Darüber hinaus sind die Wechselwirkungen zu den möglichen Zielen der weitergehenden Phosphorelimination bereits in einem sehr frühen Planungsstadium zu berücksichtigen, um die optimale Verfahrenstechnologie unter Beachtung der Gewässerschutzziele zu finden.

Die CO₂ Emissionen der Mikroschadstoffreduktion sind nach wie vor als hoch zu bezeichnen, weshalb die Energieoptimierung und insbesondere der weitergehende Ressourcenschutz zukünftig noch mehr zu beachten sein werden. Die Entwicklung von biogenen Aktivkohlen und die Verbesserung der Regenerierbarkeit von Aktivkohle sind Beispiele des Bestrebens am Markt, dem Ideal der Nachhaltigkeit näher zu kommen. Die Anpassung von Vergabekriterien in der Praxis wird darüber hinaus zeigen, inwieweit Betreibende kommunaler Kläranlagen bereit sind, neben den wirtschaftlichen Kriterien auch ressourcenschonende Aspekte maßgeblich zu fördern und bei der Verfahrensauswahl zu berücksichtigen.

Das Thema der zunehmenden Abundanz von Antibiotikaresistenzen bzw. der multiresistenten Keime in der Umwelt sowie Möglichkeiten für deren Reduktion sind nach wie vor Bestandteil von Forschungsprojekten (LANUV, 2024). Kommunale Kläranlagen, insbesondere solche mit einem hohen Einfluss aus Einrichtungen des Gesundheitswesens, wurden für den Eintrag in aquatische Ökosysteme als relevante Punktquellen von antibiotikaresistenten Bakterien und Resistenzgenen identifiziert. Erste Projektergebnisse zeigen, dass Synergien zur Reduktion von Mikroschadstoffen möglich sind (FlexTreat, 2024).

Im Rahmen der Erarbeitung eines Vorschlags der EU-KARL standen im Kontext der Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen erstmals auch so genannte „substances of high risk“ zur Debatte (EU, 2023). Zwar wurden die Vertreter Perfluorooctansulfonsäure (PFOS), Beta-Estradiol, Bisphenol A und Telmisartan letztlich nicht in die Liste der Indikatorsubstanzen für die weitergehende Abwasserbehandlung der EU-KARL aufgenommen, jedoch werden durch die Änderungsrichtlinie 2026/805/EU weitere Substanzen relevant. Somit gelten beispielsweise für PFAS als Summe von 25, Beta-Estradiol und Bisphenol A zukünftig die in der Änderungsrichtlinie angegebenen UQN. Die aktuell etablierten Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion besitzen ein sehr geringes Reduktionspotential der genannten Substanzen, sodass hier auf Kläranlagen weiterer Forschungsbedarf besteht und ggf. weitere Aufbereitungsschritte notwendig werden können. Dies unterstreicht die Bedeutung der bisher nicht etablierten, aber leistungsfähigen Verfahren wie bspw. AOP, dichte Membranverfahren, Ionenaustauschern oder auch von alternativen Adsorbentien. Die Notwendigkeit der Kenntnis über das Verfahrensportfolio sowie die Verfahrensvorauswahl wird daher aufgrund der aktuell fortschrittlichen Weiterentwicklung der Verfahrenstechnologien zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AOP	Advanced Oxidation Processes (Erweiterte Oxidationsprozesse)
BAK	Biologische Aktivkohlefilter
BB	Belebungsbecken (biologische Abwasserbehandlung)
BG	Bestimmungsgrenze
BWP	Bewirtschaftungsplan
BV	Bettvolumen
CO _{2e}	CO ₂ Äquivalente
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DACH-Region	Deutschland, Austria (Österreich) und Confoederatio Helvetica (Schweiz)
DOC	Dissolved Organic Carbon (Gelöster Organischer Kohlenstoff)
EU-KARL	Europäische Kommunalabwasserrichtlinie
EU-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
EW	Einwohnerwert
GAK	Granulierte Aktivkohle
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
JAM	Jahresabwassermenge
KomS	Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg
LANUK NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen
LOX	Liquid Oxygen (Flüssigsauerstoff)
MBR	Membranbioreaktor
NF	Nanofiltration
O ₃	Ozon
PAK	Pulveraktivkohle
PBT	persistent, bioakkumulierend, toxisch
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
PMT	persistent, mobil, toxisch
RBF / RBF ^{plus}	Retentionsbodenfilter / Retentionsbodenfilter plus
SAK ₂₅₄	Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm
SF	Sandfilter
TF	Tuchfilter
UF	Ultrafiltration
UQN	Umweltqualitätsnorm
UV	Ultraviolett-Strahlung
4. RS	Vierte Reinigungsstufe

