Mikroschadstoffe.NRW

Landesamt für Natur,
Umwelt und Klima
Nordrhein-Westfalen



MIKROSCHADSTOFFREDUKTION AUF KLÄRANLAGEN IN NRW

Bestandsaufnahme zu Kosten, Energiebedarf und Nachhaltigkeit (Datenstand 2025)

LANUK-Fachbericht 175

LANUK
Kompetenz für ein lebenswertes Land

Vorwort

Der vorliegende LANUK-Fachbericht ist Teil der Veröffentlichungsreihe „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW“, mit denen der Handlungsrahmen zur Umsetzung der nordrhein-westfälischen Mikroschadstoffstrategie im Abwasser aufgezeigt wird. Dabei werden wichtige Hinweise für die Planung, den Betrieb und die Überwachung einer Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen auch für die Umsetzung der am 01.01.2025 in Kraft getretenen Europäischen Kommunalabwasserrichtlinie 2024/3019 (EU-KARL, 2025) gegeben.

Bereits erschienen in der Veröffentlichungsreihe ist als Entwurf der LANUK-Fachbericht „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Grundlagen für Planung, Betrieb und Überwachung“, mit dem ein einheitlicher Vollzug im Hinblick auf Genehmigung und Selbstüberwachung von Abwasserbehandlungsanlagen zur Mikroschadstoffreduktion ermöglicht wird. Darüber hinaus liegt der LANUK-Fachbericht 172 „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Verfahren und Hinweise zur Verfahrensauswahl“ mit Erläuterungen zu Verfahren, Verfahrensvarianten und Hinweisen zur Verfahrensauswahl zur Mikroschadstoffreduktion im Abwasser vor. 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. Der Ausbau kommunaler Kläranlagen im Hinblick auf die Reduktion von Mikroschadstoffen im Abwasser erfolgte in Nordrhein-Westfalen bisher nach einem immissionsseitigen Ansatz. Auf Grundlage der neuen EU-KARL 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 175 ist eine Bestandsaufnahme kommunaler Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, bei denen bereits eine Verfahrensstufe zur Reduktion von Mikroschadstoffen realisiert oder im Bau ist. Die vorgenommenen Auswertungen zum Energiebedarf, zu Kosten und zu Aspekten der Nachhaltigkeit von technischen Anlagen zur Reduktion von Mikroschadstoffen beruhen auf einer im Frühjahr 2025 durchgeführten, umfassenden Datenerhebung bei 35 Kläranlagenbetreibenden in Nordrhein-Westfalen und stellen den Status-Quo der Mikroschadstoffreduktion im Abwasser auf kommunalen Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen dar. Die Ergebnisse dieser Bestandsaufnahme schaffen eine aktuelle Wissensgrundlage für Betreibende kommunaler Kläranlagen, planende Ingenieurbüros und Behörden, die derzeit oder zukünftig am weiteren Ausbau der Kläranlagen zur Mikroschadstoffreduktion beteiligt sind. Der LANUK-Fachbericht 175 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 Datenerhebung zu Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen 7

2.1 Zielstellung und Vorgehen der Datenerhebung 9
2.2 Auswertung der Basisdaten 10

3 Energiebedarf von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion 14

3.1 Methodik der Energiebedarfsauswertung 14
3.2 Energiebedarf von Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion 16

3.2.1 Elektrischer Energiebedarf nach Verfahrensvarianten 16
3.2.2 Anteil des Energiebedarfs der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion am Gesamtenergiebedarf der Kläranlage 20
3.2.3 Einflüsse auf den Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion 20

4 Nachhaltigkeitsaspekte 27

4.1 Methodik der CO_2-Äquivalent-Bilanzierung 28
4.2 CO_2e-Bilanzierung der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen 32

4.2.1 CO_2e-Emissionen je behandelter Abwassermenge 32
4.2.2 Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen je Technologie 33
4.2.3 Sensitivitätsbetrachtungen 36
4.2.4 Bewertung und Ausblick 38

5 Kosten von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion 41

5.1 Methodik der Kostenauswertung 42
5.2 Kostenauswertung von Anlagen in NRW 46

5.2.1 Investitionskosten 46
5.2.2 Betriebskosten 52
5.2.3 Gesamtkosten / Jahreskosten 54

6 Fazit und Ausblick 57

Abkürzungsverzeichnis 59

Literatur 60

Abbildungsverzeichnis 63

Tabellenverzeichnis 66

1 Einleitung

Die Fließgewässer in Deutschland sind unter anderem durch Einträge aus Abwassereinleitungen mit Nährstoffen, Mikroschadstoffen und sonstigen Stoffen belastet. Als Mikroschadstoffe (auch Spurenstoffe, Mikroverunreinigungen genannt) werden Stoffe anthropogenen Ursprungs wie z. B. Arzneimittelwirkstoffe, Röntgenkontrastmittel, endokrine Disruptoren, Biozide und Chemikalien aus Haushalt, Gewerbe und Industrie bezeichnet, die im Wasserkreislauf typischerweise 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.

Der Eintrag von Mikroschadstoffen in die aquatische Umwelt stellt für Nordrhein-Westfalen als bevölkerungsreichstes Bundesland mit hoher Industriedichte und hohem Abwasseranteil in den Gewässern eine besondere Herausforderung dar. Von grundlegender Bedeutung in Nordrhein-Westfalen ist, dass ein sehr hoher Anteil (ca. 50 %) des Trinkwassers oberflächenwassergestützt (Uferfiltrat, angereichertes Grundwasser, Talsperren, Seen) gewonnen wird (DESTATIS, 2025). Nordrhein-Westfalen verfolgt deshalb zur Reduzierung des Eintrags von Mikroschadstoffen in die Gewässer bereits seit langem einen umfassenden Maßnahmenansatz: Vermeidung bzw. Reduzierung des Eintrags an der Quelle, bei der Anwendung/Herstellung bis hin zu nachgeschalteten Maßnahmen an Kläranlagen. Das Vorgehen deckt sich mit den Anforderungen aus dem Stakeholder-Dialog zur bundesweiten Spurenstoffstrategie (BMU/UBA, 2019) und ist die konsequente Fortsetzung des 2008 gestarteten Programms „Reine Ruhr“ (MKULNV, 2014).

Die heute konventionell eingesetzten mechanisch–biologischen Technologien der Abwasserbehandlung sind nicht darauf ausgelegt, gezielt Mikroschadstoffe aus dem Abwasser zu entfernen. Kommunale Kläranlagen gelten deshalb als einer der bedeutendsten Eintragspfade von Mikroschadstoffen in die aquatische Umwelt. Insbesondere der Einsatz von Arzneimitteln ist aufgrund der weiträumigen und notwendigen Anwendung u. a. in vielen privaten Haushalten nicht bei der sachgerechten Anwendung zu verhindern, so dass zur Vermeidung des Eintrags in die Umwelt Maßnahmen der Abwasserbehandlung erforderlich sind. Nachgeschaltete Maßnahmen an der Kläranlage müssen daher eine wichtige Rolle als Barriere übernehmen. Diese Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion (auch vierte Reinigungsstufen genannt) gehören zu den sogenannten End-of-Pipe-Lösungen.

Entsprechend wurde über die Bewirtschaftungsplanung (BWP) 2022 - 2027 für Nordrhein-Westfalen (MULNV NRW, 2021) bzw. nach der „Programmmaßnahme 4: Ausbau kommunaler Kläranlagen, Reduzierung sonstiger Einträge gemäß der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL)“ für Nordrhein-Westfalen bereits ein risikobasierter Ansatz gewählt. Dieser findet auch bei der Aufstellung der 4. Bewirtschaftungsplanung Berücksichtigung, die bis Ende 2026 im Entwurf zu erfolgen hat.

Die am 01.01.2025 in Kraft getretene Europäische Kommunalabwasserrichtlinie (EU-KARL, 2025) fordert 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 Rei-

nigungsstufe) 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 von den Mitgliedstaaten gemäß Artikel 8 Absatz 2 bis zum 31. Dezember 2030 in ihrem Hoheitsgebiet 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.

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.

Für die Finanzierung der Viertbehandlung ist laut Artikel 9 die Einführung einer erweiterten Herstellerverantwortung vorgesehen. Demnach müssen Hersteller, die in der Europäischen Union Arzneimittel und Körperpflegeprodukte in Verkehr bringen, mindestens 80 % der Kosten für die erforderlichen Investitionen sowie den Betrieb der Viertbehandlung finanzieren.

Aus der EU-KARL ergeben sich komplexe und neue Fragestellungen zum Ausbau der kommunalen Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen für die Reduktion von Mikroschadstoffen, aber auch für die ebenfalls in der EU-KARL geforderte weitergehende Nährstoffelimination und die Energieneutralität.

Wesentliche Aspekte sind die Kosten und der Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion sowie 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 granulierte 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 war 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 175 „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Bestandsaufnahme zu Kosten, Energiebedarf und Nachhaltigkeit“ stellt auf Basis einer umfassenden Datenerhebung von kommunalen Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen den aktuellen Sachstand zu den Teilpunkten Energie, Kosten und Nachhaltigkeit von technischen Anlagen zur Reduktion von Mikroschadstoffen dar. Die den Auswertungen zugrunde liegenden Daten stammen aus einer Umfrage an Betreibende, die eine vierte Reinigungsstufe betreiben bzw. zum Stand der Datenabfrage gebaut haben. Die Umfrage erfolgte im Frühjahr 2025 und bezieht sich damit auf Betriebsdaten vor Umsetzung der Anforderungen nach EU-KARL in deutsches Recht. Mögliche Auswirkungen auf die Betriebsmittelverbräuche für die

Mikroschadstoffreduktion, die sich aus der Umsetzung der EU-KARL ergeben können, sind daher nicht mit abgebildet.

In dem ergänzenden zweiten LANUK-Fachbericht 172 „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Verfahren und Hinweise zur Verfahrensauswahl“ (LANUK NRW, 2026a) werden die Verfahren und die sich daraus ergebenden technischen Verfahrensvarianten zur Reduktion von Mikroschadstoffen im Abwasser beschrieben und Hinweise zu deren Auswahl gegeben. Bei den Hinweisen zur Verfahrensauswahl werden unter anderem die Kriterien Nachhaltigkeit und Jahreskosten herangezogen. 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.

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

2 Datenerhebung zu Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen

Im Frühjahr 2025 wurde im Auftrag des LANUK NRW eine Datenerhebung bei Kläranlagenbetreibenden von Verfahrensstufen zu Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen durch ein Projektkonsortium, bestehend aus der Hydro-Ingenieure GmbH, der Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH sowie dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, vorbereitet und durchgeführt. Eingebunden in die Datenerhebung waren auch die fünf Bezirksregierungen Arnsberg, Detmold, Düsseldorf, Köln und Münster als Genehmigungs- bzw. Aufsichtsbehörden.

Die Datenerhebung richtete sich an insgesamt 37 Kläranlagenbetreibende, die bereits über vorhandene oder im Bau befindliche Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion verfügen. Kläranlagen, deren Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion sich noch in der Planungsphase befand, wurden nicht berücksichtigt. Ausnahmen stellte eine Kläranlage dar, die bisher nur als Pilotanlage genehmigt ist, aber dauerhaft betrieben wird.

Damit umfasst die Datenerhebung die Kläranlagen, die in Abbildung 1 als „ausgebaut“ (27; davon 23 im Regelbetrieb und vier in der Einfahr- und Optimierungsphase) oder „im Bau“ (7) gekennzeichnet sind, sowie eine der hier als „in Planung“ markierten Anlagen. Dank der sehr guten Kooperation der eingebundenen Kläranlagenbetreibenden gaben 35 von 37 der angeschriebenen Betreibenden eine Rückmeldung, was einer sehr hohen Rücklaufquote von 95 % entspricht.

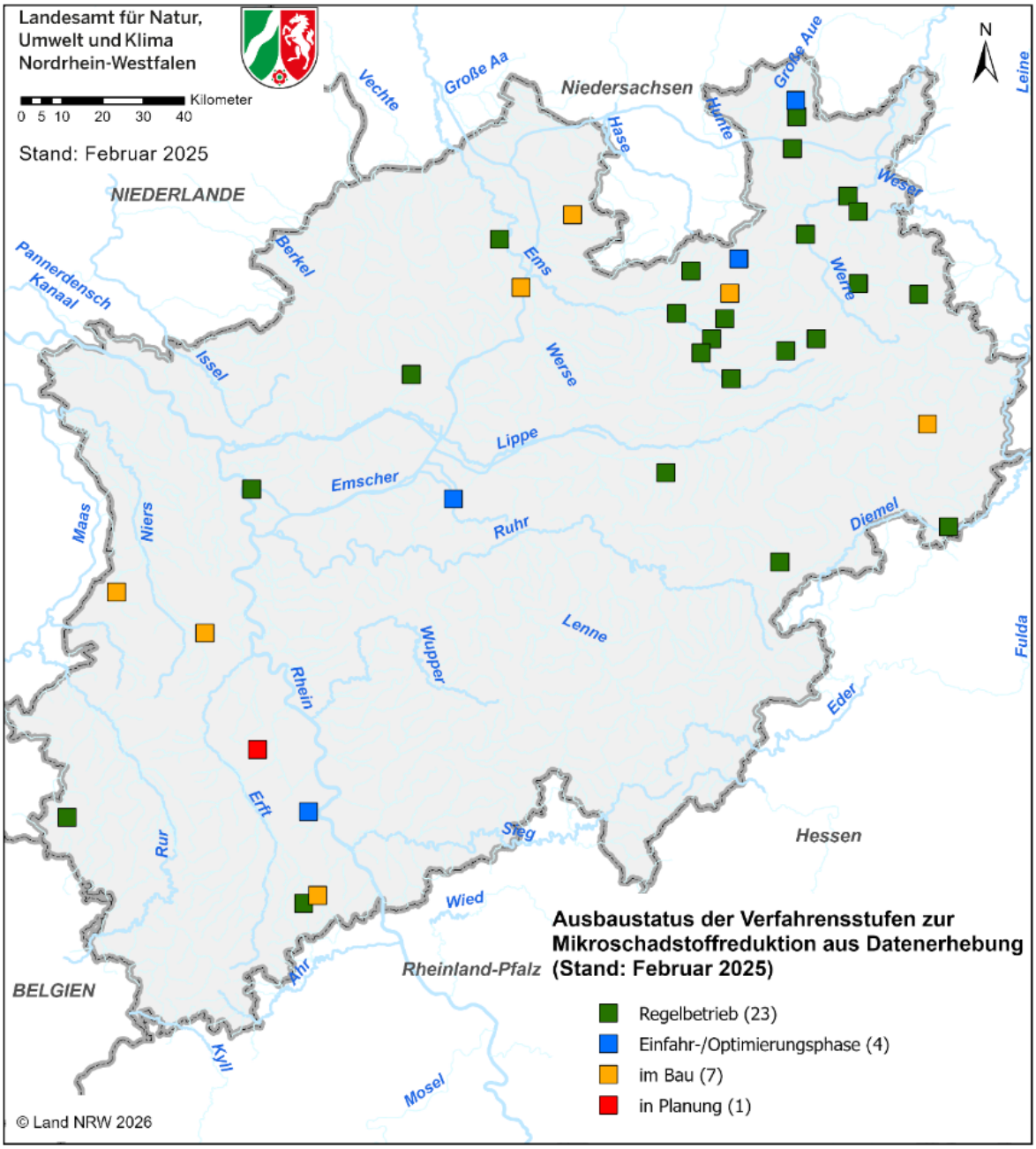


Abbildung 1: Kommunale Kläranlagen mit Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen, die an der Datenerhebung teilgenommen haben (Stand Februar 2025). Der aktuelle Ausbaustatus und weitere Informationen sind unter www.mikroschadstoffe.nrw.de verfügbar © Land NRW 2026

2.1 Zielstellung und Vorgehen der Datenerhebung

Ziel der Datenerhebung war die Erfassung des Status-Quo der kommunalen Kläranlagen mit einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen. Die erhobenen Daten dienen als Grundlage für die in diesem LANUK-Fachbericht aufgeführten Auswertungen zum Energiebedarf, zu Nachhaltigkeitsaspekten und zu den Kosten der Mikroschadstoffreduktion im Abwasser und dessen möglichen Einflussfaktoren.

Die Datenerhebung umfasste neben einigen allgemeinen Informationen zur Kläranlage folgende Daten zur Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion:

- Betriebsstatus (Regelbetrieb, Einfahr-/ Optimierungsphase, im Bau)
- Behandelte Wassermengen
- Abwasserqualität (Ablaufqualität Nachklärung / Zulauf zur Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion)
- Verfahrensangaben zur Mikroschadstoffreduktion (Verfahren, Dosiermengen etc.)
- Informationen zum Bau
- Informationen zur Betriebsweise (Zielwert und Stoffliste zur Überwachung)
- Investitions- und Betriebskosten inkl. Abfrage von Kostengruppen und Anlagenteilen
- Betriebsmittelverbrauch und Personal-/ Wartungseinsatz

Die Angaben der Daten erfolgten für ein für die jeweilige Kläranlage repräsentatives Bezugsjahr.

Die letzte Betrachtung aus Nordrhein-Westfalen zu Kosten der Mikroschadstoffreduktion wurde im Jahr 2016 veröffentlicht und beruhte zum großen Teil auf Machbarkeitsstudien und Projekten aus den Bereichen Forschung und Entwicklung (KOM-M NRW, 2016). Seitdem hat sich die Zahl der ausgebauten Anlagen deutlich erhöht. Durch die Neuaufstellung und inhaltliche Ergänzung der Datenerhebung und -auswertung können somit nun erstmalig in Nordrhein-Westfalen umfassende Erkenntnisse von großtechnischen Anlagen zu Kosten, Energiebedarf und Nachhaltigkeitsaspekten gesammelt und ausgewertet werden.

Die Auswertungen sollen eine aktuelle Wissensgrundlage für alle Beteiligten schaffen, die derzeit oder zukünftig am weiteren Ausbau der Kläranlagen zur Mikroschadstoffreduktion beteiligt sind. Dazu zählen neben den Betreibenden kommunaler Kläranlagen, planende Ingenieurbüros und Genehmigungsbehörden. Auch für weitere Akteure, wie zum Beispiel Wissenschaft oder Politik, sind die Ergebnisse wertvoll.

2.2 Auswertung der Basisdaten

Die erste großtechnische Anlage zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen wurde bereits im Jahr 2009 in Betrieb genommen. Seitdem werden kontinuierlich weitere Kläranlagen mit unterschiedlichen Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion ausgebaut (vgl. Abbildung 2).

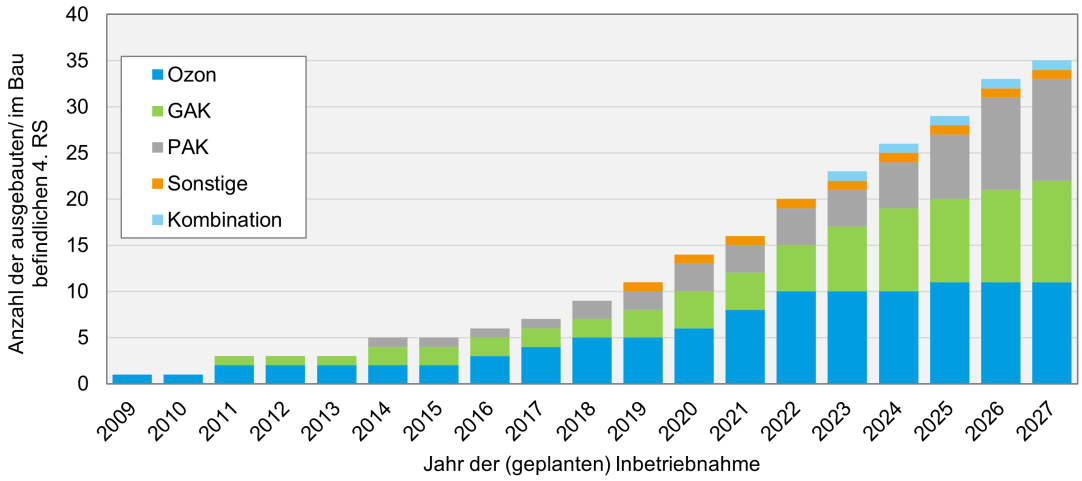


Abbildung 2: Anzahl der (voraussichtlich) ausgebauten Kläranlagen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025)

Die gemäß der Bestandsaufnahme eingesetzten Technologien – differenziert nach ihrem Betriebsstatus und mit Stand Anfang 2025 – sind in Abbildung 3 dargestellt. Demnach sind die meisten im Regelbetrieb befindlichen Anlagen solche mit Ozoneinsatz. Bei den Verfahren mit Pulveraktivkohle sind einige Anlagen derzeit noch im Bau, aber kurz vor der Inbetriebnahme. Bei Fertigstellung aller in Abbildung 3 gezeigten Technologien gibt es eine Gleichverteilung zwischen den Technologien Ozon, Granulierte Aktivkohle (GAK) und Pulveraktivkohle (PAK). Sonstige Verfahren (hier ein Retentionsbodenfilter mit GAK als Additiv) und Verfahrenskombinationen wurden bisher kaum realisiert.

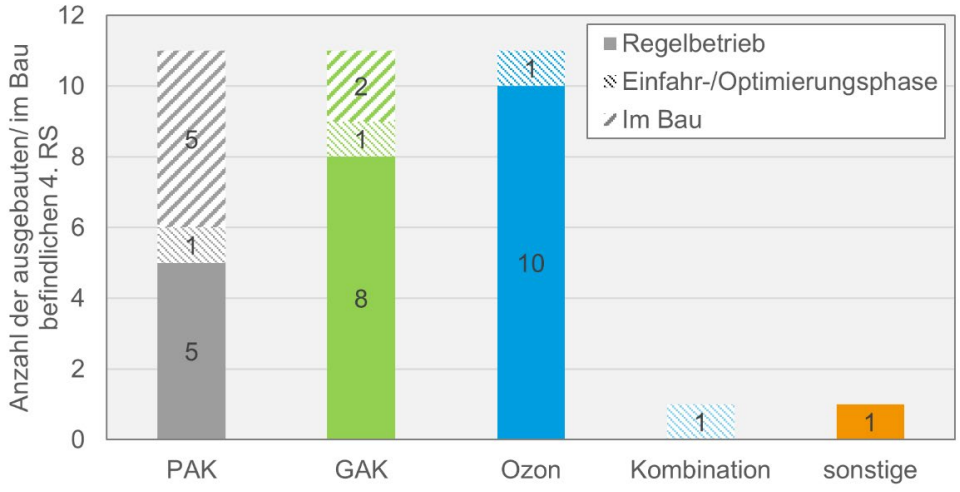


Abbildung 3: Anzahl der in Nordrhein-Westfalen an der Bestandsaufnahme teilgenommenen vierten Reinigungsstufen je Technologie sowie deren Betriebsstatus (Stand Februar 2025)

Die Technologien zur Mikroschadstoffreduktion kommen in unterschiedlichen Verfahrensvarianten zum Einsatz. Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Verfahrensvarianten, einschließlich einer Zusammenfassung des aktuellen Stands des Wissens sowie einer Darstellung der jeweiligen Vor- und Nachteile, kann dem LANUK-Fachbericht 172 „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Verfahren und Hinweise zur Verfahrensauswahl“ (LANUK NRW, 2026a) entnommen werden.

In Abbildung 4 ist die Verteilung der gemäß der Bestandsaufnahme eingesetzten Verfahrensvarianten in Nordrhein-Westfalen dargestellt. Insgesamt werden derzeit 13 verschiedene Verfahrensvarianten eingesetzt. Damit wird deutlich, dass der aktuelle Anlagenbestand in Nordrhein-Westfalen bereits eine große Bandbreite von technisch unterschiedlichen Verfahrensvarianten abdeckt und eine hohe Vielfalt an technischen Ausführungen zum Einsatz kommt. Die Grafik zeigt darüber hinaus weitere vier Verfahrensvarianten, die gemäß LANUK NRW (2026a) bereits großtechnisch erprobt sind, aber bisher nicht in Nordrhein-Westfalen realisiert sind.

Beispielsweise wurde die Simultandosierung von PAK in die biologische Reinigungsstufe bisher nicht großtechnisch im Regelbetrieb umgesetzt. Derzeit werden jedoch zwei Verfahren realisiert, bei denen PAK in einen Membranbelebungsreaktor (MBR) dosiert wird. Das in der Schweiz bereits eingesetzte Verfahren mit „Mikro-GAK“ im Schwebebett ist in Nordrhein-Westfalen bisher nicht in Planung. Auch die Kombination von Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion ist bislang lediglich in einer Variante umgesetzt, bestehend aus einer Vorfiltration, Ozonbehandlung und GAK-Filtration. Ergänzend gibt es mit einer großtechnischen Umsetzung in Nordrhein-Westfalen Erfahrungen zu naturbasierten Verfahren mit bepflanzten Bodenfiltern mit zusätzlichen adsorbierenden Additiven, dem sogenanntem Retentionsbodenfilter^{plus} (RBF^{plus}).

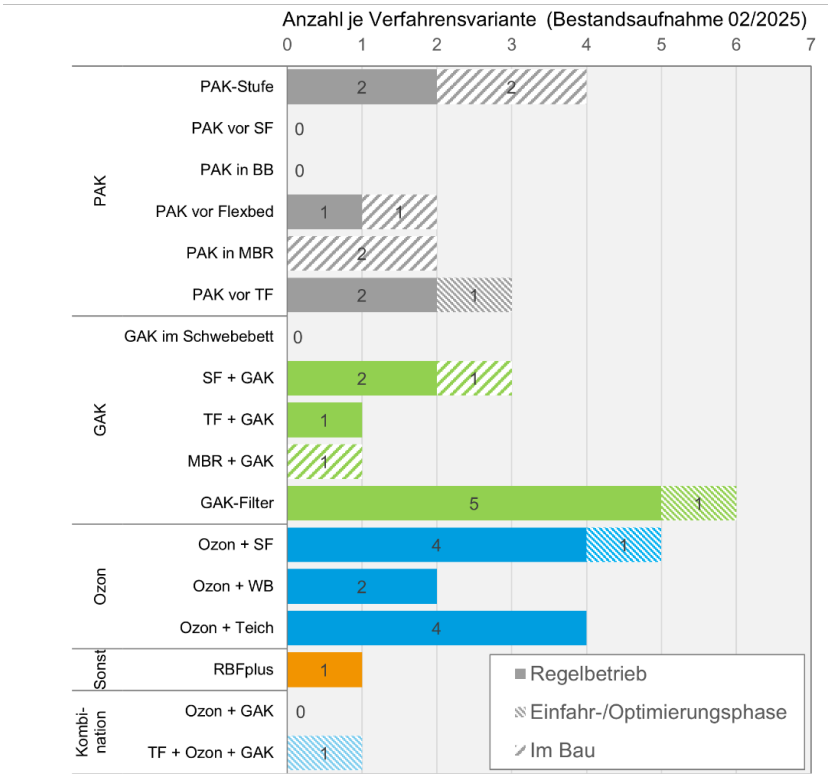


Abbildung 4: In Nordrhein-Westfalen umgesetzte oder in Bau befindliche Verfahrensvarianten (n=35) entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025)

Die erfassten Kläranlagen mit Mikroschadstoffreduktion decken einen Größenbereich von 9.000 bis 705.000 EW Ausbaugröße ab. In Abbildung 5 ist die Häufigkeitsverteilung der in der Bestandsaufnahme erfassten Kläranlagen mit Mikroschadstoffreduktion entsprechend ihrer Ausbaugröße dargestellt. Der Median der Ausbaugröße liegt demnach bei 57.500 EW. Die kumulierte Ausbaugröße aller 35 Kläranlagen liegt bei 4,16 Mio. EW und entspricht damit zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahme etwa 12,3 % der gesamten Ausbaukapazität in Höhe von rund 33,95 Mio. EW aller 589 kommunalen Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen (LANUK, 2026b).

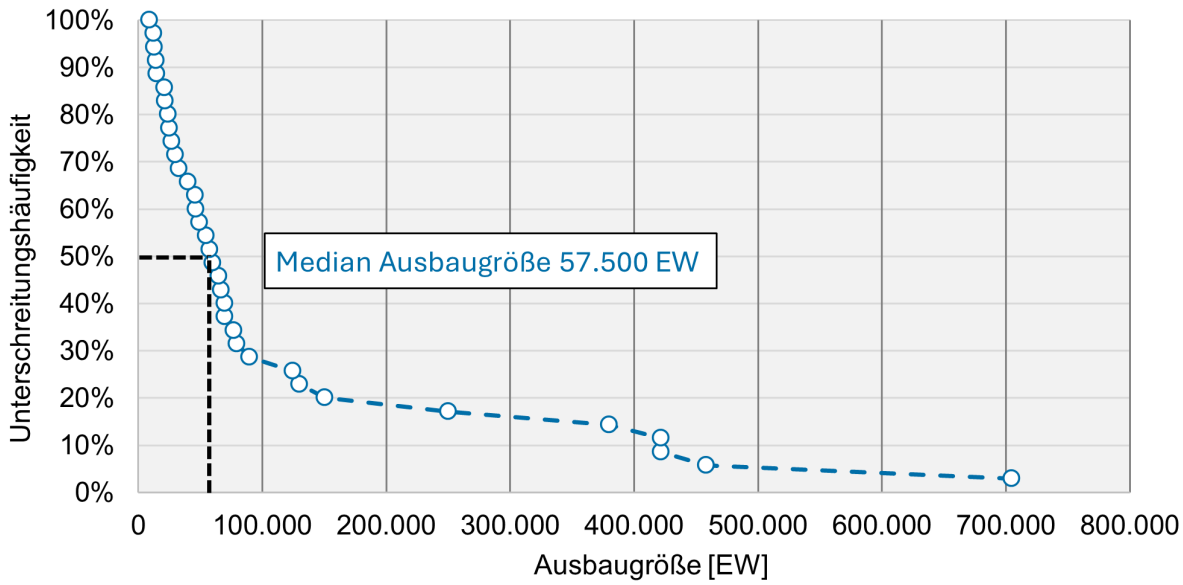


Abbildung 5: Verteilung der ausgewerteten Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion hinsichtlich der Ausbaugröße (n=35) entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025)

Von den 35 im Rahmen der Bestandsaufnahme erfassten Kläranlagen sind 25 für eine Teilstrom- (TS) und zehn Anlagen für eine Vollstrombehandlung (VS) ausgelegt. Der Anteil der behandelten Jahresabwassermenge zur gesamten Jahresabwassermenge der Anlagen mit Teilstrombehandlung variiert und umfasst einen Bereich von 65 bis 98 % in dem jeweiligen Bezugsjahr. Eine Anlage wurde aufgrund besonderer Randbedingungen auf einen Teilstrom von lediglich 37 % der gesamten Jahresabwassermenge ausgelegt und bisher nur als großtechnische Pilotierung genehmigt. Es handelt sich um eine Kläranlage mit zwei Einleitstellen, wobei für eine Einleitstelle erhöhte Anforderungen an die Mikroschadstoffreduktion gelten.

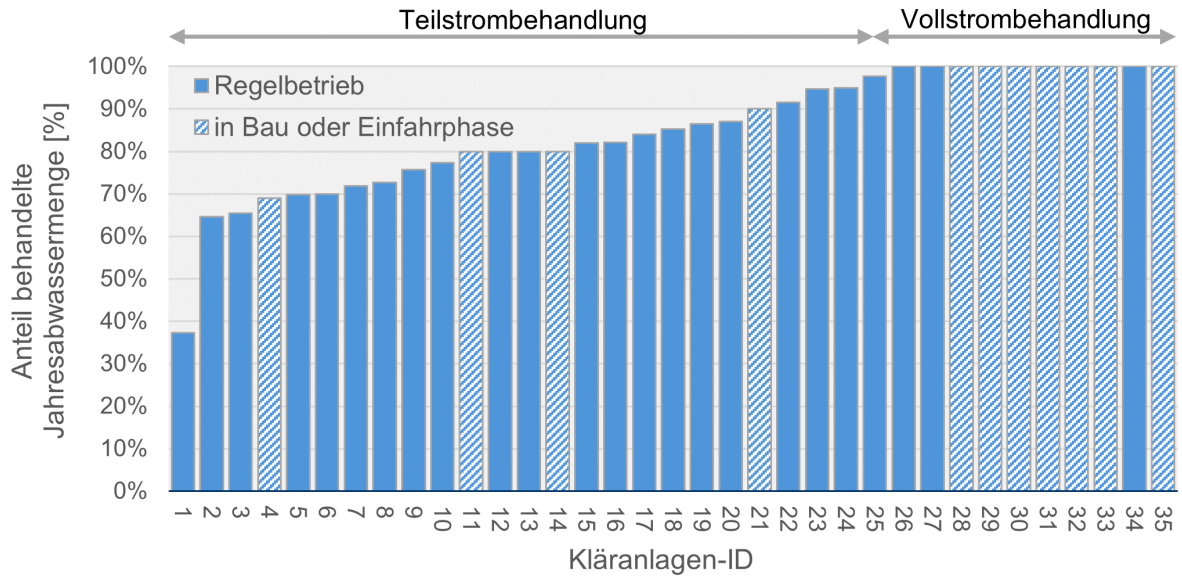


Abbildung 6: Anteil der behandelten Jahresabwassermenge der ausgewerteten Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion für das jeweilige Bezugsjahr (n=35) entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025)

Insgesamt zeigt die Auswertung der Bestandsaufnahme, dass in Nordrhein-Westfalen ein ausgesprochen breites Spektrum unterschiedlicher Umsetzungsvarianten realisiert wurde. Diese Vielfalt spiegelt sowohl die große Bandbreite verfügbarer Verfahrensvarianten als auch die stark standortspezifischen Rahmenbedingungen wider.

Bei den nachfolgenden Auswertungen zu Energiebedarf, Nachhaltigkeit und Kosten ist diese Heterogenität zu berücksichtigen. Faktoren wie Auslegungswassermenge, gewählte Verfahrensvariante, Kläranlagengröße sowie weitere standort- und betriebsbezogene Randbedingungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Betriebsparameter, die Kosten und die ökologischen Auswirkungen der Anlagen.

3 Energiebedarf von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion

Der Betrieb einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion erfordert grundsätzlich den Einsatz von elektrischer Energie. Dazu gehören Energieverbraucher wie unter anderem Hebewerke und Pumpen, Dosiereinrichtungen, Rührwerke, Ozongeneratoren oder Druckluftgebläse. Die Höhe des Energiebedarfs wird von einer Vielzahl technischer und standortspezifischer Randbedingungen beeinflusst. Die Einflüsse werden in diesem Abschnitt anhand der im Rahmen der Bestandsaufnahme (vgl. Kapitel 2) erfassten Betriebsdaten untersucht. An dieser Stelle wird bewusst nicht die zusätzliche, externe Energie berücksichtigt, die für die Herstellung, Bereitstellung oder Regeneration von Betriebsmitteln, wie Pulver- oder granulierte Aktivkohle und Ozon, oder Hilfsstoffen erforderlich ist. Diese Aspekte werden erst im Rahmen der Untersuchung der Nachhaltigkeitsaspekte betrachtet (vgl. Kapitel 4).



Abbildung 7: Beispiele für Energieverbraucher (links: Hebewerk KA Dülmen (Quelle: HI GmbH); rechts, Ozongenerator KA Lemgo (Quelle: Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo))

3.1 Methodik der Energiebedarfsauswertung

Der Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion wurde auf Basis der im Rahmen der Bestandsaufnahme erhobenen Daten für betriebene und auch in Bau befindliche Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen ausgewertet. Dabei wurden folgende methodische Definitionen berücksichtigt:

- **Berücksichtigung ausschließlich des vor Ort anfallenden Energiebedarfs:** Es wird nur der Energiebedarf vor Ort berücksichtigt. Externe Energie, beispielsweise für die Produktion und den Transport der Betriebsstoffe, wird nicht einbezogen. Für diese ganzheitliche Bilanzierung dienen separate Nachhaltigkeitsanalysen (vgl. Kapitel 4).
- **Fokus auf elektrische Energie (Strom):** Der Energiebedarf bezieht sich ausschließlich auf elektrische Energie. Ein möglicher Wärmebedarf wird vernachlässigt, da die derzeit relevanten technischen Verfahren keine Zufuhr von Wärmeenergie erfordern und der Wärmebedarf für zusätzliche Betriebsgebäude als vernachlässigbar eingestuft wird.

- **Bilanzraum zum Energiebedarf der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion** (siehe auch Abbildung 8):
  - **Einbeziehung aller relevanten Aggregate und Teilschritte:** Es wird der Gesamtstrombedarf aller erforderlichen Komponenten betrachtet. Je nach Verfahren und Verfahrensvariante sind bei der Mikroschadstoffreduktion mehrere Teilschritte notwendig, deren Gesamtenergiebedarf betrachtet wird.
  - **Einbezug mitgenutzter bereits vorhandener Anlagentechnik:** Wurde vor dem Ausbau zur Mikroschadstoffreduktion eine Anlagentechnik betrieben, deren Funktion nun überwiegend der neuen Verfahrensstufe zuzuordnen ist, wird deren Energiebedarf in die Bilanz mit einbezogen. Dies betrifft insbesondere bereits bestehende Nachbehandlungsstufen, wie z. B. Sandfiltration.
  - **Differenzierte Betrachtung der Vorbehandlung:** Die energetische Zuordnung von Vorbehandlungsstufen erfolgt standortspezifisch. In einigen Fällen erfüllt ein vorgeschalteter Verfahrensschritt wie die Vorbehandlung primär eine andere Aufgabe (z. B. Filtration für die Phosphorelimination). In diesem Fall wird dieser Verfahrensschritt hier nicht als Vorbehandlung verstanden. Grundsätzlich ist diese Zuordnung im Einzelfall zu entscheiden.
  - **Der elektrische Energiebedarf einer Membrantrennstufe oder einer Nachklärung** wird bei der Simultandosierung von PAK grundsätzlich nicht der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion zugerechnet. Dies gilt insbesondere für Membranbioreaktoren (MBR), bei denen der Energiebedarf der Membran primär dem Rückhalt der Biomasse dient und somit Teil der biologischen Reinigungsstufe ist. Abweichend davon wird bei nachgeschalteten Membranverfahren, deren Hauptfunktion in der Abtrennung der zugegebenen Pulveraktivkohle besteht, der Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion zugeordnet.

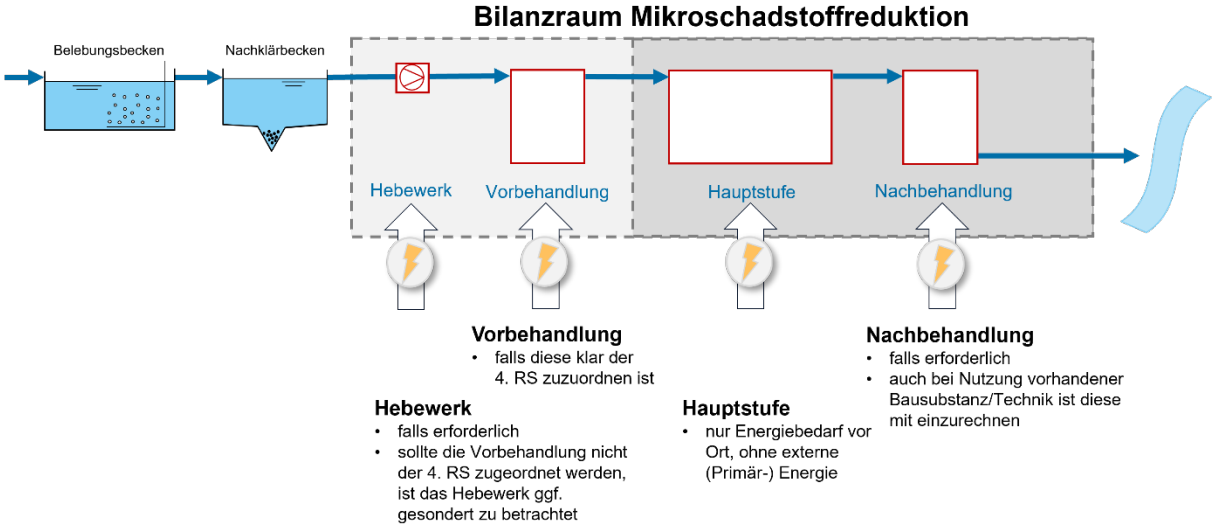


Abbildung 8: Bilanzraum zum Energiebedarf der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion

Von den in Nordrhein-Westfalen im Rahmen der Bestandsaufnahme erfassten 35 Kläranlagen mit in Betrieb oder in Bau befindlichen Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion konnten für 30 Kläranlagen belastbare Angaben zu dem jeweiligen Gesamtstromverbrauch erhoben werden. Davon befinden sich 23 Anlagen im Regelbetrieb, für die reale Messdaten vorliegen. Auch vier Anlagen, die noch in der Einfahr-/Optimierungsphase waren, konnten Messungen des Energiebedarfs mitteilen. In Einzelfällen wurde der Energiebedarf, falls noch kein volles Betriebsjahr erreicht wurde, auf ein volles Jahr hochskaliert. Des Weiteren wurden teilweise auch Planungsdaten von einigen Kläranlagen im Bau mit einbezogen, um die Datenbasis zu erhöhen. Es wurden aber keine Ersatz- oder Schätzwerte bei der Auswertung angesetzt. Fünf der 35 Anlagen aus der Bestandsaufnahme bleiben daher in den Auswertungen zum Energiebedarf unberücksichtigt.