Literaturverzeichnis

- Ahring, A.; Zacharias, N.; Seiger, D.; Lüchtefeld, C.; Essert, S.M.; Marxer, A.; Gattke, C.; Keller, T.; Kistemann, T. (2024): „Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Antibiotika und Antibiotikaresistenzen im Abwasser (ARA) - Untersuchung des regionalen Beitrags klinischer Abwässer zur Belastung der aquatischen Umwelt und Praxiserprobung innovativer Verfahren der weitergehenden Abwasserbehandlung“, Erftverband, Bergheim und Institut für Hygiene und Public Health des Universitätsklinikums Bonn.
- Alt, K. (2018): „Umbau von Flockungsfiltrationsanlagen zu Aktivkohle- / Ozonanlagen“, Vortrag im Rahmen Veranstaltung Oswald Schulze Stiftung, 27. September 2018.
- Alt, K.; Beckhoff, M.; Sterzenbach, P. (2024): „MBR und Tuchfilter mit PAK-Dosierung als wirtschaftliche Alternative?“, Beitrag im Rahmen VSA Micropoll-Fachtagung Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA, Erfahrungen und Ausblick, 12. März 2024, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA.
- Alt, K.; Sterzenbach P. (2025): „KARL-Richtlinie – zukünftige Auswirkungen auf die 4. Reinigungsstufe, aktuelle Beispiele aus der Praxis“ Beitrag im Rahmen der DWA Fachtagung forum:mikroschadstoffe am 23.09.2025 in Gelsenkirchen.
- Alt, K.; Wunderlich B.; Bruhn G. (2022): 10 Jahre erfolgreicher Einsatz von granulierter Aktivkohle beim Abwasserverband Obere Lutter, Fachbeitrag in: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2022 (69) Nr 5, S. 399 – 405.
- ASKURIS (2016): „Anthropogene Spurenstoffe und Krankheitserreger im urbanen Wasserkreislauf, Bewertung, Barrieren und Risikokommunikation (ASKURIS)“, Hrsg.: Jekel, M.; Ruhl, A.S. / Universitätsverlag der TU Berlin, 2016; DOI 10.14279/depositonce-4979 <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-4979>.
- Baresel, C.; Salem, M.; Roberts, R.; Malovanyy, A.; Lemström, H.; Esfahani, B. (2024): „Approaching Breakthrough: Resource-Efficient Micropollutant Removal with MBR-GAC Configuration“, Appl. Sci. 2024, 14(17), 7759; <https://doi.org/10.3390/app14177759>.
- Bastian, D. (2023): „Das Membranbelebungsverfahren mit simultaner Dosierung von Pulveraktivkohle in der kommunalen Abwasserreinigung“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, DOI: [10.18154/RWTH-2023-05548](https://doi.org/10.18154/RWTH-2023-05548), URL: <https://publications.rwth-aachen.de/record/959047/files/959047.pdf>.
- Bastian, D.; Drensla, K.; Baumgarten, S.; Wachendorf, N.; Thiemig, C.; Ehlen, K.; Le, H.; Montag, D.; Wintgens, T. (2021): Bewertung und Optimierung des Betriebs von Membranbioreaktoren bei simultaner Pulveraktivkohle-Zugabe – MBR-AKTIV. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Böhler M., Joss A., Mc Ardell C., Brander A. (2023): Faktenblatt – aktueller Stand diskontinuierlich gespülte GAK-Filter zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Konsenspapier zum Ergebnis eines Workshops mit Fachexperten aus der Schweiz und Deutschland, Eawag und VSA, Dübendorf. Aktualisierte Version 2 des Konsenspapiers von 2020.
- Böhler, M.; Rohrbach S.; Thum, K.; Kumin, R.; Mendler, M.; Bühler, A.; Dittmann, M.; Noordink, M.; Wiesmann, K.; Sprick O. (2025): „ARA Höfe – Pilotversuch Ozonung mit System «ELOZONIQ» von ELIQUO“, Vortrag im Rahmen Erfa-Treffen Ozonung, AV Höfe, Freienbach, 04.09.2025, URL: <https://micropoll.ch/wp->

[content/uploads/2025/09/Erfa-Treffen-2025-auf-ARA-Hoefe-Vorstellung-Pilotversuch.pdf](#), zuletzt abgerufen am 05.11.2025.