Insgesamt benötigen 20 der 35 Anlagen ein Hebewerk zur Beschickung der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion. Der Energiebedarf ist jeweils im Gesamtstromverbrauch enthalten. Es liegen jedoch nur von 13 Anlagen separate Verbrauchswerte für das Hebewerk vor. Auch für andere Anlagenteile (Ozongenerator, Filter, Rührwerke, etc.) werden in der Regel keine Einzelverbräuche separat gemessen. Eine differenzierte Auswertung des Energiebedarfs nach einzelnen Komponenten ist daher nicht möglich, so dass ausschließlich der Gesamtenergiebedarf betrachtet wird.

3.2 Energiebedarf von Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion

3.2.1 Elektrischer Energiebedarf nach Verfahrensvarianten

Für den Vergleich des Energiebedarfs wurde der Jahresbedarf als spezifischer Verbrauchswert bezogen auf die behandelte Abwassermenge (Wh/m³) und bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf (kWh/E/a) gemäß DWA-A 216 „Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen“ (DWA-A 2016, 2015) ausgewertet.

Der Vergleich des spezifischen elektrischen Energiebedarfs (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10) macht deutlich, dass der Bedarf je nach Kläranlage sehr unterschiedlich ausfällt und selbst bei gleicher Verfahrensvariante erhebliche Spannbreiten auftreten. Der spezifische elektrische Energiebedarf bezogen auf die behandelte Abwassermenge der Anlagen mit unterschiedlichen PAK-Verfahren liegt im Mittel bei ca. 58 Wh/m³ und variiert je nach Anlage von 26 bis 118 Wh/m³. Bei den Ozonanlagen liegt der Bedarf im Mittel bei 83 Wh/m³ (26 - 175 Wh/m³) und bei den GAK-Anlagen bei 58 Wh/m³ (10 - 125 Wh/m³), wobei ebenfalls große Spannbreiten zwischen den einzelnen Anlagen auftreten. Bezogen auf die mittlere CSB-Anlagenbelastung liegen die Energiebedarfe für PAK zwischen 1,5 und 26 kWh/E/a (im Mittel 8,1 kWh/E/a), für Ozon zwischen 2,9 und 15 kWh/E/a (im Mittel 6,4 kWh/E/a) und für GAK zwischen 1,0 und 7,8 kWh/E/a (im Mittel 3,7 kWh/E/a) und weisen ebenfalls deutliche anlagenbezogene Unterschiede auf.

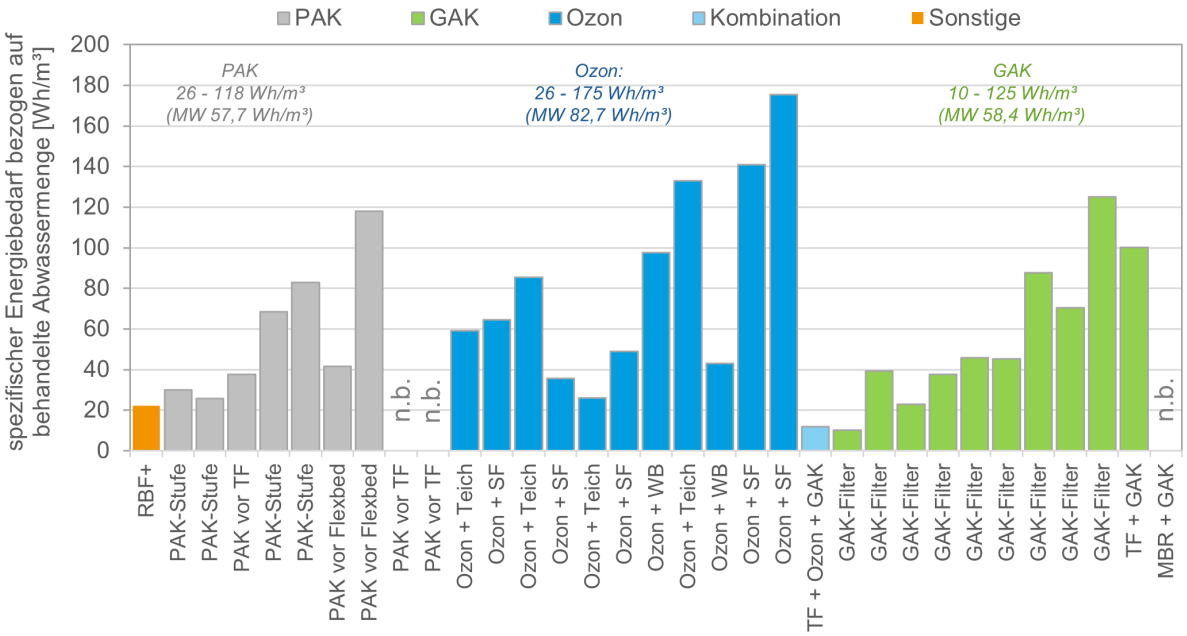


Abbildung 9: Spezifischer elektrischer Energiebedarf der ausgewerteten Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion bezogen auf die behandelte Abwassermenge in Wh/m³

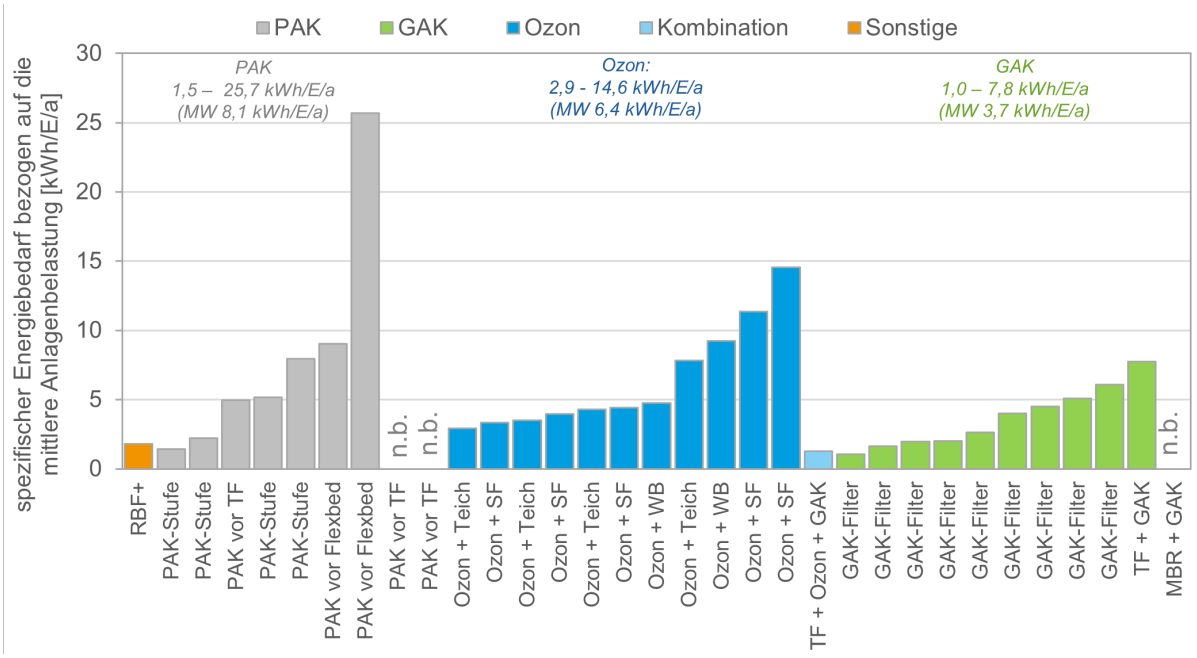


Abbildung 10: Spezifischer elektrischer Energiebedarf der ausgewerteten Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion bezogen auf die mittlere CSB-Anlagenbelastung im Kläranlagenzulauf in kWh/E/a

Der zusätzliche elektrische Energiebedarf einer Vorbehandlung, insbesondere einer Vorfiltration vor einer GAK-Filtration, wurde hier lediglich bei einer Anlage mit Tuchfiltern mitberücksichtigt. Die insgesamt drei Kläranlagen mit Sandfiltration vor den GAK-Filtern werden hier ohne den Energiebedarf der vorgeschalteten Filtration ausgewertet.

Eine klare Abgrenzung und Rangfolge des Energiebedarfs der jeweiligen Verfahrensvarianten kann aufgrund der aufgezeigten Spannbreiten nicht erfolgen. Die Einflüsse durch unterschiedliche Verfahrensvarianten und standortspezifische Randbedingungen sind zu groß, so dass pauschale Aussagen für die einzelnen Verfahrensvarianten nicht möglich sind.

Die Werte liegen im Wesentlichen in den Bereichen, die bisher in der Fachwelt beispielsweise in der ENVELOS Studie von 2015 genannt wurden (Pinnekamp et al., 2015). Dort wurden sieben großtechnische Anlagen in Nordrhein-Westfalen und drei Anlagen in Baden-Württemberg berücksichtigt. Dabei wurden Energieverbräuche von 40 bis 170 Wh/m³ für Ozon ermittelt, was der hier festgestellten Spannbreite entspricht. Für PAK-Anlagen werden 25 bis 35 Wh/m³ genannt. Diese Werte werden bei den hier untersuchten Anlagen zum Teil überschritten. Bei GAK-Anlagen lagen die Angaben aus ENVELOS (Pinnekampt et al., 2015) bei 10 bis 60 Wh/m³, während in der vorliegenden Auswertung zum Teil höhere Verbrauchswerte auftreten.

Die Spannbreiten auch innerhalb der gleichen Verfahrensvarianten werden in Abbildung 11 sichtbar. Die Anzahl der verfügbaren Datensätze für die einzelnen Verfahrensvarianten war zum Zeitpunkt der Datenerhebung teilweise allerdings noch sehr begrenzt. Daher sind pauschale Übertragungen des Energiebedarfs einzelner Verfahrensvarianten, ohne detaillierte Berücksichtigung der standortspezifischen Rahmenbedingungen und Betriebsparameter, nicht zielführend.

Gründe für die großen Spannbreiten werden im Rahmen der separaten Analyse der Einflussfaktoren betrachtet (vgl. Kapitel 3.2.3). Generell ist anzumerken, dass im Rahmen der Bestandsaufnahme nur ein einzelnes Betriebsjahr betrachtet wurde. Je nach Bezugsjahr können andere Randbedingungen, insbesondere bezogen auf die behandelte Abwassermenge und die Hintergrundmatrix, auftreten, die zu einem abweichenden Energiebedarf führen können. Zudem befanden sich in dem betrachteten Betriebsjahr noch nicht alle Verfahrensstufen in einem optimierten Regelbetrieb - einige befanden sich noch in der Einfahr- und Optimierungsphase (4) oder im Bau (3). Beispiele für mögliche Optimierungen stellen u.a. Weiterentwicklungen im Bereich des Ozoneintrags und der Regelkonzepte dar, die den Energiebedarf künftig reduzieren könnten. Darüber hinaus beeinflusst die Betriebsweise – insbesondere in Bezug auf Reinigungsanforderungen und Überwachungsstrategien – den Energiebedarf. Die vorliegenden Betriebswerte wurden i.d.R. für die in Nordrhein-Westfalen bisher diskutierten Leitsubstanzen (KOM-M.NRW 2016) erzielt. Die Vorgaben der EU-KARL und die damit verbundenen Anforderungen können den Energiebedarf ggf. weiter beeinflussen. Die hier ausgewerteten Energiekennzahlen sind daher als Momentaufnahme bzw. Zwischenstand zu verstehen.

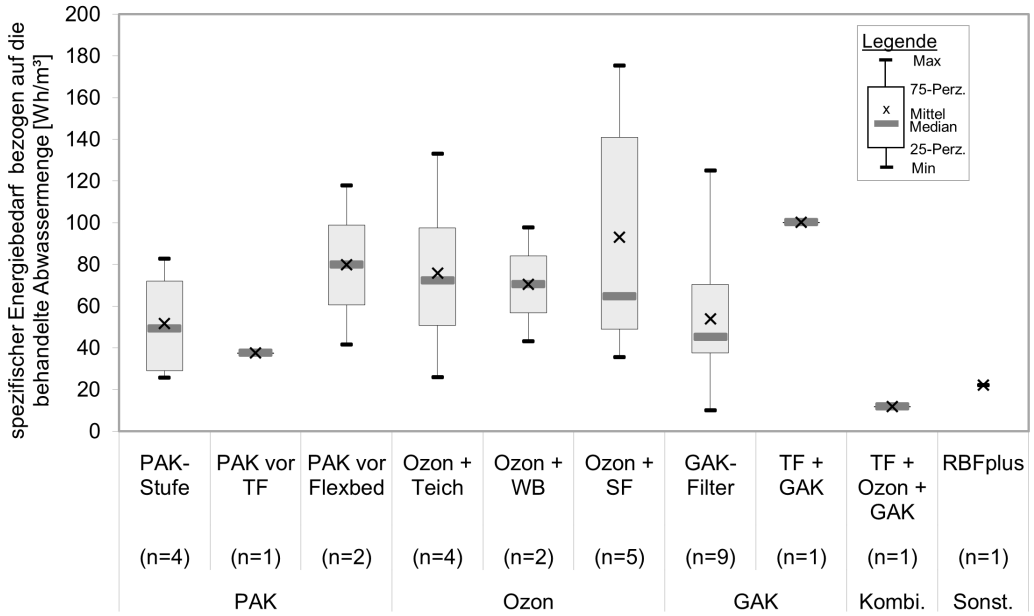


Abbildung 11: Zusammenstellung des spezifischen Energiebedarfs bezogen auf die behandelte Abwassermenge der Verfahrensstufen (n = 30) entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025; zum Zeitpunkt der Datenerhebung keine Angaben für PAK in MBR oder MBR+GAK verfügbar

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der spezifische elektrische Energiebedarf der bisher in Nordrhein-Westfalen ausgeführten Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion im Mittel für alle hier ausgewerteten Verfahrensvarianten in einem Bereich von ca. 1,0 bis 15 kWh/E/a (mit einem Ausreißer bei 26 kWh/E/a) bezogen auf die mittlere CSB-Anlagenbelastung bzw. von ca. 10 bis 175 Wh/m³ bezogen auf die behandelte Abwassermenge liegt. Der Median für die 30 ausgewerteten Anlagen liegt bei 49,1 Wh/m³ bzw. 4,4 kWh/E/a. Die Bestandsaufnahme ergibt eine große Spannbreite des Energiebedarfs, deren Einflussfaktoren und damit auch Optimierungsmöglichkeiten in Kapitel 3.2.3 betrachtet werden.

3.2.2 Anteil des Energiebedarfs der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion am Gesamtenergiebedarf der Kläranlage

Der zusätzliche elektrische Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion erhöht den Gesamtstrombedarf der Abwasserbehandlung. Wie hoch der Anteil des Energiebedarfs der Mikroschadstoffreduktion am Gesamtenergiebedarf einer spezifischen Kläranlage ausfällt, hängt von einigen Randbedingungen ab. Generell werden insbesondere die Kläranlagengröße, die Art der Schlammstabilisierung und die örtlichen Gegebenheiten (z. B. Förderhöhen) als wesentliche Einflussgrößen auf den Gesamtenergiebedarf und damit auch auf den relativen Anteil des Energiebedarfs der Mikroschadstoffreduktion angesehen.

Der elektrische Energiebedarf der gesamten Kläranlage wurde in der Bestandsaufnahme zur Mikroschadstoffreduktion nicht anlagenspezifisch miterfasst. Eine generelle Aussage lässt sich damit nur auf Basis vorhandener Auswertungen zum Energiebedarf von kommunalen Kläranlagen treffen. Der einwohnerspezifische Gesamtstrombedarf (e_{ges}) für Kläranlagen mit Belebtschlammverfahren und anaerober Schlammstabilisierung der Größenklasse 3, 4 und 5 nach Anhang 1 AbwV liegt nach DWA-A 216 (2015) bei ca. 35,0 kWh/E/a (als Median). Er dient nur als Referenzwert, um den Anteil der Mikroschadstoffreduktion in Relation setzen zu können. Der spezifische Energiebedarf ist anlagenspezifisch und muss bei den hier betrachteten Kläranlagen nicht zutreffen.

Die zuvor genannte Spannbreite des Energiebedarfs der Mikroschadstoffreduktion von 1,0 bis 15 kWh/E/a erhöht damit den Gesamtbedarf um ca. 2,9 bis 43 %, wobei der Median mit 4,4 kWh/E/a eine Erhöhung um 12,6 % bewirkt.

In dieser Betrachtung sind mögliche energetische Optimierungspotenziale der jeweiligen Verfahren nicht enthalten. Auf die wesentlichen Einflussfaktoren und damit auch Optimierungsmöglichkeiten wird im folgenden Kapitel eingegangen.

3.2.3 Einflüsse auf den Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion

Der elektrische Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion ist anlagenspezifisch und hängt von mehreren Einflussfaktoren ab, die nachfolgend anhand der Daten aus der Bestandsaufnahme betrachtet werden. Ziel ist es, die Hintergründe der großen Spannbreiten des Energiebedarfs sowohl verfahrensübergreifend als auch innerhalb der Verfahrensvarianten zu verstehen und damit Möglichkeiten und Aspekte aufzuzeigen, die bei der Planung und Ausführung gegebenenfalls Beachtung finden sollten.

Dazu wird der Einfluss der Kläranlagengröße sowie der Förderhöhe untersucht. Weitere Faktoren werden ergänzend spezifisch für die jeweiligen Verfahren betrachtet, da hier sehr spezifische Unterscheidungen relevant sind. Beispielsweise ist je nach Verfahren die Art der Nachbehandlung relevant und ebenso der Umfang des erforderlichen Betriebsmitteleinsatzes, etwa bei der Ozonung.

Einfluss der Kläranlagengröße

Der spezifische elektrische Energiebedarf bezogen auf die mittlere Zulaufbelastung zeigt gemäß Abbildung 12 eine leichte Degression in Abhängigkeit der Anlagengröße. Dies kann möglicherweise durch die bessere Effizienz und Ausnutzung größerer Aggregate erklärt werden. Allgemein zeigt sich jedoch keine eindeutige Übertragbarkeit allein auf Grundlage der Anlagengröße. Weitere standort- und anlagenspezifische Einflussfaktoren, unabhängig von der Anlagengröße, überlagern diesen Effekt.

Besonders bei kleineren Kläranlagen, die den zusätzlichen elektrischen Energiebedarf eingeschränkter durch eine Eigenerzeugung kompensieren können, sollte der Fokus auf die energetische Optimierung gelegt werden.

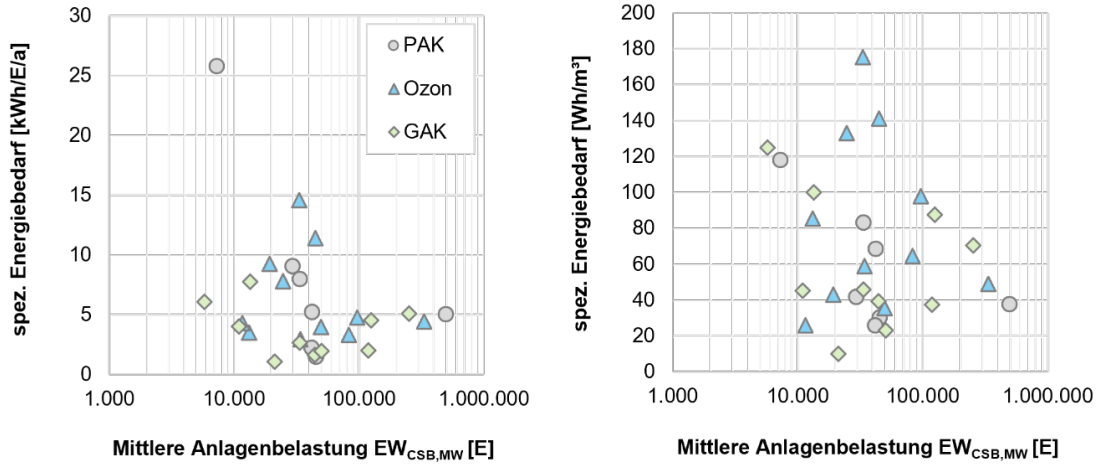


Abbildung 12: Spezifischer Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion für die ausgewerteten Anlagen nach Technologie bezogen auf die mittlere Anlagenbelastung (links: spezifischer Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlag Kläranlagenzulauf [kWh/E/a]; rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf die behandelte Abwassermenge [Wh/m³])

Einfluss der Förderhöhe

Die erforderliche Förderhöhe hat einen Einfluss auf den Energiebedarf der Hebewerke. Hierzu konnten von den insgesamt 20 Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion mit Hebewerk Daten von 15 Verfahrensstufen zum Gesamtenergiebedarf ausgewertet werden. Dabei zeigt sich, dass bei GAK-Filtern i.d.R. Förderhöhen von 5 m oder mehr benötigt werden und diese somit tendenziell größer ausfallen als bei PAK- und Ozonanlagen (Abbildung 13). Dies erklärt sich durch die vergleichsweise hohen hydraulischen Verluste in GAK-Filtern.