- Brunsch, A.; Beyerle, L.; Knorz, K.; Brepols, C.; Dahmen, H.; Christoffels, E.; Schäfer, H. (2020): Retentionsbodenfilter zur Entfernung von Mikroschadstoffen aus Mischwasserabschlägen und Kläranlagenablauf. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 67, Nr. 10, 780-788. <https://ibc-ingenieure.com/wp-content/uploads/2020/10/KA-2020-10-RBFplus-Artikel.pdf>
- DWA-A 198 (Stand Februar 2022): „Ermittlung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen“, Gelbdruck zum Arbeitsblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef 1. Auflage, Ausgabe 02/2022.
- DWA-A 202 (2011): „Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser“, DWA-Regelwerk. Hrsg. ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-AG 8-6 (2024): Expertengespräch „Aktivkohlen aus Biomasse für eine nachhaltige Abwasserreinigung - Forschung trifft Praxis“ am 21.03.2024 in Kassel, Fachbeitrag In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2024 (71) Nr 6, S. 451 – 453.
- DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 (2025): „Feststoff- und Phosphorelimination mit Aktivkohlefiltern“, Fachbeitrag In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2025 (72) Nr 7, S. 500 – 507.
- DWA-M 1200-1 (Stand Juli 2025): „Wasserwiederverwendung für landwirtschaftliche und urbane Zwecke in Deutschland – Teil 1: Grundsätze zur Wasserwiederverwendung für unterschiedliche Nutzungen“, Gelbdruck zum Merkblatt mit Stand Juli 2025, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef.
- DWA-M 285-3 (Stand April 2026): „Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 3: Einsatz von Ozon – Verfahrensgrundsätze und Bemessung“, Merkblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 2. Auflage, Hennef.
- DWA-M 227 (2014): „Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren)“, Merkblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef 2014
- DWA-M 285-1 (Gelbdruck in Vorbereitung für 2026): „Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 1: Kriterien der Verfahrensauswahl mit ausgewählten Beispielen“, Gelbdruck zum Merkblatt in Vorbereitung für 2026, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef.
- DWA-M 285-2 (2021): „Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung“, Merkblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 1. Auflage, Hennef.
- Ederer, J.; Hübner, U.; Drewes, J. E.; Senn, K.-J.; Werner, G.; Schüler, R. (2017): „Entwicklung und Validierung eines neuen, energieeffizienten Ozoneintragssystems zur Reduzierung von anthropogenen Spurenstoffen in gereinigtem Abwasser“, Abschlussbericht gerichtet an Deutsche Bundesstiftung Umwelt, DBU, Förderkennzeichen 32879/01-23, Garching.
- EU (2023): Report on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast). Report – A9-0276/2023. European Parliament. Brüssel. URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0276_EN.html, zuletzt abgerufen am 13.05.2026.