Insgesamt konnten sechs der elf Anlagen mit GAK-Filtern im Rahmen der Bestandsaufnahme eine Angabe zum separaten Energiebedarf des Hebewerks machen. Während geringe Förderhöhen von weniger als 4,5 m in Nordrhein-Westfalen zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahme nicht zur Anwendung kamen, betrug der Energiebedarf durch die Hebewerke bei Förderhöhen zwischen 7 und 9 m bei den ausgewerteten Anlagen 43 bis 117 Wh/m³. Maßnahmen zur Senkung der Förderhöhe, wie beispielsweise die Anwendung von Tiefbauvarianten, könnten sich je nach örtlichen Rahmenbedingungen insbesondere bei GAK-Verfahren als vorteilhaft erweisen. Der Energiebedarf von GAK-Anlagen wird allerdings auch von anderen Faktoren als der Förderhöhe beeinflusst.

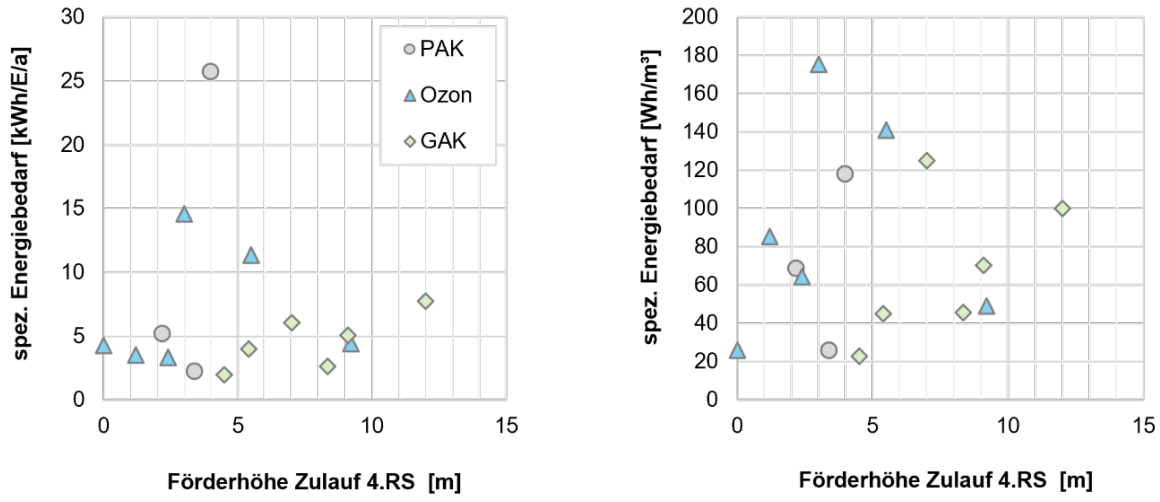


Abbildung 13: Einfluss der Förderhöhe auf den spezifischen Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf (kWh/E/a); rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf behandelte Abwassermenge [Wh/m³])

Einflüsse bei PAK-Verfahren

Der Energiebedarf bei Verfahren mit Dosierung von PAK ergibt sich insbesondere aus dem Hebewerk (falls erforderlich), den Rührwerken in den Kontaktbecken, der erforderlichen Dosiertechnik für die Pulveraktivkohle, weiteren Rücklaufpumpen sowie der Abtrennstufe. Eine Vorbehandlung ist bei PAK-Verfahren in der Regel nicht notwendig. Das Hebewerk kann je nach Situation und Art der Abtrennstufe aufgrund niedriger hydraulischer Verluste in der Hauptstufe entfallen.

Bei PAK-Anlagen konnten im Rahmen der Bestandsaufnahme und Analyse folgende wesentliche Einflüsse auf den Energiebedarf identifiziert werden:

- Anlagen zur Vollstrombehandlung haben einen höheren Energiebedarf als Anlagen, die auf einen Teilstrom ausgelegt sind.
- Hebewerk und Förderhöhe haben einen Einfluss auf den Energiebedarf.
- Der spezifische elektrische Energiebedarf ist bei kleineren Kläranlagen tendenziell höher.

In Abbildung 14 sind die Einflussfaktoren auf den spezifischen Energiebedarf für einzelne PAK-Anlagen mit ausreichend Daten zum Energiebedarf gekennzeichnet. Der Einfluss des Hebewerks, der Auslegungswassermenge und der Abtrennstufe wird daraus ersichtlich. Die Verfahrensvariante „PAK in MBR“ wird aufgrund fehlender Daten hier nicht berücksichtigt. Es kann aber angenommen werden, dass der Energiebedarf deutlich geringer ist als bei den anderen Verfahrensvarianten.

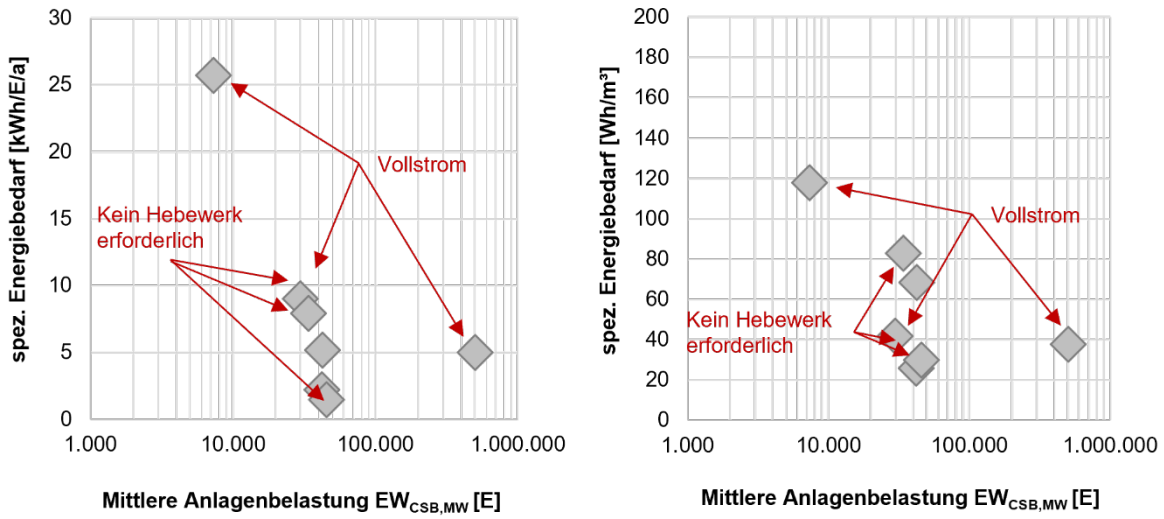


Abbildung 14: Spezifischer Energiebedarf der PAK-Anlagen unterteilt nach mittlerer Anlagenbelastung (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf [kWh/E/a]; rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf behandelte Abwassermenge [Wh/m³])

Einflüsse bei Ozonverfahren

Der Energiebedarf bei den Ozonverfahren ergibt sich hauptsächlich aus der Ozonerzeugung, der Nachbehandlung und dem Hebewerk. Besonders die Art der Nachbehandlung hat einen großen Einfluss, da sich hieraus der Bedarf für die notwendige Förderenergie ergibt. Eine eindeutige Korrelation zwischen der Ozondosis und dem Energiebedarf der gesamten Verfahrensstufe ist hingegen nicht direkt ersichtlich (vgl. Abbildung 15). Insgesamt weisen Ozonanlagen bestehend aus Hebewerk und Sandfiltration je nach behandelter Abwassermenge Energieverbräuche von 5 bis 15 kWh/E/a auf, während Anlagen mit Abwasserteichen als biologische Nachbehandlung, die häufig ohne Hebewerk auskommen, einen Energiebedarf kleiner 5 kWh/E/a haben. Bei den Ausführungen mit Nachbehandlung im Wirbelbett besteht ein zusätzlicher Energiebedarf für die Fluidisierung des Filterbetts, allerdings ist der hydraulische Verlust so gering, dass ggf. auf ein Hebewerk verzichtet werden kann.

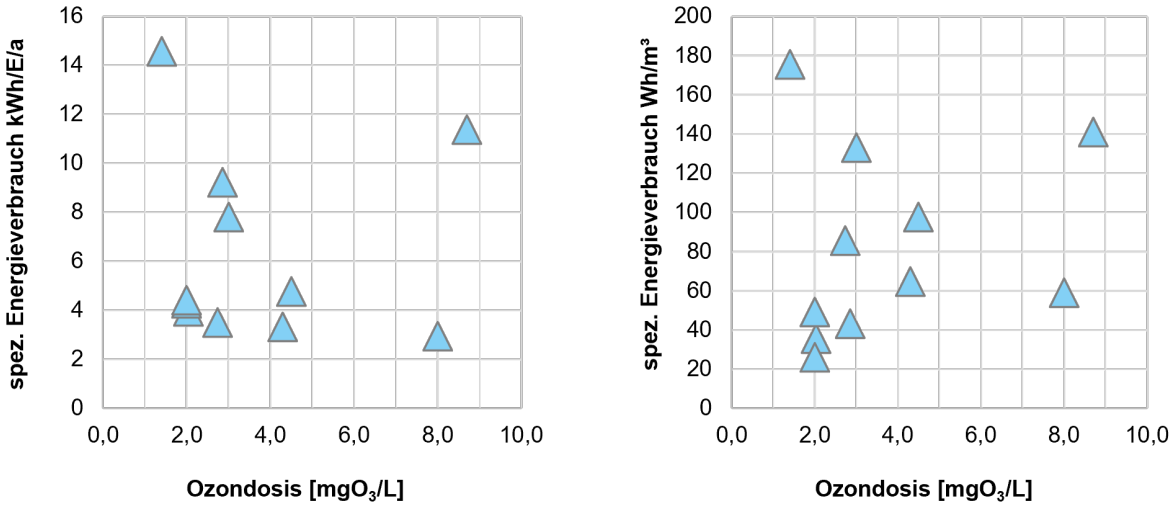


Abbildung 15: Spezifischer Gesamtenergiebedarf der ausgewerteten Anlagen mit Ozonverfahren in Abhängigkeit der jeweiligen Ozondosierung (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf [kWh/E/a]; rechts: bezogen auf behandelte Abwassermenge [Wh/m³])

Die folgende Abbildung 16 zeigt den spezifischen Energiebedarf der elf untersuchten Ozonanlagen. Wesentliche Einflussfaktoren auf den spezifischen Energiebedarf für einzelne Ozonanlagen mit ausreichend Daten zum Energiebedarf sind hervorgehoben. Daraus sind die folgenden Einflüsse auf den Energiebedarf ersichtlich:

- Die zu behandelnde Abwassermenge bzw. die Auslegung auf Vollstrombehandlung hat einen Einfluss auf den Energiebedarf. Dieser scheint bezogen auf den spezifischen Gesamtenergiebedarf bei großen Kläranlagen eher niedrig zu sein.
- Die Höhe der gewählten oder erforderlichen Ozondosierung hat einen Einfluss auf den Energiebedarf, der aber aufgrund der sich überlagernden, zuvor genannten Effekte bei dem Gesamtenergiebedarf kaum noch ersichtlich wird.
- Das biologische Nachbehandlungsverfahren hat einen großen Einfluss auf den Energiebedarf. Den niedrigsten Energiebedarf weisen Anlagen mit Abwasserteichen als

Nachbehandlung auf, gefolgt von solchen mit Wirbelschwebebettanlagen. Sandfilter haben den höchsten Energiebedarf. Sie weisen allerdings, anders als die anderen Nachbehandlungsverfahren, Synergien zu anderen Reinigungszielen bspw. der Phosphorelimination auf.

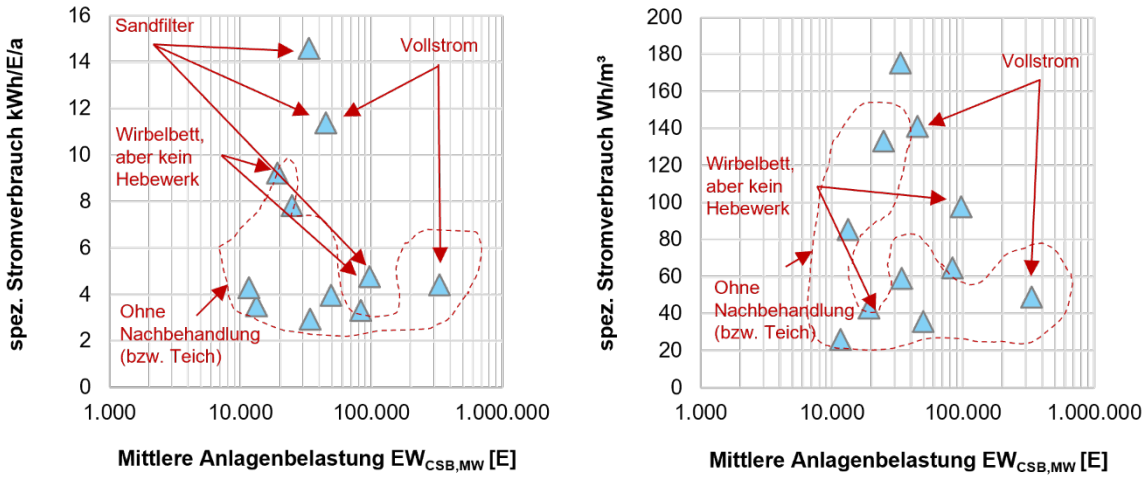


Abbildung 16: Spezifischer Energiebedarf der ausgewerteten Anlagen mit Ozonverfahren aufgeteilt nach mittlerer Anlagenbelastung mit Anmerkung zu den Unterscheidungsmerkmalen (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf [kWh/E/a]; rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf behandelte Abwassermenge [Wh/m³])

Einflüsse bei GAK-Anlagen

Bei den Anlagen mit einer GAK-Filtration wird der Energiebedarf insbesondere durch die erforderlichen Hebewerke mit zumeist hohen erforderlichen Förderhöhen verursacht. Der Einfluss der Förderhöhe auf den Gesamtenergiebedarf der Verfahrensstufe ist in Abbildung 17 erkennbar. Hinzu kommt der Stromeinsatz für die Filterspülung und die Rückführung von Schlammwasser.

In einigen Fällen ist zusätzlich vor dem GAK-Filter eine Vorbehandlung bzw. Vorfiltration eingesetzt oder geplant, die den Energiebedarf erhöht. Dieser zusätzliche Bedarf wurde hier nur bei einer Anlage mit vorgeschaltetem Tuchfilter berücksichtigt. Bei anderen Anlagen mit Sandfiltration, die ggf. auch schon vor der Inbetriebnahme der GAK-Filter vorhanden war, wurde deren Energiebedarf nicht mit in die Kalkulation einbezogen, da diese eher den Reinigungszielen bezüglich des Phosphors zuzuordnen sind. Diese Frage ist jedoch immer im Einzelfall zu klären.

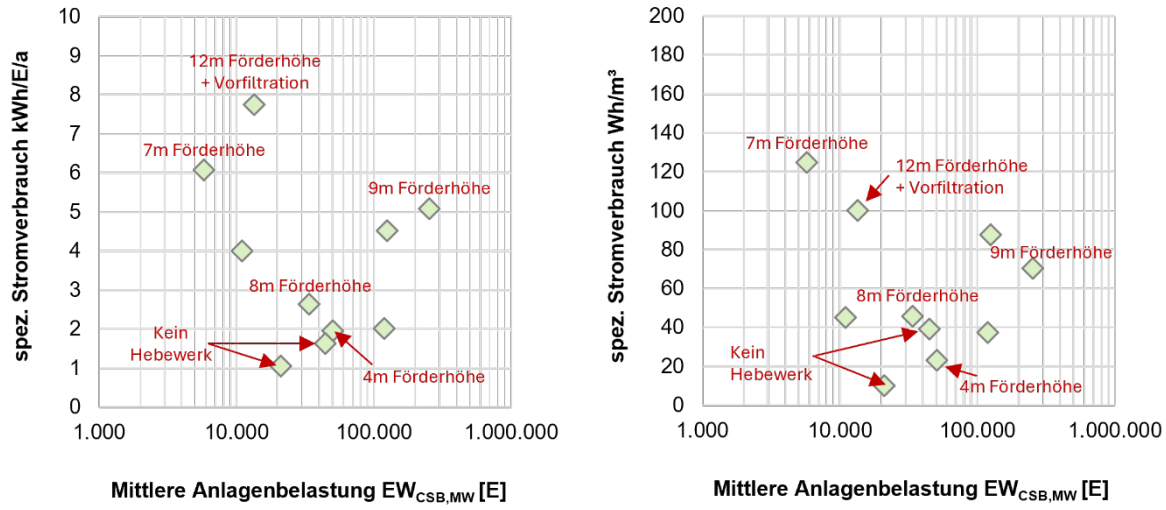


Abbildung 17: Spezifischer Energiebedarf der ausgewerteten Anlagen mit GAK-Verfahren aufgeteilt nach mittlerer Anlagenbelastung (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf (kWh/E/a); rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf behandelte Abwassermenge (Wh/m³))

4 Nachhaltigkeitsaspekte

In der Planung von siedlungswasserwirtschaftlichen Projekten, so auch bei der Planung der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion kommunaler Kläranlagen, werden unterschiedliche Lösungskonzepte technisch und wirtschaftlich miteinander verglichen, um die Entscheidungsfindung gegenüber allen Projektbeteiligten transparent darstellen zu können (LANUK, 2026a). Nachhaltigkeitsaspekte werden demgegenüber bislang eher selten mit konkreten Berechnungen quantifiziert und in die Bewertung der Verfahren einbezogen. Nur durch die gezielte Berücksichtigung der relevanten Nachhaltigkeitsaspekte können im Rahmen der Verfahrensauswahl jedoch Verfahren und Konzepte ausgewählt werden, welche auch den heutigen Ansprüchen hinsichtlich Nachhaltigkeit gerecht werden. Nachhaltigkeit kann grundsätzlich anhand der drei Teilaspekte Ökonomie, Ökologie und Soziales bewertet werden. Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit der vierten Reinigungsstufe bedeutet, den Schutz von Gewässern und Trinkwasserressourcen langfristig zu sichern, ohne dabei unverhältnismäßig Energie, Rohstoffe oder finanzielle Mittel einzusetzen und ohne soziale Belange zu vernachlässigen.

Während ökonomische Aspekte separat in Kapitel 5 diskutiert werden, fokussiert sich dieses Kapitel vornehmlich auf die ökologische Bewertung. Die Betrachtung der ökologischen Nachhaltigkeit im Kontext der Mikroschadstoffreduktion beinhaltet die Erfassung und Bewertung jener Umweltbelastungen, die infolge der Maßnahmen zur Reduktion von Mikroschadstoffemissionen entstehen, z. B. durch den Einsatz von Energie und Betriebsmitteln. Ein direkter, bewertender Vergleich einer Vermeidung von Umwelteinträgen der Mikroschadstoffe im Austausch für die Emissionen durch den betriebenen Reinigungsaufwand ist bisher auch in der wissenschaftlichen Literatur aufgrund der komplexen Zusammenhänge nicht vorgenommen worden. Verschiedene Verfahren für die Mikroschadstoffreduktion können jedoch gegenübergestellt werden, um Umwelteinflüsse grundsätzlich zu minimieren. Soziale Nachhaltigkeitsaspekte, wie beispielsweise die soziale Verträglichkeit von Produktions- und Lieferketten, sind nur schwer quantifizierbar und werden in diesem Bericht nicht betrachtet.