- EU (2025): „European Green Deal: Commission proposes rules for cleaner air and water“
URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6278.
- FlexTreat (2025): „Flexible und zuverlässige Konzepte für eine nachhaltige Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft [FlexTreat]“, Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben 02WV1561A-L, Projektlaufzeit 06/2021 – 10/2024.
- Fundneider, T. (2020): „Filtration und Aktivkohleadsorption zur weitergehenden Aufbereitung von kommunalem Abwasser – Phosphor- und Spurenstoffentfernung“, Dissertation, Schriftenreihe IWAR, Bd. 259, Technische Universität Darmstadt, ISBN: 978-3-940897-60-2.
- Gehrke, I.; Bornemann, C.; Raber, W.; Czapla, J.; Ulbrich, S.; Bitter, E. (2021): Neue Adsorptionsmaterialien und Regenerationsverfahren zur Elimination von Spurenstoffen in kommunalen und industriellen Kläranlagen. ZeroTrace: Schlussbericht. Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung. Berlin.
- Hillebrandt, D.; Firk, J.; Otto, U.; Gohlke, J. (2024): „Verfahrenskombination Ultrafiltration / Aktivkohlefiltration – Unsere Erfahrungen“, Vortrag 5. Juni 2024 im Rahmen 13. KomS Technologieforum n Uhdlingen, Baden-Württemberg.
- Hübner, U.; Spahr, S.; Lutze, H.; Wieland, A.; Rüting, S.; Gernjak, W.; Wenk, J. (2024): „Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – Guidance for systematic future research“, Heliyon 10 (2024) e30402, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402>.
- Hunziker BetaTech (2024): „Auswertung der Energie- und Kostenkennzahlen von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA“, Eine Studie im Auftrag des VSA, Technischer Bericht Objekt Nr. 1490.26, Winterthur.
- HybridGAK (2024): „Einsatzmöglichkeiten und Grenzen der hybriden Nutzung eines GAK-Filters zur Elimination von Phosphor und Mikroschadstoffen“, laufendes F&E-Projekt, Universität Duisburg-Essen, URL: https://www.uni-due.de/imperia/md/content/wasser-technik/ank%C3%BCndigung_hybrid_gak.pdf.
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- Judd, S. (2010): The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment. Elsevier.
- Klaer, K. (2019): „Dimensionierung und Betriebsoptimierung von Anlagen zur Ozonung kommunaler Abwässer zur Spurenstoffelimination und Desinfektion“, Dissertation, Reihe „Gewässerschutz – Wasser – Abwasser“, Bd. 259, Aachen: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e. V., 1. Auflage, ISBN 978-3-938996-55-3.
- KomS (2018): „Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination“, Herausgeber: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart.
- KomS (2020): „Leitfaden – Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen“, Herausgeber: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart.

- KOM-M.NRW (2016): „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination – 2. Auflage“, Herausgeber: ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW, Köln.
- LANUV NRW (2024): „Klinisch-relevante antibiotikaresistente Bakterien in Abwasser und Fließgewässern in NRW – Ergebnisse aus dem LANUV-ARB-Projekt“. LANUV-Fachbericht 155 veröffentlicht unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/publ/3_fachberichte/LANUV-Fachbericht_155.pdf.
- LANUK NRW (2025, Entwurf mit Stand November 2025): „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: *Grundlagen für Planung, Betrieb und Überwachung*“. LANUK-Fachbericht als Entwurf veröffentlicht unter URL: https://mikroschadstoffe.nrw.de/fileadmin/lanuv/fis/mikroschadstoffe/publikationen_ab_2025/Entwurf_LANUK-Fachbericht_Mikroschadstoffreduktion_auf_Klaeranlagen_in_NRW_Grundlagen_fuer_Planung_Betrieb_und_Ueberwachung_2025.pdf.
- LANUK NRW (2026, noch unveröffentlicht): „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Bestandsaufnahme zu Kosten, Energiebedarf und Nachhaltigkeit“. LANUK-Fachbericht in Vorbereitung.
- LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). 8. überarbeitete Auflage, Herausgabe in Kooperation DWA und DVGW.
- Melin, T., & Rautenbach, R. M. (2007). „Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-34328-8.
- Miklos, D. B.; Remy, C.; Jekel, M.; Linden, K. G.; Drewes, J. E.; Hübner, U. (2018): „Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment e A critical review“, Water Research 139 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.042>.
- Morgenschweis, C. (2025): „Gemeinsame Elimination von Spurenstoffen, Phosphor und Stickstoff mit der Kombinationstechnik O3-STEP“, waternet, waterschap amstel gooi en vecht gemeente amsterdam, Vortrag im Rahmen KomS Web-Seminar.
- MULNV (2021): „Maßnahmenprogramm 2022-2027 für die nordrhein-westfälischen Anteile von Rhein, Weser, Ems und Maas“, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV NRW), Düsseldorf, 2021 (<https://flussgebiete.nrw.de/bewirtschaftungsplan-2022-2027-fuer-nrw>, zuletzt eingesehen am 18.6.2025).
- Richtlinie 2006/7/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Februar 2006 über die Qualität von Badegewässern und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160/EWG. Amtsblatt der Europäischen Union L 64, 4, 4.3.2006.
- Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG. Amtsblatt der Europäischen Union L 348, 24.12.2008.
- Richtlinie (EU) 2024/3019 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser. Amtsblatt der Europäischen Union L, 2024/3019 vom 12.12.2024.
- Richtlinie (EU) 2026/805 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. März 2026 zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, der Richtlinie