Abbildung 18: Einrichtungen zur Annahme und Lagerung externer Betriebsstoffe (links: Tank für Flüssigsauerstoff, KA Lemgo (Quelle Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo GmbH); rechts: Silo für Pulveraktivkohle und Tank für Fällmittel, KA Brilon (Quelle: Ruhrverband))

4.1 Methodik der CO_2-Äquivalent-Bilanzierung

In diesem Bericht werden vereinfachte, als relevant eingeschätzte Aspekte von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion beruhende CO_2-Äquivalent-Emissionen berechnet (CO_2-Äquivalent (engl. equivalent); im Folgenden abgekürzt als CO_2e) und vergleichend bewertet. Die angewandte Methodik orientiert sich an dem Vorgehen für Ökobilanzen gemäß DIN EN ISO 14040/44 (2021) und dem DWA-M 230-2 (2022) „Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung - Teil 2: Motivation und Vorgehen zur Erstellung von CO_2e-Bilanzen“. Die Berechnung der CO_2e-Emissionen basiert auf Umrechnungsfaktoren gemäß „GWP100“ Definition (Global Warming Potential in 100 years) des International Panel for Climate Change (IPCC). Entsprechende Datensätze sind der Datenbank ecoinvent (v3.10-cutoff) entnommen. Diese inkludieren die Produktion, den Materialeinsatz bis hin zum Transport von Materialien und Betriebsmitteln “bis zum Tor der Kläranlage”. Stehen für Prozesse oder Materialien keine passenden Datensätze in ecoinvent zur Verfügung, wird die Fachliteratur herangezogen (vgl. Tabelle 1). Auf der Kläranlage anfallende Emissionen entstehen insbesondere aus dem Energiebedarf sowie den biologischen Prozessen.

Annahmen

Für die Auswertungen wurden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Für die Vergleichbarkeit des Energiebedarfs und dessen Einfluss auf die CO_2e-Emissionen wird für alle Standorte angenommen, dass der Energiebedarf zu 100 % aus deutschem Netzstrom (Strommix 2024) gedeckt wird.
- Anteile der CO_2e-Emissionen der notwendigen, zu errichtenden Infrastruktur (z. B. Materialeinsatz von Beton oder Stahl für den Bau der benötigten Infrastruktur sowie bei der Konstruktion anfallende Emissionen) wurden nicht berücksichtigt. Grund hierfür sind Ergebnisse aus Forschungsprojekten, welche verdeutlichen, dass die CO_2e-Emissionen für diese Aspekte über die Lebensdauer der Infrastruktur von schätzungsweise mehr als 20 Jahren und in Bezug auf die behandelte Wassermenge im Vergleich zu anderen Faktoren eine untergeordnete Rolle spielen und sich zumeist zwischen den verschiedenen Verfahren nicht bedeutend unterscheiden (FlexTreat, 2025; ASKURIS, 2016). Diese Annahme trifft auf bauintensive Verfahrensvarianten (bspw. Verfahren mit komplexer separater Adsorptionsstufe und nachgeschalteter Raumfiltration oder insbesondere naturnahe Verfahren mit Adsorptionsadditiven) ggf. nicht zu und muss dann im Einzelfall untersucht und bewertet werden. Ebenso werden beim ggf. notwendigen Rückbau der Infrastruktur anfallende Emissionen hier nicht berücksichtigt.
- Die Entsorgung von Restströmen (bspw. Filterspülwässer der Nachbehandlungsstufen) wird bei keiner Technologie systematisch berücksichtigt. Eine Ausnahme bildet die Restozonvernichtung der Ozonung, welche in den Angaben zum Energiebedarf der Betreibenden inkludiert ist. Bei den PAK-Verfahren wird die Entsorgung von Restströmen sowie Einflüsse auf die Schlammbehandlung nicht berücksichtigt. Aus der Bestandsliteratur geht nicht eindeutig hervor, ob PAK einen negativen oder positiven Einfluss auf die CO_2-Bilanz des Entsorgungspfades nimmt. Beispielsweise wird ein erhöhter Schlammanfall durch die PAK-Dosierung berichtet (DWA-M 285-2), andererseits

finden sich Hinweise auf ein deutlich verbessertes Entwässerungsverhalten bei mit PAK versetzten Belebtschlämmen in MBR (Bastian, 2023).

- Es werden für die CO_2e-Emissionen keine standortspezifischen Entfernungen aus dem Transport der Betriebsmittel betrachtet. Die verwendeten CO_2e-Faktoren aus der ecoinvent-Datenbank inkludieren jedoch CO_2e-Emissionen für marktübliche Transportentfernungen je Betriebsmittel.
- Es werden keine direkten Emissionen von Treibhausgasen (z.B. CH_4 oder CO_2-Emissionen aus der biologischen Nachbehandlung von Ozonanlagen) berücksichtigt.

Bilanzraum

Für die Bilanzierung der Betriebsmittelverbräuche und des Energieeinsatzes ist ein einheitlicher Bilanzraum zu definieren, der nur die Prozesse umfasst, die der Reduktion von Mikroschadstoffen zugeordnet werden können (vgl. Abbildung 19). Während die Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion zumeist mit klar definierbaren, zusätzlich zur bestehenden Kläranlage errichteten Bauwerken einhergeht, findet der Betriebsmitteleinsatz zur Reduktion der Mikroschadstoffe nicht immer ausschließlich in diesen Bauwerken statt (bspw. Simultandosierung von PAK in Belebungsbecken mit nachgeschalteter Filtration). Teilweise werden die gleichen Betriebsmittel an derselben Dosierstelle mit unterschiedlichen Reinigungszielen eingesetzt (z.B. Eisenchlorid zur PAK- und Phosphorfällung).

Im Rahmen dieser Studie wurden daher die folgenden Zuordnungen vorgenommen:

- Betriebsmittel und Energiebedarf werden stets ihrem primären Einsatzzweck zugeordnet (bspw. PAK-MBR Verfahren: die Belüftung des MBR ist zwangsläufig für die biologische Reinigung und den Betrieb des MBR erforderlich und somit nicht Teil der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion. Die PAK-Dosierung in den MBR hingegen ist eindeutig dem Ziel der Mikroschadstoffreduktion zuzuschreiben).
- Die Emissionen aus Anlieferung und Herstellung von Betriebsmitteln ist in den jeweiligen CO_2e-Emissionsfaktoren des Betriebsmittels berücksichtigt, sodass keine separaten Eintragspfade (bspw. für externe Energiebedarfe) über die Systemgrenze hinaus betrachtet wurden.
- Für den Energiebedarf werden die in Kapitel 3 berechneten Energiebedarfe je Anlage angesetzt.

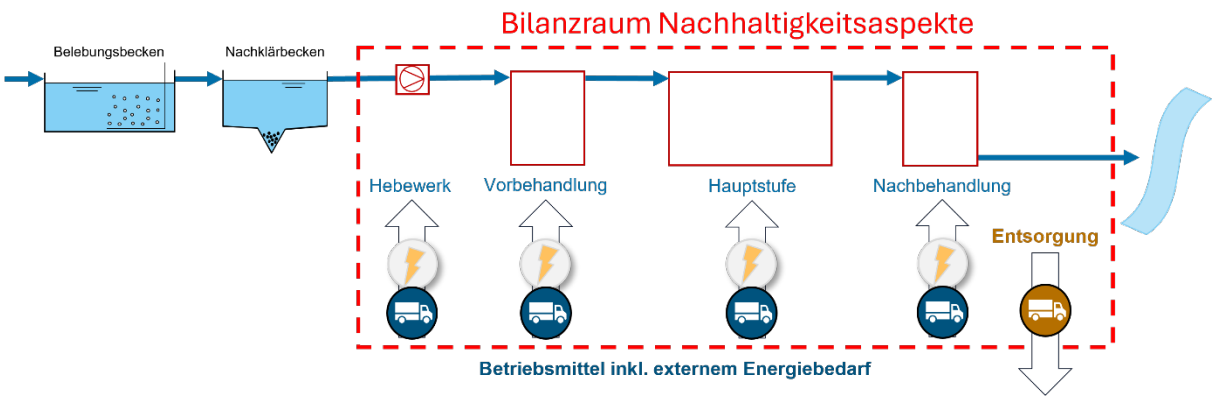


Abbildung 19: Bilanzraum für die Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte

Parameter und Datengrundlage für die CO_2e-Bilanzierung

Die für die CO_2e-Bilanzen herangezogenen Datensätze und CO_2e-Faktoren sind in nachfolgender Tabelle 1 gelistet.

Tabelle 1: Verwendete CO_2e-Faktoren je Parameter inkl. Spezifikation von Quelle bzw. Datensatz (im Falle von Daten aus der Datenbank ecoinvent). Aktivkohlefaktoren wurden gleichermaßen für GAK wie für PAK verwendet.

Parameter	Datensatz	Quelle	Faktor	Einheit
Strom	Electricity, medium voltage (DE, electricity, medium voltage, residual mix)	ecoinvent	0,403	kg_{CO2e}/kWh
Aktivkohle (frisch, aus fossilen Rohstoffen)	Untere Bereichsgrenze Aktivkohle aus Steinkohle (frisch)	DWA 2016	11	kg_{CO2e}/kg_{AK}
Aktivkohlereaktivat	Mittelwert Aktivkohlereaktivate aus fossilen Aktivkohlen	DWA 2016	3	kg_{CO2e}/kg_{AK}
Flüssigsauerstoff	market for oxygen, liquid (Europe, RER)	ecoinvent	0,467	kg_{CO2e}/kg_{LOX}
Fällmittel	market for iron(III) chloride, without water, in 40% solution state (GLO)	ecoinvent	0,877	$kg_{CO2e}/kg_{Produkt}$
Flockungshilfsmittel-polymer	market for polyacrylamide (GLO)	ecoinvent	4,0	$kg_{CO2e}/kg_{Polymer}$

Für eine Nachvollziehbarkeit des Energiebedarfs der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion wird auf Kapitel 3 verwiesen.

Für die Betriebsmittel folgt, anhand des angegebenen Jahresverbrauchs, eine kurze Einordnung bzw. Plausibilitätsprüfung. Dazu sind in Abbildung 20 zunächst die in Nordrhein-Westfalen angefallenen Betriebsmittelverbräuche aus der Betreiberbefragung in Bezug auf die behandelte Abwassermenge für ein repräsentatives Jahr dargestellt.

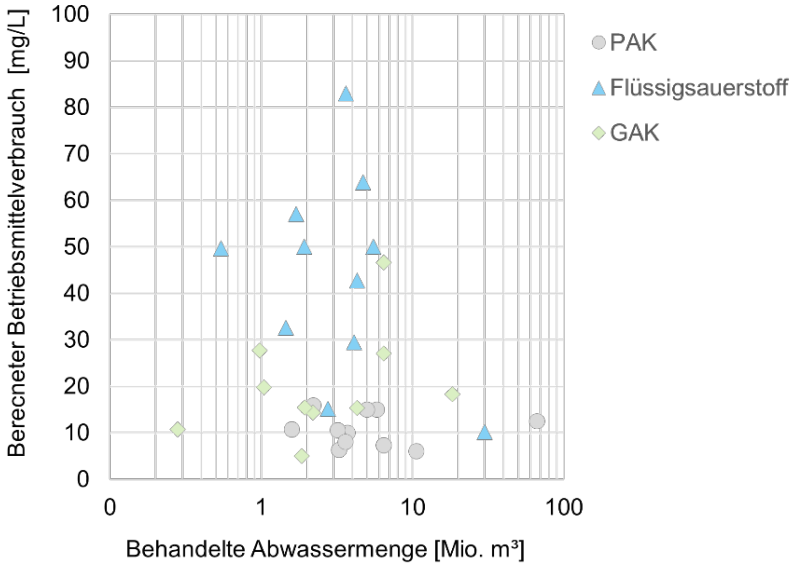


Abbildung 20: Betriebsmittelverbräuche* der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen für die drei etablierten Technologien: Ozonung (Betriebsmittel Flüssigsauerstoff), Adsorption mit PAK und Adsorption mit GAK.
*Die Verbräuche sind berechnet aus den Jahresverbräuchen des jeweiligen Betriebsmittels in Bezug auf die behandelte Jahresabwassermenge der jeweiligen Reinigungsstufe. Bei GAK-Verfahren entspricht der Betriebsmittelverbrauch dem jährlichen Materialaustausch.

Für die betrachteten Anlagen ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Betriebsmittelverbrauch und behandelter Abwassermenge ersichtlich. Die PAK-Verfahren in Nordrhein-Westfalen liegen bei einem Betriebsmittelverbrauch von 5 bis 16 mg_{AK}/L. Dies entspricht einem niedrigen Bereich der Literaturerwartungswerte für die jeweilig vorliegenden Verfahrensvarianten (“PAK vor Filter” und separate “PAK-Stufe”). Die Planungswerte für die Simultandosierung in MBR müssen im laufenden Betrieb noch validiert werden und sind vorerst zu 15 mg_{AK}/L abgeschätzt worden. Die GAK-Verfahren gehen mit einer Ausnahme mit äquivalenten Kohlebedarfen von bis zu 28 mg_{AK}/L einher. In vielen Fällen konnten die GAK-Anlagen in Nordrhein-Westfalen jedoch mit einem mit den PAK-Verfahren vergleichbaren Aktivkohlebedarf betrieben werden. Ausschlaggebend für unterschiedliche Aktivkohlebedarfe ist neben der gewählten Verfahrensvariante insbesondere der vorliegende DOC-Gehalt des zu behandelnden Abwassers. So erklärt sich auch der hohe Verbrauchswert einer Anlage von >45 mg_{AK}/L mit einer hohen industriellen CSB-Belastung des Abwassers und dem damit einhergehenden zusätzlichen Reinigungsziel bezüglich der CSB-Elimination.

Der Bedarf an Flüssigsauerstoff für die Ozonverfahren liegt in Nordrhein-Westfalen zwischen 10 und 80 mg_{LOX}/L. Diese unterscheiden sich vermutlich aufgrund der Abwasserzusammensetzung (insbesondere DOC und Nitrit-Gehalt) und die dadurch benötigten sehr unterschiedlich hohen Ozondosen zur Behandlung des Abwassers sowie der ggf. unterschiedlichen Wirkungsgrade der Ozongeneratoren und der Ozoneintragssysteme. Die Zusammenhänge wurden nicht weitergehend untersucht.

Die Betriebsmittelbedarfe decken sich größtenteils mit den von Hunziker Betatech (2024) ermittelten Bereiche für Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in der Schweiz. Unterschiede im Betriebsmittelbedarf können ggf. auch auf unterschiedlich definierte Betriebsziele zurückzuführen sein.

4.2 CO_2e-Bilanzierung der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen

4.2.1 CO_2e-Emissionen je behandelter Abwassermenge

Die CO_2e-Emissionen von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion können auf verschiedene Arten dargestellt werden. Darstellung und Vergleich absoluter Werte liefern aufgrund der sehr unterschiedlichen Ausbaugrößen der zugrundeliegenden Anlagen wenig Erkenntnisse in Bezug auf mögliche Optimierungsansätze, weshalb im Folgenden spezifische Darstellungen mit Bezug auf die behandelte Abwassermenge genutzt werden.

Nachfolgend wird die Beschaffenheit der Pulveraktivkohle, als einer der bedeutendsten Einflüsse auf die CO_2e-Emissionen, einmal als 100 % frische Kohle, basierend auf fossiler Steinkohle, angenommen und der Berechnung mit der Annahme der Nutzung regenerierter Aktivkohle-Produkte gegenübergestellt (siehe Abbildung 21). Dadurch soll der Einfluss der Produktauswahl von Aktivkohlen verdeutlicht werden. Für weitere Details zur Sensitivität der Aktivkohle Produktwahl siehe Kapitel 4.2.3. Die Emissionen der GAK-Verfahren werden im Folgenden vereinfacht stets mit der Annahme regenerierter fossiler Aktivkohle berechnet. Bei genauerer Betrachtung müssten auch die Emissionen initial eingesetzter Frischkohle sowie ein notwendiger Ausgleich von Verlusten („Make-up Kohle“) berücksichtigt werden.

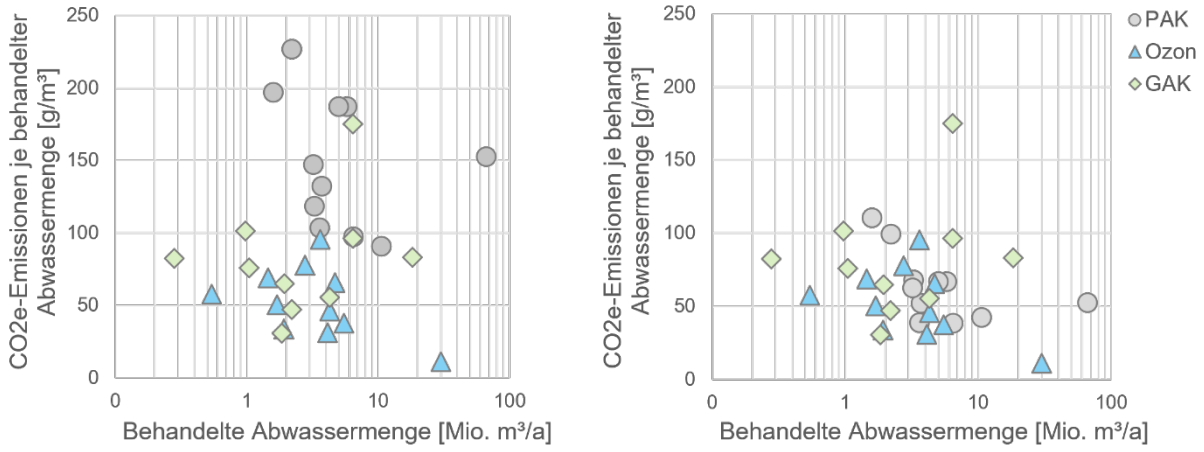


Abbildung 21: CO_2e-Emissionen der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen nach Technologie und in Abhängigkeit der behandelten Abwassermenge (links: PAK-Produkte wurden als frische Produkte basierend auf fossilen Rohstoffen angenommen; rechts: PAK-Produkte wurden als Regenerate bzw. biogenen Rohstoffursprungs angenommen). Für GAK ist stets der CO_2e-Faktor für Regenerate angenommen (vgl. Tabelle 1 für Zahlwerte der Faktoren).

Unter Berücksichtigung der o. g. Annahmen wird deutlich, dass die Wahl des PAK-Produktes einen großen Einfluss auf die CO_2e-Emissionen der Anlagen hat. So liegen im Falle der regenerierten Produkte die CO_2e-Emissionen der ausgewerteten Anlagen fast alle <100 g_{CO2e}/m^3. Bei der Annahme fossil basierter, frischer PAK-Produkte steigen die Emissionen der PAK-Anlagen und der Bereich weitet sich bis teilweise über 200 g_{CO2e}/m^3 aus. Die CO_2e-Emissionen bei Ozonanlagen liegen im Mittel bei etwa 50 g_{CO2e}/m^3.

Eine eindeutige Abhängigkeit der CO_2e-Emissionen der Anlagen von der behandelten Abwassermenge ist nicht erkennbar. Ein leicht abnehmender Trend mit zunehmender Behandlungswassermenge könnte aufgrund von Effizienzsteigerungen größerer Anlagen vermutet werden, wird hier jedoch durch standortspezifische Besonderheiten (unterschiedliche Verfahrensvarianten, Dosiermengen, Förderhöhen, Hintergrundbelastungen des Abwassers etc.) überlagert. Des Weiteren ist keine klare Abhängigkeit der CO_2e-Emissionen von der eingesetzten Technologie erkennbar.

Eine Referenz für einen Vergleich der erzielten Ergebnisse stellt eine vom Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute in Auftrag gegebene Studie über die CO_2e-Emissionen von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in der Schweiz dar (Hunziker BetaTech 2024). In dieser Studie werden teilweise deutlich geringere spezifische CO_2e-Emissionen berechnet. Dies kann auf einen niedriger angesetzten CO_2e-Emissionsfaktor für Netzstrom in der Schweiz von 89 g_{CO2e}/kWh im Vergleich zu 403 g_{CO2e}/kWh in Deutschland zurückgeführt werden. Dieser Unterschied erklärt sich aus unterschiedlichen Zusammensetzungen des Strommixes.

Je Einwohner ergeben sich durch die Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen unabhängig vom eingesetzten Verfahren CO_2e-Emissionen kleiner 20 kg $_{CO2e}$/EW/a (im Falle des Einsatzes von regenerierten Produkten in PAK- und GAK-Verfahren). Dies entspricht den in der Schweiz berichteten Größenordnungen (Hunziker Betatech 2024). Einige Anlagen in Nordrhein-Westfalen (insb. PAK-Verfahren) nutzen derzeit jedoch fossile Frischkohlen, was teilweise zu einer Erhöhung der einwohnerspezifischen Emissionswerte um bis zu 80 % führt. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der nachhaltigkeitsfokussierten Optimierung der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion.

4.2.2 Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen je Technologie

Im Folgenden werden die verschiedenen Anlagen je Verfahrensvariante in Hinblick auf die bedeutendsten Einflussfaktoren auf ihre CO_2e-Emissionen gegenübergestellt. Die CO_2e-Emissionen von Technologien mit Pulveraktivkohle, unter der Annahme der Verwendung fossiler, frischer PAK, werden eindeutig von den der Aktivkohle zugesprochenen Emissionen dominiert (vgl. Abbildung 22). CO_2e-Emissionen aus Energiebedarf und Fällmitteleinsatz sind nur in wenigen Fällen relevant. Die CO_2e-Emissionen je behandeltem Kubikmeter Abwasser aus dem Energiebedarf nimmt tendenziell mit zunehmender Anlagengröße leicht ab. Die CO_2e-Emissionen von PAK und Fällmittel hingegen zeigen keine Abhängigkeit von der Ausbaugröße der Anlage auf.

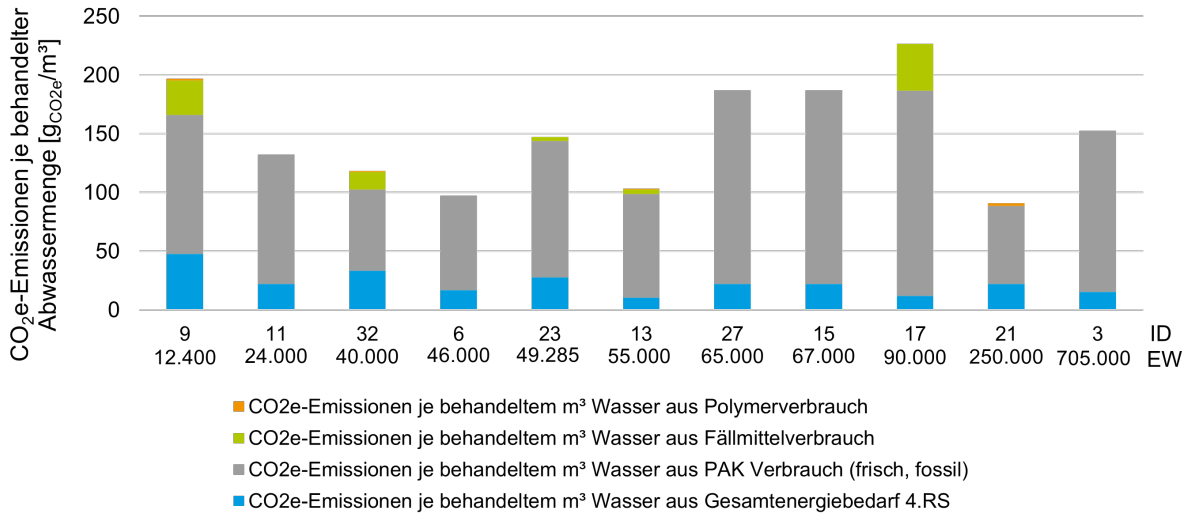


Abbildung 22: Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen der Anlagen mit Einsatz von Pulveraktivkohle, unter der Annahme, dass alle Anlagen frische, fossilbasierte PAK verwenden; sortiert nach Ausbaugröße der Kläranlagen in EW

Betrachtet man hingegen dieselben Verfahrensvarianten unter Einsatz von regenerierten Pulveraktivkohlen, so werden die CO_2e-Emissionen nicht mehr so stark von einem Einzelfaktor dominiert. Energiebedarf und Aktivkohleverbrauch sind dann in vielen Fällen beide bedeutsam (vgl. Abbildung 23). In manchen Fällen zeigt ggf. auch der Fällmitteleinsatz einen relevanten Einfluss (Achtung: Fällmittelverbrauchsmengen konnten nicht auf ihre eindeutige Zuordnung zu Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion oder zur P-Elimination überprüft werden. Die Betreiberangaben wurden ohne weitere Anpassung übernommen).

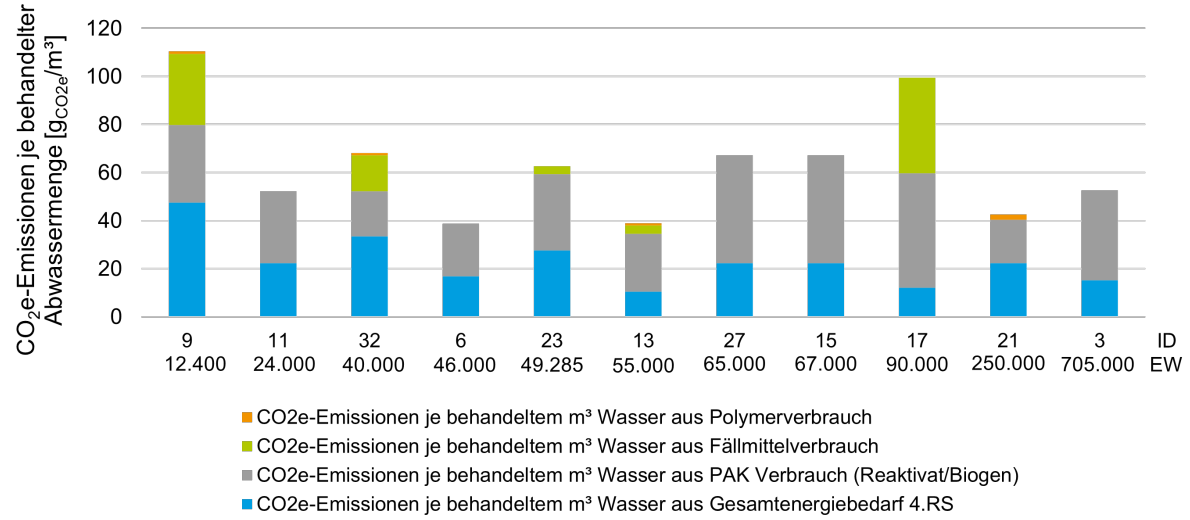


Abbildung 23: Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen der Anlagen mit Einsatz von Pulveraktivkohle unter der Annahme, dass alle Anlagen regenerierte PAK-Produkte verwenden; sortiert nach Ausbaugröße der Kläranlagen in EW

Bei den GAK-Verfahren ergibt sich ein sehr inhomogenes Bild in Bezug auf die Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen (vgl. Abbildung 24). Diese werden von nur zwei Faktoren definiert: dem Energiebedarf und den Emissionen der eingesetzten GAK. Es sind keine

Abhängigkeiten der Höhe der CO_2e-Emmissionen von der Ausbaugröße erkennbar - weder beim Energieeinsatz, noch beim GAK-Verbrauch. Die Verhältnisse zwischen den beiden Faktoren schwanken in Abhängigkeit der Anlage sehr stark. Dies ist vermutlich auf örtliche Besonderheiten, wie bspw. unterschiedliche Förderhöhen und Abwasserzusammensetzungen, zurückzuführen. Die Kläranlage mit der ID 18 stellt aufgrund gesonderter Behandlungsziele in Hinblick auf die CSB-Reduktion einen Sonderfall dar und kann somit begründet als Ausreißer angesehen werden.

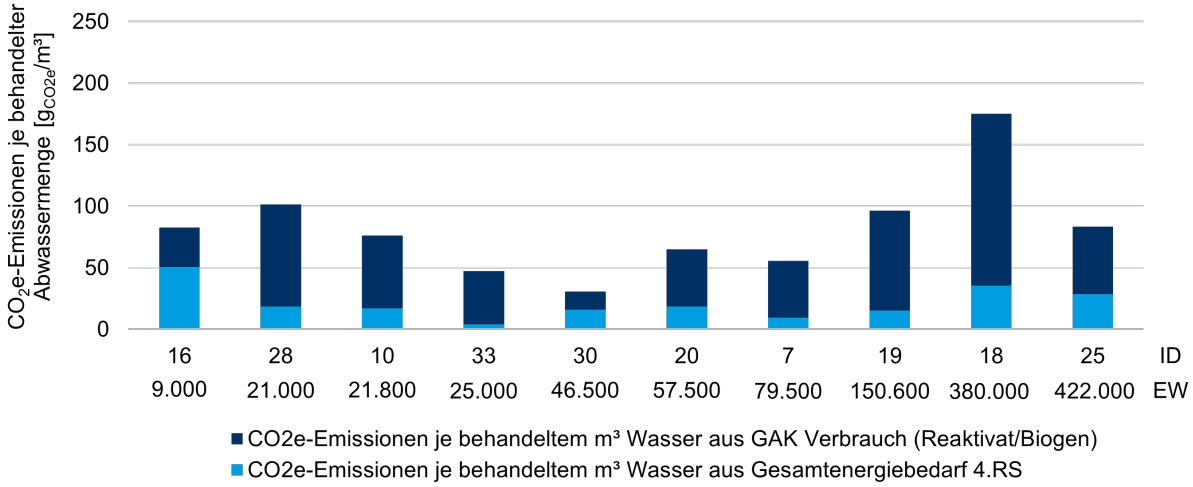


Abbildung 24: Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen der Anlagen mit GAK-Verfahren unter der Annahme, dass alle Anlagen regenerierte GAK-Produkte verwenden; sortiert nach Ausbaugröße der Kläranlagen in EW

Auch bei den Ozonverfahren werden die CO_2e-Emissionen von zwei Faktoren dominiert: von dem Energiebedarf und von dem verwendeten Flüssigsauerstoff. Auch hier sind keine klaren Trends in Abhängigkeit der Ausbaugröße erkennbar. Die Anteile an den Gesamt-CO_2e-Emissionen schwanken besonders stark zwischen einem Verhältnis von 20:80 bis 80:20 zwischen den zwei vorab genannten Faktoren. Mögliche Gründe hierfür wurden angesichts der großen Spannbreite im Betriebsmittelbedarf anhand von Abbildung 20 diskutiert.

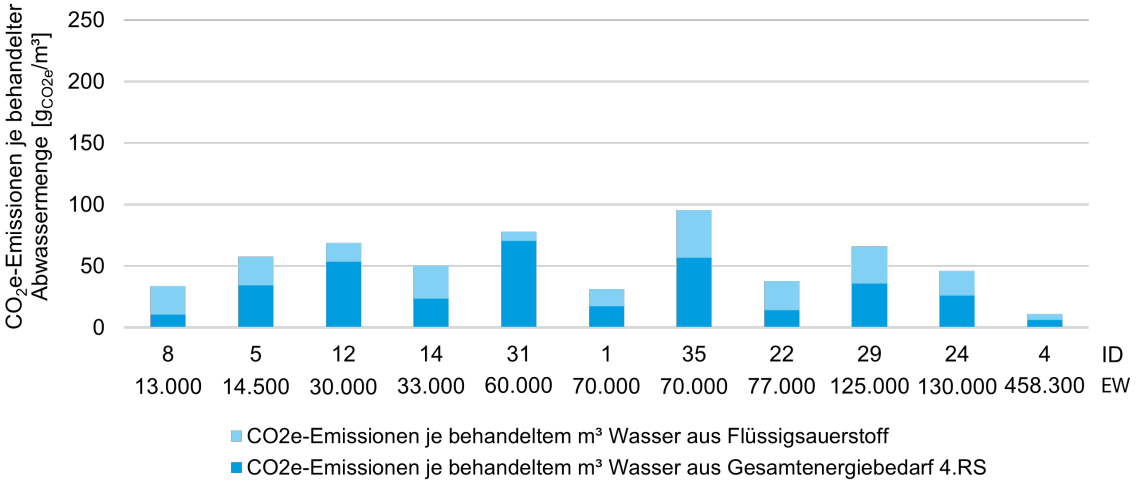


Abbildung 25: Zusammensetzung der CO2e-Emissionen der Anlagen mit Ozon-Verfahren unter der Annahme, dass alle Anlagen 100 % Netzstrom verwenden; sortiert nach Ausbaugröße der Kläranlagen in EW

4.2.3 Sensitivitätsbetrachtungen

Aus den Betrachtungen zur Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen der Anlagen in Nordrhein-Westfalen können wenige Haupteinflussfaktoren identifiziert werden. Um aufzuzeigen, wie Planende und Betreibende die CO_2e-Emissionen von zukünftigen Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion reduzieren können, sind im Folgenden Zahlen zusammengetragen, um Potentiale für Einsparungen der CO_2e-Emissionen aufzeigen zu können und einen Eindruck über die vorhandenen Spielräume zu vermitteln.

Einfluss Strommix

Die Zusammensetzung des deutschen Strommixes bzw. der davon abhängigen CO_2e-Emissionen ist schwer vorhersehbar (vgl. UBA 2025). Die EU-KARL hingegen fordert bis Ende 2045, dass der Sektor der kommunalen Abwasserreinigung energieneutral arbeitet. Hier ist also von einer klimaneutralen Energieversorgung auszugehen, welche mit einem Emissionsfaktor von 0 kgCO_2e/kWh beschrieben werden kann. Abbildung 26 verdeutlicht die Auswirkungen dieses Szenarios auf die Gesamt-CO_2e-Emissionen der bestehenden Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen.

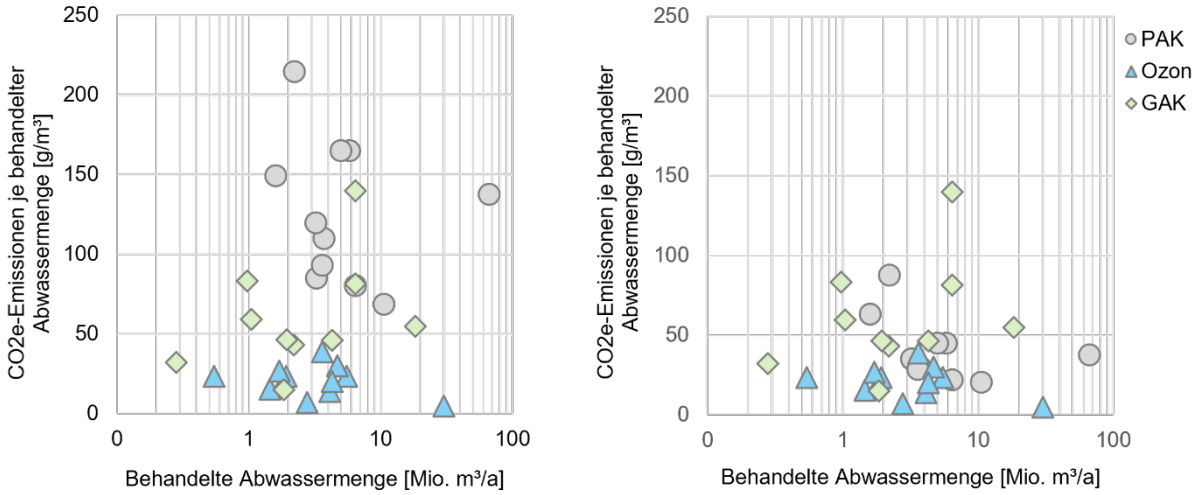


Abbildung 26: CO_2e-Emissionen je behandelter Abwassermenge der Anlagen je Technologie unter den Annahmen, dass der Energiebedarf der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion zu 0 kg CO_2e/m³ berücksichtigt wird (links: PAK-Verfahren mit frischer, fossil basierter Aktivkohle; rechts: PAK-Verfahren mit regenerierter Aktivkohle)

Insbesondere die Ozonanlagen sortieren sich in diesem Falle alle in einem Bereich kleiner 40 g_{CO2e}/m³ ein und erreichen somit geringere Emissionsbereiche als die Anlagen mit regenerierten Aktivkohlen. Einerseits ist die Annahme, dass durchweg regenerierte Aktivkohlen verwendet werden zum jetzigen Stand eine im Vergleich zur Realität eher idealistische Annahme, andererseits besteht jedoch auch hier noch ein gewisses Einsparpotential, welches im Folgenden näher beschrieben wird.

Einfluss Aktivkohleauswahl

Der Einsatz biogen basierter Pulveraktivkohlen bedeutet im Vergleich zu den fossilen Frischkohlen deutlich verringerte CO_2e-Emissionen. Ebenso ist der Einsatz regenerierter Produkte vorteilhaft (vgl. Abbildung 27).

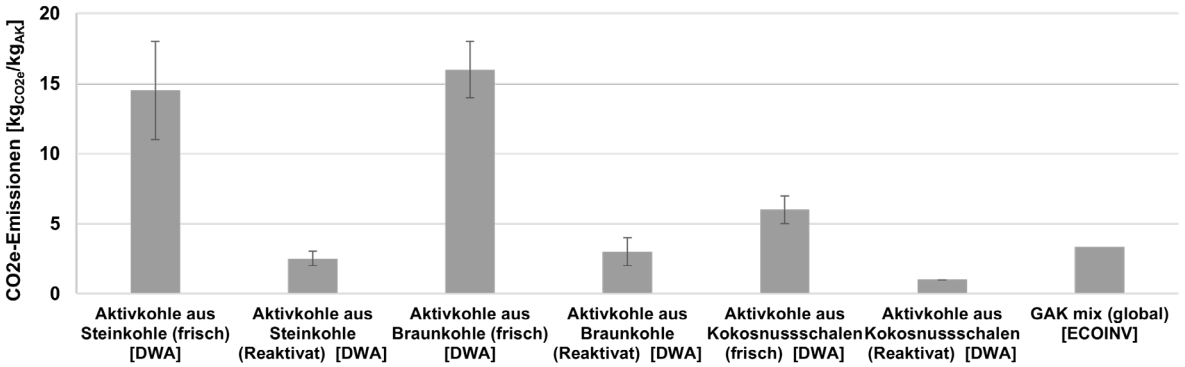


Abbildung 27: CO_2e-Emissionsfaktoren verschiedener Aktivkohleprodukte im Vergleich. Mit „DWA“ gekennzeichnete Daten entstammen einer Veröffentlichung in der Korrespondenz Abwasser, Abfall (DWA 2016); Der „GAK mix (global)“ beruht auf dem ecoinvent-Datensatz “market for activated carbon, granular (GLO)”

Hierbei sind in der Realität in beschränktem Umfang auch biogenbasierte, regenerierte PAK-Produkte marktverfügbar. Der Grund hierfür ist, dass bei der Reaktivierung von GAK durch Abrieb immer auch anteilig PAK anfällt, welche weiterverwendet werden kann. Es ist jedoch schätzungsweise nicht zu erwarten, dass diese Mengen den gesamten PAK-Markt abdecken können. Gleichzeitig besteht bei Aktivkohleherstellern das Bestreben, vermehrt biogen basierte Produkte und allgemein Reaktivate (unabhängig davon, ob fossil oder biogen) anzubieten. Auch der Einsatz von „Downcycling“-Kohlen aus der Trinkwasseraufbereitung wird vermehrt geprüft. Die Entwicklung von Aktivkohlen mit geringeren CO_2e-Emissionen, z. B. durch die Nutzung von Restströmen, ist derzeit Gegenstand von Forschung und Entwicklung (LANUK, 2026a).

Auf Prozessebene können die CO_2e-Emissionen eines Kohleproduktes nicht beeinflusst werden. Durch eine optimierte Zulaufqualität zu Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion kann jedoch ggf. der PAK-Bedarf verringert werden. Ebenso kann eine optimierte Verfahrensführung mit Kohlerezirkulation in die biologische Stufe den PAK-Bedarf verringern.

Einfluss Fällmittel und Flockungshilfsmittel

So denn Fällmittel in größerem Umfang dem Betrieb der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion zuzuschreiben sind, kann die Auswahl des Fällmittels einen relevanten Einfluss auf die CO_2e-Emission haben. Insbesondere gehen vorhydrolysierte Fällmittel, deren prominentester Vertreter das Polyaluminiumchlorid ist, mit deutlich mehr CO_2e-Emissionen je eingesetztem Kilogramm Produkt einher als nicht vorhydrolysierte Fällmittel. Hierbei müssen jedoch auch unterschiedliche Dosiermengen berücksichtigt werden, welche sich aus der Lösungskonzentration und der Wirksamkeit der verschiedenen Fällmittel ergeben.