- 2006/118/EG zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung und der Richtlinie 2008/105/EG über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Union L, 2026/805 vom 20.04.2026.
- RedOxa (2022): „Reduzierung des Ozon-Oxidationsaufwandes für Spurenstoffe in Kombination mit Aktivkohlefiltration im Klärwerk Köln-Rodenkirchen“, gefördert im Rahmen Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW (ResA II), Autor:Innen: Kohlgrüber, V.; Baur, B.; Hartenberger, M.; Poppe, A.; Bomba, A.; Wintgens, T.; Schölzel, S.; Reiser, B.; Rubin, V.; Henneke, L.; Linnemann, V.; Montag, D..
- Satyam, S. & Patra, S.: „The Evolving Landscape of Advanced Oxidation Processes in Wastewater Treatment: Challenges and Recent Innovations“, Processes 2025, 13, 987, <https://doi.org/10.3390/pr1304098>.
- Sauter, D.; Stange, C.; Schumacher, V.; Tiehm, A.; Gnirss, R.; Wintgens, T. (2021): „Impact of ozonation and biological post-treatment of municipal wastewater on microbiological quality parameters“, Environ. Sci.: Water Res. Technol., 2021,7, 1643-1656, <https://doi.org/10.1039/D1EW00312G>.
- Sauter, D.; Gnirss, R.; Wintgens, T. (2024): „Analysis of design criteria for biological post-treatment of ozonated wastewater treatment plant effluent“, Environ. Sci.: Water Res. Technol., 2024, 10, 860-876.
- SOLIDUS (2022): „Dimensionierung großtechnischer GAK-Filter durch die Ermittlung der erzielbaren Feststoffbelastungen und Spülintervalle“, Autor:innen: Schölzel, S.; Reiser, B.; Palmowski, L.; Wintgens, T.; Frindi, S.; Zydorczyk, S.; Alt, K.; Benstöm, F.; Bericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Stadt Mörfelden-Walldorf (2025): „Kläranlage Mörfelden-Walldorf“, URL: <https://www.moerfelden-walldorf.de/de/rathaus/gesellschaften/stadtwerke/klaeranlage/#accordion-1-3>, zuletzt aufgerufen am: 10.11.2025.
- STOWA (2023a): „Pilotonderzoek BO₃ -Technologie“, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), Rapport 53/2023, Amersfoort, ISBN 978.94.6479.024.5 URL:<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202023/STOWA-2023-48-BO3.pdf>, zuletzt abgerufen am: 19.11.2025.
- STOWA (2023b): „Pilot directe nanofiltratie en Uv/Peroxide op RWZI Asten“ Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), Rapport 48/2023 Amersfoort, ISBN 978.94.6479.057.3, URL: <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202023/STOWA-2023-53-nanofiltratie.pdf>, zuletzt abgerufen am: 19.11.2025.
- Thalmann U., Egli C. (2025): „EMV-Kombiverfahren auf der ARA Altenrhein: Fazit nach fünf Betriebsjahren“, Aqua & Gas, Nr. 2, 2025, S. 17 – 21.
- Venditti, S.; Brunhoferova, H.; hansen, J.: „Behaviour of 27 selected emerging contaminants in vertical flow constructed wetlands as post-treatment for municipal wastewater“, Science of The Total Environment, Volume 819, 2022, 153234, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153234>.
- VSA (2016): „Pulveraktivkohle in der Schlammbehandlung“ (Faktenblatt, Stand Mai 2016), Herausgeber: Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ www.micro-poll.ch.
- VSA (2018): „Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung“ (Version 1, Stand April 2018), Autor:Innen: Wunderlin, P.; Thomann, M.; Abegglen, C.; Baggenstos, M.; Blény, H.; Dominguez, D.; Böhler, M.; Frei, R.; Meier, A.; Grelot,