Flockungshilfsmittelpolymere gehen mit deutlich größeren CO_2e-Emissionen je Kilogramm einher als Fällmittel, werden jedoch auch in deutlich geringeren Dosierkonzentrationen eingesetzt.

4.2.4 Bewertung und Ausblick

Zusammenfassend lassen sich unter der begründeten Annahme einiger Rahmenbedingungen CO_2e-Emissionen für Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion berechnen. Diese Annahmen sind insbesondere notwendig, um die berechneten Emissionen vergleichbar zu machen. In der Realität sorgen individuelle Randbedingungen auf jeder einzelnen Kläranlage für ein deutlich komplexeres Bild. Aufgrund der vielseitigen Einflüsse auf die CO_{2e}-Bilanz genügt die zugrundeliegende Datenmenge nicht aus, um quantitative Zusammenhänge einzelner Einflüsse sicher herauszustellen. Einige Einflussfaktoren konnten jedoch als bedeutsam herausgestellt werden und bieten somit Ansatzpunkte für eine Nachhaltigkeitsoptimierung von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion.

Um die klimarelevanten Auswirkungen der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in den größeren Kontext der Gesamtkläranlage zu setzen, wird im Folgenden ein Rechenbeispiel durchgeführt:

Als Referenz dient hierzu beispielhaft die im „KlickTool“ von Umwelttechnik Baden-Württemberg (KlickTool 2025) hinterlegte 50.000 EW Kläranlage. Das KlickTool ermöglicht eine einfache Berechnung der CO_2e-Emissionen von konventionellen Kläranlagen (ohne Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion) und ist auf den deutschen Referenzraum ausgelegt. Das im Tool hinterlegte Beispiel dient somit als eine nachvollziehbare Referenz zur Einordnung von Emissionswerten. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die nachfolgenden Betrachtungen zur Einordnung stark von diesem Referenzwert abhängig sind, welcher zukünftig bei derartigen Betrachtungen also zwingend hinterfragt und ggf. angepasst werden sollte.

Die berechneten CO_2e-Emissionen von 680 g_{CO2e}/m^3 unterteilen sich in drei Kategorien (vgl. Abbildung 28).

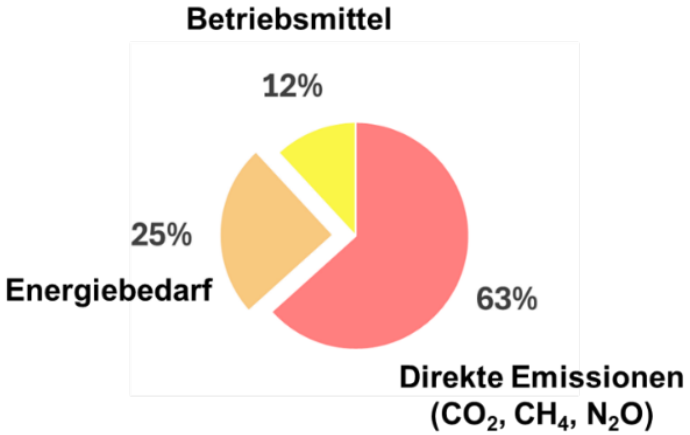


Abbildung 28: Anteile verschiedener Einflussfaktoren an den CO_2e-Emissionen einer konventionellen Kläranlage gemäß einer 50.000 EW Beispielanlage (Quelle: KlickTool BW)

Zu den direkten Emissionen zählen die bei der biologischen Abwasserbehandlung und bei der Klärschlammbehandlung entstehenden Treibhausgase CO_2, CH_4 und N_2O, welche mit 428 g_{CO2e}/m^3 mit Abstand den größten Anteil (63 %) an den Emissionen der Kläranlage ausmachen. Der Energiebedarf macht mit 170 g_{CO2e}/m^3 rund 25 % der Emissionen aus; ein gewisser Eigenstromanteil durch die Erzeugung aus Biogas ist hierbei bereits berücksichtigt. Mit ca. 82 g_{CO2e}/m^3 und einem Anteil von 12 % schließen Betriebsmittel wie Fällmittel und Flockungshilfsmittel/Schlammentwässerungsadditive die Bilanz.

In Abbildung 29 werden nun verschiedene Szenarien von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Relation zu den oberhalb genannten CO_2e-Emissionen der konventionellen Abwasserreinigung gesetzt. Aufgrund der großen Spannbreite der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Emissionen der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen wurden an dieser Stelle drei Bereiche für die Szenarienbetrachtung gewählt. Szenario 1 beschreibt den Bereich, in welchem am wahrscheinlichsten eine wenig optimierte Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion mit dem Einsatz frischer, fossiler Aktivkohlen liegt. Szenario 2 beschreibt eine Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion mit mittelgroßen Emissionen und Szenario 3 eine Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion mit für derzeitige Verhältnisse niedrigeren Emissionen.

Je nach Szenario macht die Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion zwischen 7 und 23 % der summierten Emissionen aus konventioneller Behandlung und Mikroschadstoffreduktion aus.

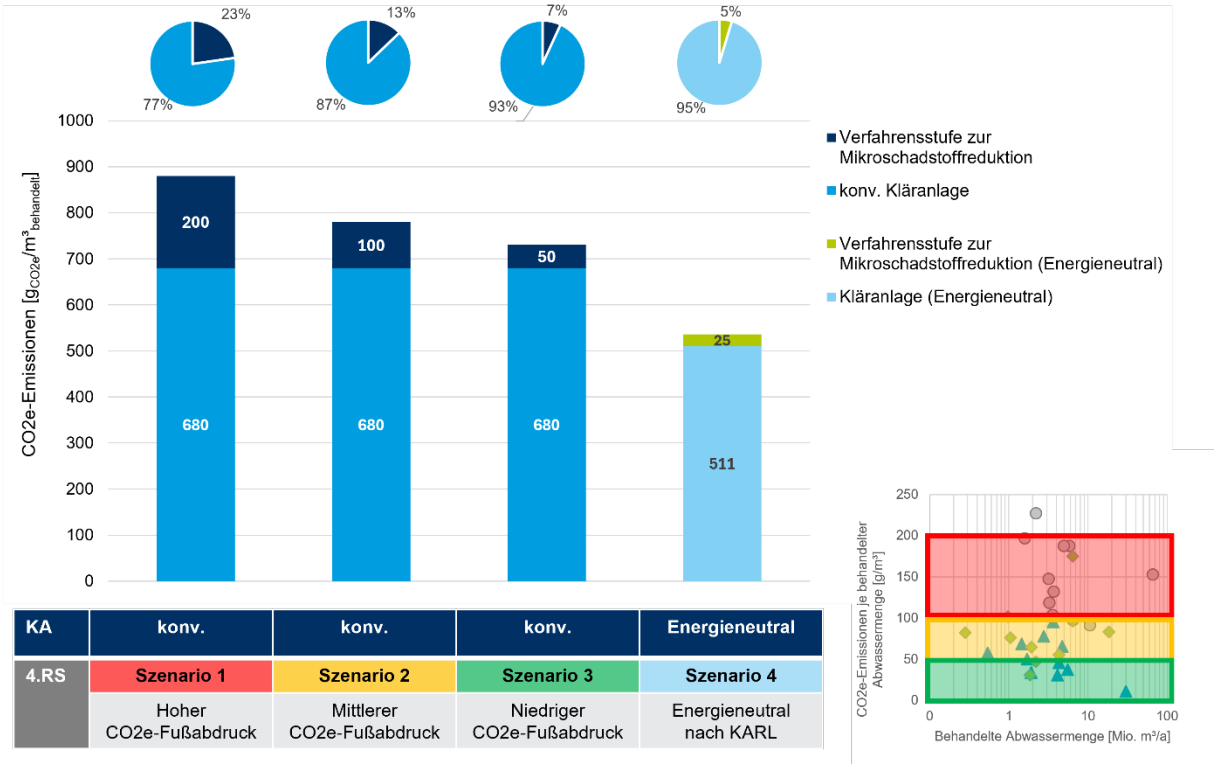


Abbildung 29: Relation der CO_2e-Emissionen von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion zu konventioneller Abwasserreinigung für vier verschiedene Szenarien

Die beschriebenen Szenarien 1 bis 3 unterliegen der Annahme, dass der Energiebedarf der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion vollständig aus Netzstrom (deutscher Strommix 2024) gedeckt wird. Es wird zusätzlich ein viertes Szenario eröffnet, welches an den Kontext der Energie- bzw. Klimaneutralität nach EU-KARL angelehnt ist. So davon auszugehen ist, dass der elektrische Energiebedarf nach Umsetzung der EU-KARL auf der Kläranlage mit 0 gCO_2e/kWh bilanziert werden kann, ergibt sich das Szenario 4. Einerseits kann hierdurch die CO_2e-Emissionen der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion weitergehend reduziert werden (Annahme der Reduktion um ca. 50 % im Vergleich zu Szenario 3. Einschränkungen bzw. Informationen zum Anteil des Energiebedarfes von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion siehe Kapitel 4.2.2). Gleichzeitig werden auch die CO_2e-Emissionen der konventionellen Kläranlage um 25 % reduziert (vgl. Abbildung 29). Es resultiert ein Anteil der CO_2e-Emissionen an den Gesamtemissionen der Kläranlage inklusive vierter Reinigungsstufe von nur noch 5 %.

Dies verdeutlicht einerseits den geringen Anteil der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion an den Gesamtemissionen und lenkt somit die Optimierungsnotwendigkeit vermehrt auf die direkten Emissionen durch freiwerdende Treibhausgase aus dem konventionellen Belebtschlammverfahren inklusive seiner Schlammschiene. Es sei ebenfalls angemerkt, dass Aktivkohleverfahren die in Szenario 4 angenommene Verbesserung beim Einsatz fossiler Kohlen nicht erreichen können. Es besteht weiterer Forschungsbedarf in Hinblick auf Reaktivierbarkeit und biogene Aktivkohlen, um auch hier die CO_2e-Emissionen weiter senken zu können. So sind nicht zuletzt auch aufgrund der „Carbon Management Strategie NRW“ Ansätze für einen nachhaltigeren Umgang mit Kohlenstoff gefordert. Dazu zählt die Reduktion des Einsatzes fossiler Kohlenstoffquellen; die Erschließung nachhaltiger Alternativen, sowie die vermehrte Kreislaufführung von Stoffströmen (Wirtschaft.NRW 2025). Letztlich sollten derartige Ansätze jedoch auf alle derzeit und zukünftig eingesetzten Verfahren zur Mikroschadstoffreduktion übertragen werden, um dem ursprünglichen Ziel der Reduktion von Umweltauswirkungen gerecht zu werden.

5 Kosten von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion

Die Integration einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion auf kommunalen Kläranlagen ist – wie jede Erweiterung einer Kläranlage in der Regel auch - mit zusätzlichen Investitions- und Betriebskosten verbunden. Die Höhe der Kosten wird dabei von vielen Faktoren, wie den örtlichen Randbedingungen oder dem gewählten Verfahren, erheblich beeinflusst. Die nachfolgenden Kostenauswertungen basieren auf Daten zu den in der Datenerhebung im Jahr 2025 ausgewerteten ausgebauten oder in Bau befindlichen Anlagen in Nordrhein-Westfalen und dienen dazu, einen Überblick über die Kosten zu erhalten und die verschiedenen Kosteneinflüsse zu analysieren. Die Auswertung der Kosten ist nicht dafür geeignet, sie eins zu eins auf eine noch nicht ausgebaute Kläranlage zu übertragen, weil die örtlichen Randbedingungen einen großen Einfluss auf die Höhe der Kosten haben. Die Kostenauswertung kann aber Hinweise auf die zu erwartenden Größenordnungen geben und Orientierungswerte liefern.

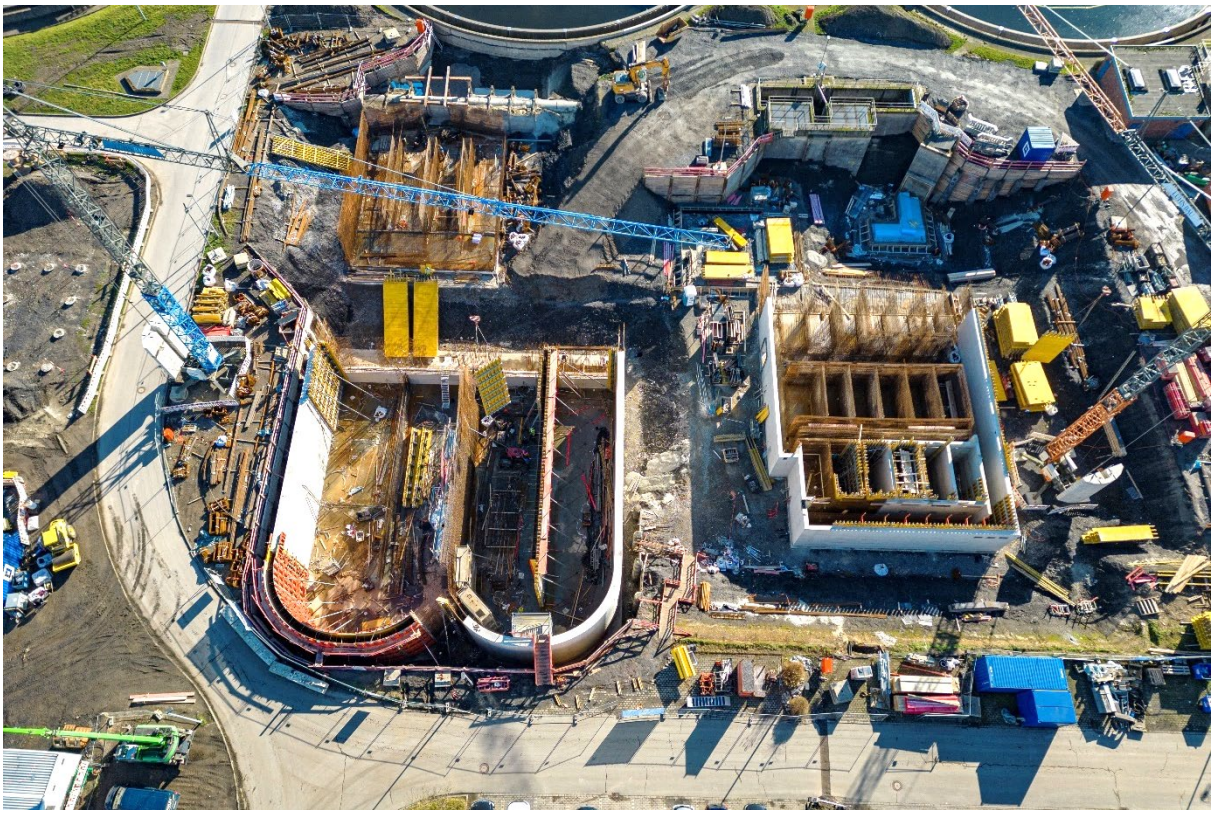


Abbildung 30: Bau der PAK-Adsorptionsstufe KA Dortmund Deusen (EGLV, Michael Rasche)

5.1 Methodik der Kostenauswertung

Datenbasis

Die Auswertung erfolgt mit den Daten aus der im Frühjahr 2025 durchgeführten Datenerhebung bei Kläranlagenbetreibenden in Nordrhein-Westfalen (vgl. dazu Kapitel 2). Insgesamt stehen für die Kostenauswertungen Daten von 25 Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen zur Verfügung, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung eine Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion betrieben haben. Davon befanden sich zum Zeitpunkt der Datenabfrage 22 Kläranlagen im Regelbetrieb und drei in der Einfahr- und Optimierungsphase. Zusätzlich werden sieben Anlagen berücksichtigt, die zum Zeitpunkt der Datenabfrage im Bau waren und eine Anlage, die bis dato nur als Pilotanlage genehmigt war. Durch die Berücksichtigung der Anlagen, die sich noch nicht im Regelbetrieb befinden, gibt es eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Kostenauswertung, da die Kosten und Betriebsmittelverbräuche zum Teil auf Schätzungen basieren. Hierbei überwiegt aber der Vorteil der größeren Datenbasis.

Insgesamt liegt für die Kostenauswertung aus der Bestandsaufnahe eine umfassende und ausgewogene Datenbasis für 33 Anlagen in Nordrhein-Westfalen vor (vgl. dazu Kapitel 2). Es werden alle etablierten Technologien zur Mikroschadstoffreduktion berücksichtigt. Auch hinsichtlich der Kläranlagengröße ist die Datenbasis mit einer Spannbreite der Ausbaugröße von 9.000 bis 705.000 EW und einem Median von 57.500 EW repräsentativ. Zusätzlich werden sowohl Vollstrom- als auch Teilstromauslegungen berücksichtigt, die eine große Spannbreite der Auslegungswassermengen bzw. der behandelten Jahresabwassermengen abdecken (vgl. dazu Kapitel 2).

Einheitliches Bezugsjahr

Die ausgewerteten Investitionskosten beziehen sich auf einen 16-jährigen Zeitraum von 2009 bis 2025. Infolge der Marktentwicklung und Inflation gab es in diesem Zeitraum deutliche Preisanstiege. Für den Kostenvergleich wurden die Kostenangaben daher einheitlich unter Verwendung der Baupreisindizes (Destatis, 2025) auf das Bezugsjahr 2024 skaliert. Zwischen der ersten errichteten Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen aus dem Jahr 2009 und dem Bezugsjahr 2024 ergibt sich hieraus ein hoher theoretischer Kostenanstieg von bis zu 80 %.

Ausführungsfälle für genutzte Bausubstanz

Die Integration einer neuen Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion in eine bestehende kommunale Kläranlage ist planerisch und betrieblich anspruchsvoll. Die Ausführung erfolgt dabei sehr individuell entsprechend der örtlichen Situation mit oder ohne Nutzung vorhandener Bausubstanz. Für einen Vergleich der resultierenden Investitionskosten ist es daher wichtig, die unterschiedlichen Ausführungsfälle zu berücksichtigen. Im aufwändigsten und in Abbildung 31 ersten Ausführungsfall wird die gesamte Verfahrensstufe neu „auf die grüne“ Wiese geplant und gebaut. Dabei müssen sämtliche Anlagenteile, wie Pumpwerk, etwaige Vorbehandlung, Hauptbehandlungsstufe, Nachbehandlung und die zugehörigen Leitungen, Verteiler und Infrastruktur, neu gebaut werden. Für den zweiten Ausführungsfall ist zu differenzieren, ob alle neuen Anlagenteile tatsächlich vollständig der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion zuzuordnen sind. Ein Beispiel hierfür ist der Neubau einer Vorbehandlung in Form einer Filtration, die zwar Synergien für die Hauptstufe der Mikroschadstoffreduktion aufweist, aber

primär der erweiterten P-Elimination dient. Ein dritter Fall für die Integration einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion ist die Umnutzung bestehender Bausubstanz. Dabei können für die Umrüstung Umbaukosten anfallen, die von den örtlichen Bedingungen abhängen. Beispiel hierfür sind der Umbau von Filtern zu Ozonreaktoren, die aufwändige Betonarbeiten erfordern, oder die Umrüstung von Sandfiltern zu Aktivkohlefiltern, die bauliche Anpassungen der Filterdüsen oder Spüleinrichtungen erfordern. Teilweise kann vorhandene Bausubstanz aber auch ohne Umbaukosten weitergenutzt werden, dies betrifft beispielsweise vorhandene Sandfilter zur PAK-Abtrennung und ist in Abbildung 31 in Ausführungsfall vier gezeigt.

Bei den vorgenannten Ausführungsvarianten wird die Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion mit sehr unterschiedlichem baulichem Aufwand integriert. Neben den real angefallenen Investitionskosten werden daher für den Kostenvergleich folgende Schritte durchgeführt:

- Auswertung der real angefallenen Investitionskosten inkl. Umbaukosten.
- Nachträglicher Abzug der Kosten für Anlagenteile, die nicht vollständig der Mikroschadstoffreduktion dienen.
- Anrechnung eines Ersatzwertes für umgebaute oder genutzte Bausubstanz (Beispiel: Für Anlagen, die eine vorhandene Flockungsfiltration nutzen, werden Neubaukosten für eine Sandfiltration abgeschätzt).