- J., Sommer, M.; Thonney D.; Herausgeber: Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ www.micropoll.ch.
- VSA (2022): „Faktenblatt - Aktueller Stand GAK im Schwebebett“, Stand Oktober 2022, Autor:Innen: Albers, S.; Baggenstos, M.; Casazza, R.; Le Goaziou, Y.; Horisberger, M.; Lambert, M.; Margot, J.; Rieck, T.; Schneider, L.; Fleiner, J.; Morgando, A.; Zölling, H.; oss, A.; Thomann, M.; Liebich, C.; Brander, A.; Eugster, F.; Tama, N.; Herausgeber: Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ www.micropoll.ch.
- VSA (2025b): „GAK im Schwebebett: Kenngrößen und Illustrationen“, Internetseite VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, URL: <https://micropoll.ch/verfahren/aktivkohle/gak-verfahrensfuehrungen/gak-im-schwebett/>, zuletzt aufgerufen am 19.11.2025.
- VSA (2025b): „Micropollutant Elimination in Swiss Wastewater Treatment Plants: Experiences And Developments“ <https://micropoll.ch/Mediathek/micropollutant-elimination-in-swiss-wastewater-treatment-plants-wwtp-experiences-and-developments/>.
- VSA (2026): „Verfahrenskombinationen“, Internetseite VSA-Plattform Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen, URL: <https://micropoll.ch/verfahren/weitere-verfahren/verfahrenskombination/>, zuletzt aufgerufen am 13.02.2026.
- Werner, M., Ji, J., Yin, M., Lutze, H. and Panglisch, S. (2025), Membran-Bioreaktor-Technik kombiniert mit nachgeschalteter Ozonung – Vergleich mit konventionellen Ozonanwendungen. Chemie Ingenieur Technik, 97: 677-688. <https://doi.org/10.1002/cite.202500040>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ausbau kommunaler Kläranlagen zur Mikroschadstoffreduktion in NRW, Stand Februar 2026 © Land NRW 2026	6
Abbildung 2:	Überblick über Technologien und zu unterscheidende Verfahrensvarianten mit Einstufung in etablierte, großtechnisch erprobte und noch in Entwicklung befindliche Verfahren. (Hinweise: Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit, es sind nicht nur die in Nordrhein-Westfalen umgesetzten Verfahren aufgelistet; UV: Ultraviolette Strahlung, H ₂ O ₂ : Wasserstoffperoxid)	9
Abbildung 3:	In Nordrhein-Westfalen umgesetzte oder in Bau befindliche Verfahrensvarianten (Auswertung aus eigenen Umfragedaten für n=35 Kläranlagen; Stand Februar 2025); WB: Wirbelbett	10
Abbildung 4:	Beispiele für ausgeführte Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen, links: Ozongenerator Kläranlage Lemgo, Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo GmbH (Foto: Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo GmbH), Mitte: PAK-Silo Kläranlage Dülmen, Lippeverband (Foto: Hydro-Ingenieure GmbH), rechts: GAK-Kessel Kläranlage Harsewinkel, Stadt Harsewinkel (Foto: Hydro-Ingenieure GmbH).....	11
Abbildung 5:	Verfahrensschema einer Ozonung vor biologischer Nachbehandlung (D = Dosierung)	12
Abbildung 6:	Verfahrensschema der PAK-Verfahrensvariante „PAK-Stufe“ mit Dosierung der Aktivkohle in eine separate Adsorptionsstufe; D: Dosierung	17
Abbildung 7:	Verfahrensschema der PAK-Verfahrensvariante „PAK vor Filter“; D: Dosierung	19
Abbildung 8:	Verfahrensschema der Verfahrensvariante „PAK-Simultandosierung in die biologische Stufe“; D: Dosierung	21
Abbildung 9:	Verfahrensschema der Verfahrensvariante „PAK in MBR“ a) separater Membrantank, b) integrierte getauchte Membran im Belebungsbecken; D: Dosierung.....	22
Abbildung 10:	Verfahrensschema der Verfahrensvariante „GAK-Festbettfiltration“	26
Abbildung 11:	Verfahrensschema der Verfahrensvariante GAK im Schwebebett	29
Abbildung 12:	Verfahrensschema eines beispielhaft ausgewählten Kombinationsverfahrens aus Ozonung und GAK-Filtration; D: Dosierung.....	31
Abbildung 13:	Verfahrensschema eines Retentionsbodenfilters mit Adsorptionsadditiven als Variante einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion	34
Abbildung 14:	Zu berücksichtigende Aspekte für die Vorauswahl zu untersuchender Verfahrensvarianten zur Mikroschadstoffreduktion (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)	42
Abbildung 15:	Beispielhafte Bewertungsmatrix zur Kosten-Nutzen-Betrachtung verschiedener Verfahrensvarianten von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion (PZ = Punktzahl, W = Wichtung, WZ = Wertungszahl)	49
Abbildung 16:	Ausgewählte zukünftige Herausforderungen.....	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fristen für den Ausbau der Kläranlagen zur Reduktion von Mikroschadstoffen gemäß europäischer Kommunalabwasserrichtlinie (EU-KARL, 2025).....	5
Tabelle 2:	Angewandte Kriterien zur Unterscheidung des Reifegrades verschiedener umgesetzter Verfahrensvarianten (Bezug sind hier Referenzen in Deutschland, Schweiz und Österreich)	8
Tabelle 3:	Kläranlage Aachen-Soers als Beispiel für „Ozon vor Nachbehandlung“ in Nordrhein-Westfalen.....	14
Tabelle 4:	Überblick über neue Entwicklungen und aktuelle Projekte zum Einsatz von Ozon zur Mikroschadstoffreduzierung auf kommunalen Kläranlagen	15
Tabelle 5 :	Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK-Stufe“ im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie (nicht abschließend).....	17
Tabelle 6:	Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK vor Filter“ im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie.....	19
Tabelle 7:	Kläranlage Dortmund-Deusen als Beispiel für die Umsetzung „PAK vor Tuchfilter“ in Nordrhein-Westfalen	20
Tabelle 8 :	Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK in Biologie“ im Vergleich zu anderen Verfahrensvarianten derselben Technologie	21
Tabelle 9:	Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „PAK in MBR“ im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie.....	23
Tabelle 10:	Kläranlage Kaarst-Nordkanal als Beispiel für die Umsetzung „PAK in MBR“ in Nordrhein-Westfalen	23
Tabelle 11:	Überblick über neue Entwicklungen und aktuelle Projekte zum Einsatz von PAK	24
Tabelle 12:	Vor- und Nachteile der Technologie "Adsorption an GAK" im Vergleich zu anderen Technologien (nicht abschließend).....	25
Tabelle 13:	Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante GAK-Filtration im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie (nicht abschließend).....	27
Tabelle 14:	Kläranlage Gütersloh-Putzhagen als Beispiel für die Umsetzung „GAK-Filter“ in Nordrhein-Westfalen	28
Tabelle 15:	Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante „GAK im Schwebebett“ im Vergleich zu anderen Varianten derselben Technologie (nicht abschließend).....	29
Tabelle 16:	Überblick über neue Entwicklungen und aktuelle Projekte zum Einsatz von GAK zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen	30
Tabelle 17:	Vor- und Nachteile von Kombinationsverfahren mit Ozon und GAK gegenüber Verfahren mit einzelnen Wirkmechanismen (nicht abschließend).....	32
Tabelle 18:	Überblick über neue Entwicklungen und aktuelle Projekte zu Kombinationsverfahren.....	33
Tabelle 19:	Vor- und Nachteile der Verfahrensvariante Retentionsbodenfilter mit Adsorptionsadditiven	34
Tabelle 20:	Kurzsteckbrief naturnahes Verfahren mit Additiven (Kläranlage Rheinbach, Erftverband).....	35
Tabelle 21:	Aktuelle Entwicklungen im Bereich naturnaher Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion	36
Tabelle 22:	Bewertungsskala der Einzelkriterien	50

Impressum

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK NRW) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 poststelle@lanuk.nrw.de www.lanuk.nrw.de
Fachliche Bearbeitung	Klaus Alt, Pascal Sterzenbach Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH Stockkampstraße 10, 40477 Düsseldorf Dr.-Ing. Gerd Kolisch, Yannick Taudien Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH Untere Lichtenplatzer Straße 100, 42289 Wuppertal Dr.-Ing. Laurence Palmowski, Max Zimmermann Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA), RWTH Aachen University Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
Redaktion und Koordination:	Dr.-Ing. Mareike Evers, Kerstin Menn, Katrin Schulz Fachbereich 57 Kommunales und industrielles Abwasser Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK NRW)
Titelbild	Kläranlage Brilon, Ruhrverband
Stand	April 2026
Veröffentlichung	Juni 2026
ISSN	3052-9409 (Online), LANUK-Fachberichte

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Landesamt für Natur, Umwelt und Klima
Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuk.nrw.de

www.lanuk.nrw.de