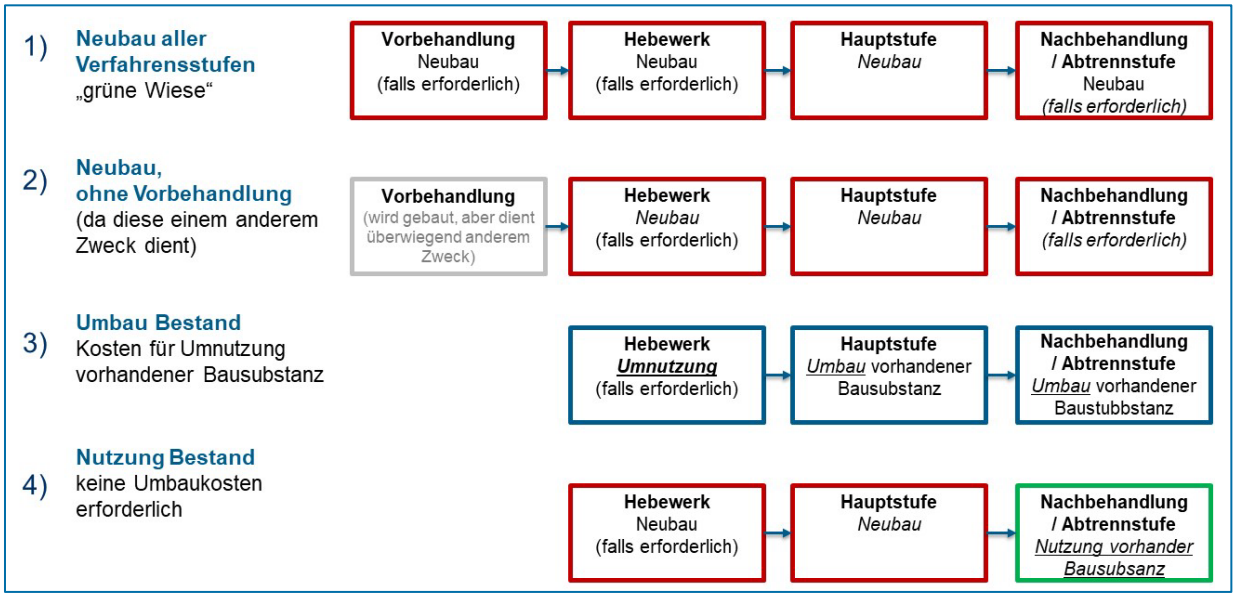


Abbildung 31: Mögliche Ausführungsfälle zur Integration einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion mit unterschiedlichem baulichem Aufwand, die zu unterschiedlichen Kosten führen und bei einem Vergleich berücksichtigt werden müssen. (rot = Neubau, blau = Umnutzung mit Umbau, grün = Umnutzung ohne Umbaukosten, grau = nicht für 4. RS)

Im Ausführungsfall drei und vier sind die ursprünglichen Baukosten der genutzten Bausubstanz nicht bekannt und auch nicht abgefragt worden, weshalb ein Ersatzwert für die Auswertung abgeschätzt wird. Bei der umgenutzten Bausubstanz handelt es sich in der Regel entweder um Behandlungsstufen zur biologischen Nachbehandlung nach einer Ozonung oder um vorhandene Filtrationsstufen, die entweder in GAK-Filter umgerüstet oder für den Rückhalt von PAK eingesetzt werden. In allen Fällen wurde gleichermaßen der Neubau eines

Sandfilters mit maximal 8 m/h Filtergeschwindigkeit für die jeweilige Auslegungswassermenge angesetzt. Als reale aktuelle Kosten für den Bau einer kompletten Sandfiltration wurde dabei ein Erfahrungswert aus aktuellen Projekten von 50.000 €/m² angenommen.

Kapital- und Betriebskosten

Die Investitionskosten wurden entsprechend den Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR) nach LAWA (2012) mit der Annuitätenmethode über die Berechnung der Kapitalwiedergewinnungsfaktoren in jährliche Kosten (Kapitalkosten) umgerechnet. Dies erfolgte getrennt für die Kostengruppen Bau- und Maschinentechnik sowie für die Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (EMSR). Dabei wurden der in Tabelle 2 genannte Realzinssatz sowie die jeweiligen Nutzungsdauern angesetzt.

Bei den Betriebskosten sind die örtlich und zeitlich unterschiedlich hoch anfallenden Einheitspreise zu berücksichtigen. Kosten für Strom können je nach Standort und Versorgersituation variieren. Auch Kosten für Aktivkohle oder Flüssigsauerstoff können je nach Standort und gewähltem Produkt verschieden sein. Bei der Kostenermittlung wurden die Betriebsmittelverbräuche mit einheitlichen Preisen in Kosten umgerechnet (Tabelle 2). Es wurden dafür Referenzwerte auf Basis aktueller Projekte herangezogen.

Tabelle 2: Verwendete Kostenkennzahlen (netto)

Faktoren zur Berechnung der Kapitalkosten		
• Realzinssatz	3,5	% p.a.
• Nutzungsdauer Bautechnik	30	Jahre
• Nutzungsdauer Maschinentechnik	20	Jahre
• Nutzungsdauer EMSR-Technik	15	Jahre
Faktoren zur Berechnung der Betriebskosten		
• Stromkosten	30	ct/kWh
• Personalkosten	60.000	€/MA/a
• Fällmittel Eisen(III)Chlorid inkl. Lieferung	370	€/t
• Polymer inkl. Lieferung	500	€/t
• PAK-Filtermaterial inkl. Lieferung	2.500	€/t
• GAK-Filtermaterial inkl. Lieferung	2.500	€/t
• GAK-Filtermaterial Reaktivierung und Lieferung/Transport	1.800	€/t
• Sauerstoff O_2 inkl. Lieferung und Miete für den Tank	180	€/t

Zusammenfassung der Methodik

Die Kostenauswertung ist aus mehreren Gründen mit Unsicherheiten verbunden. Zum einen stammen die Investitionskosten aus den Jahren 2009 bis 2025 und wurden über einen allgemeinen Preisindex auf ein Bezugsjahr (2024) normiert oder beruhen auf Schätzungen aus der Planungsphase, zum anderen sind die standortspezifischen Gegebenheiten und damit beispielsweise die in den Investitionskosten tatsächlich enthaltenen Anlagenteile sehr unterschiedlich. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse und der Aussagen zwingend zu beachten. Eine Übertragung im Sinne einer Hochrechnung der Investitionskosten auf andere Kläranlagen ist aus technischer Sicht nur sehr eingeschränkt möglich, da die

Rahmenbedingungen vor Ort und die technische Ausführung für den Einzelfall berücksichtigt werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich zu der Methodik der Kostenauswertung Folgendes festhalten:

- Es liegt eine ausgewogene Datenbasis für alle Technologien (PAK, GAK, Ozon, eine Anlage mit Kombinationsverfahren aus Tuchfilter, Ozon und GAK) vor.
- Es stehen Daten über alle Kläranlagengrößen hinweg zur Verfügung (Median 57.500 EW).
- In die Auswertung einbezogen wurden 25 ausgebaute Verfahrensstufen (davon noch drei in der Einfahr- oder Optimierungsphase) und zusätzlich acht Verfahrensstufen in Bau bzw. in Planung mit detaillierten Kostenangaben.
- Darunter befinden sich 24 Teilstrom- und neun Vollstromanlagen.
- Die Skalierung aller Investitionskostenangaben erfolgte einheitlich auf das Jahr 2024.
- Die Kostenauswertung wurde auf Basis der angegebenen, real angefallenen Investitionskosten durchgeführt und zusätzlich ein Vergleichsszenario unter Berücksichtigung eines theoretischen Ersatzwertes für genutzte Bausubstanz berechnet.
- Es erfolgte eine einheitliche Kostenberechnung der Gesamtkosten mit Einheitspreisen auf Basis der Betriebsmittelverbräuche.

5.2 Kostenauswertung von Anlagen in NRW

5.2.1 Investitionskosten

Die ausgewerteten Investitionskosten umfassen Planungs-, Herstellungs- und Baukosten für die Integration der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion. Dazu gehören alle Kostengruppen aus den Bereichen Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik.

Wie bereits in Kapitel 5.1 zur Methodik beschrieben, sind die Investitionskosten hier zwar einheitlich auf ein Bezugsjahr normiert, aber sie beinhalten je nach Standort einen sehr unterschiedlichen Umfang. Die Nutzung oder der Umbau bestehender Anlageninfrastruktur und Bautechnik führt zu sehr unterschiedlichen Investitionskosten je nach Standort.

Die tatsächlich angefallenen Netto-Gesamtinvestitionskosten, ohne Berücksichtigung eines theoretischen Ersatzwertes für die Integration der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion, sind in Abbildung 32 dargestellt. Die großen Spannbreiten, auch innerhalb der gleichen Technologien, dargestellt durch die eingezeichneten Flächen, verdeutlichen, dass hinter jeder Anlage sehr individuelle Rahmenbedingungen stehen. Eine Regressionsanalyse auf Basis dieser Investitionskosten ist daher aufgrund der Unterschiede nicht zielführend.

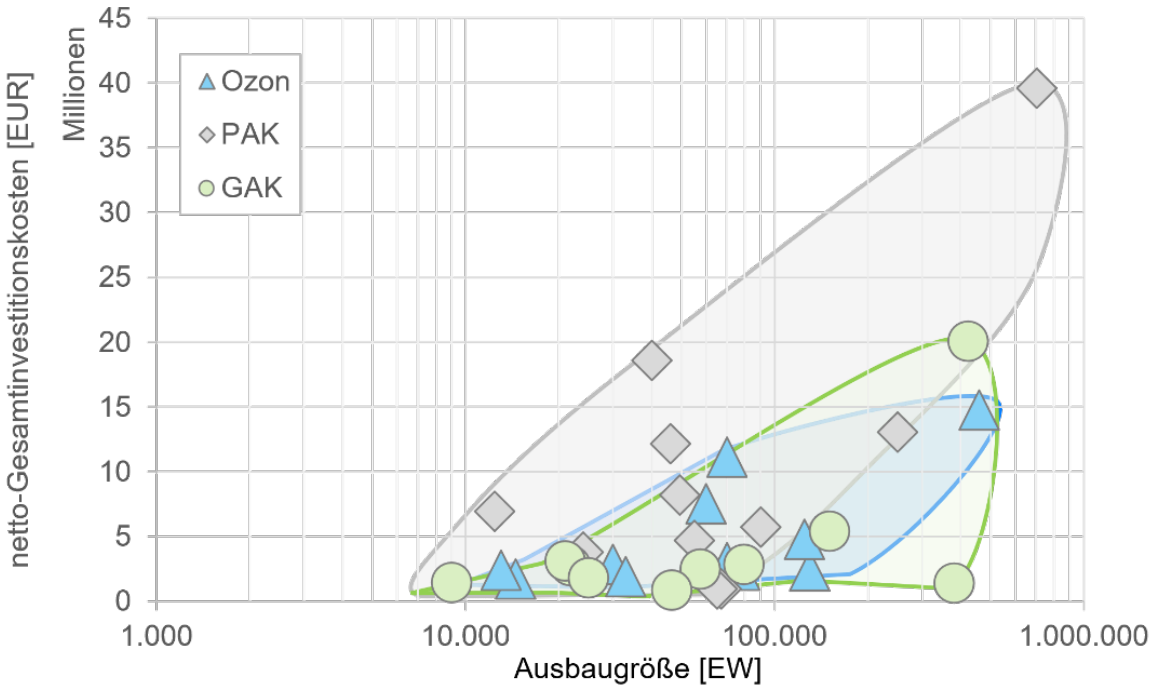


Abbildung 32: Netto-Gesamtinvestitionskosten der betrachteten Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion gemäß der Bestandsaufnahme aus dem Frühjahr 2025. Alle Kostenangaben wurden über Preisindex auf das Bezugsjahr 2024 normiert. Ein theoretischer Ersatzwert für genutzte Bausubstanz ist in dieser Darstellung nicht berücksichtigt

Die Unterschiede bei den Investitionskosten je Standort lassen sich bei einem genaueren Blick auf die individuellen Gegebenheiten dennoch einordnen und erklären. In Tabelle 3 sind dazu für alle ausgewerteten Anlagen jeweils die gewählte Verfahrensvariante, der Betriebsstatus, die Auslegung (Vollstrom/Teilstrom), die Angabe zur Nutzung der Bausubstanz und ein Kommentar zur Kostenrelevanz zusammengefasst.

Tabelle 3: Zusammenstellung der ausgewerteten Daten zu den Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion mit Einflüssen auf die Investitionskosten. Der Betriebsstatus bezieht sich auf den Zeitpunkt der Datenabfrage

ID	Verfahrens-variante	Betriebsstatus	Teil-/ Vollstrom	vorhandene Bausubstanz	Kommentar
3	PAK vor TF	Im Bau	VS	nein	-
6	PAK vor Flexbed	Im Bau	VS	nein	kein Hebewerk
9	PAK vor Flexbed	Regelbetrieb	VS	nein	-
11	PAK vor TF	Regelbetrieb	VS	nein	kein Hebewerk
13	PAK-Stufe	Regelbetrieb	TS	ja	Nutzung vorh. Sandfilter
17	PAK vor TF	Regelbetrieb	TS	nein	-
21	PAK vor TF	Regelbetrieb	TS	teilweise	-
23	PAK-Stufe	Im Bau	TS	nein	-
15	PAK in MBR	Im Bau	VS	ja	MBR vorhanden
27	PAK in MBR	Im Bau	VS	ja	MBR vorhanden
32	PAK-Stufe	Im Bau	TS	nein	-
1	Ozon + WB	Regelbetrieb	TS	nein	kein Hebewerk, Kosten mit Wirbelbett
4	Ozon + SF	Regelbetrieb	VS	teilweise	Nachbehandlung vorhanden
5	Ozon + Teich	Regelbetrieb	TS	teilweise	vorh. Teich als Nachbehandlung
8	Ozon + Teich	Regelbetrieb	TS	teilweise	vorh. Teich als Nachbehandlung
12	Ozon + Teich	Regelbetrieb	TS	teilweise	Teich als Nachbehandlung, aber in Kosten Wirbelbett enthalten
14	Ozon + Teich	Regelbetrieb	TS	teilweise	vorh. Teich als Nachbehandlung
22	Ozon + SF	Regelbetrieb	TS	teilweise	Nachbehandlung vorhanden, kein Pumpwerk?
24	Ozon + SF	Regelbetrieb	TS	teilweise	Nachbehandlung vorhanden
29	Ozon + WB	Regelbetrieb	TS	nein	-
31	Ozon + SF	Regelbetrieb	TS	nein	-
35	Ozon + SF	Einfahr-/Opti-mierungsphase	VS	teilweise	vorh. Hebewerk
7	SF + GAK	Regelbetrieb	TS	ja	Umbau Sandfilter zu GAK, Vorfiltration SF in bestehenden Filtern
10	TF + GAK	Regelbetrieb	TS	nein	Inkl. Kosten Vorfiltration!
16	GAK-Filter	In Planung*	TS	teilweise	altes Nachklärbecken für Spülwasser, teils Planung in Eigenleistung
18	GAK-Filter	Regelbetrieb	TS	ja	Umbau Sandfilter
19	GAK-Filter	Regelbetrieb	TS	nein	-
20	SF + GAK	Regelbetrieb	TS	teilweise	Spülwassertank für GAK gemeinsam mit Sandfilter
25	SF + GAK	Im Bau	TS	nein	Sandfilter Vorfiltration, im Invest nicht enthalten!
28	GAK-Filter	Einfahr-/Opti-mierungsphase	TS	nein	-
30	GAK-Filter	Regelbetrieb	VS	ja	Umbau Sandfilter zu GAK
33	GAK-Filter	Regelbetrieb	TS	ja	Biofor zu DynaCarbon umgebaut
2	TF+Ozon+GAK**	Einfahr-/Opti-mierungsphase	TS	nein	-

*Bisher als Pilotanlage genehmigt aber im dauerhaften Betrieb
**Investitionskosten wurden nicht ausgewertet

PAK-Verfahren

Die Investitionskosten der Anlagen mit PAK-Verfahren sind in Abbildung 33 zusammen mit möglichen Einflussfaktoren auf die Kosten dargestellt. Die zwei Anlagen mit PAK-Simultandosierung in einen MBR (Nr. 15 und Nr. 27) weisen die geringsten Investitionskosten auf. Der Unterschied zu den anderen Verfahrensvarianten ist so groß, dass diese eigentlich separat betrachtet werden müssten. Ebenso zeigt sich ein Einfluss für die Anlagen, in denen vorhandene Filter als Abtrennstufe genutzt werden (Nr. 13 und Nr. 17). Einzelne Anlagen benötigen zudem kein zusätzliches Hebewerk und weisen somit trotz Vollstrombehandlung einen vergleichsweise niedrigen Investitionsbedarf auf (Nr. 6 und Nr. 11).

Einen kostensteigernden Effekt hat dagegen beispielsweise die Ausführung mit nachgeschalteter PAK-Stufe inklusive Hebewerk, Sedimentation und Filtration als fast Vollstrombehandlung (Nr. 32). Der Einfluss einer Vollstrombehandlung mit Hebewerk und Filtration zeigt sich aber auch ohne Sedimentationsstufe (Nr. 3). Ergänzend zu den genannten übergeordneten Einflüssen kommen immer auch örtliche Baubedingungen zur Wasserhaltung u. ä. hinzu, die sehr variieren können. Insgesamt ergibt sich aus der Gesamtheit der Einflussgrößen eine große Spannbreite der Investitionskosten für die PAK-Anlagen.

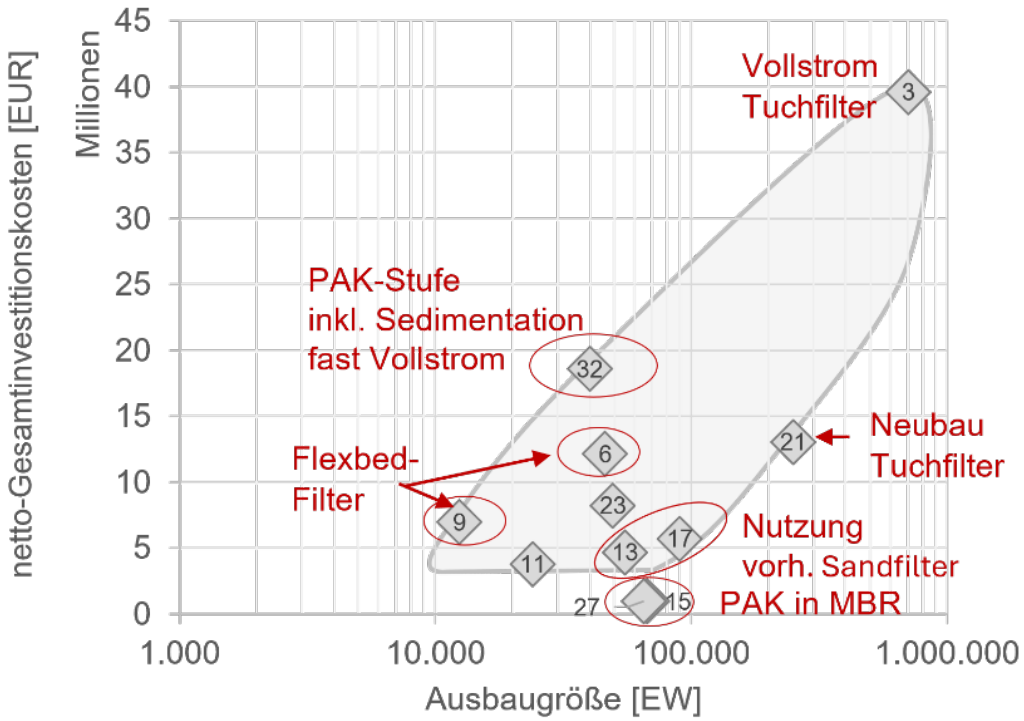


Abbildung 33: Analyse der Einflussfaktoren auf die Gesamtinvestitionskosten bei den PAK-Anlagen (die Zahlen der Datenpunkte entsprechen der Kläranlagen-ID)

Ozonverfahren

Bei den ozonbasierten Verfahren, deren Investitionskosten zusammen mit Anmerkungen zu den anlagenspezifischen Unterschieden in Abbildung 34 dargestellt sind, nutzen einige der realisierten Verfahrensstufen in Nordrhein-Westfalen eine zuvor bereits vorhandene Abwasserteichanlage als Nachbehandlung. Diese vorhandene Nachbehandlung und der somit hier nicht enthaltene Kostenanteil für den Bau einer neuen Nachbehandlung, beispielsweise als

Sandfiltration, zeigt sich sehr deutlich in einer Abminderung der erforderlichen Investitionskosten (Nr. 5, 8, 14). Aber auch die Nutzung zuvor bereits vorhandener Sandfilter (Nr. 22, 24) zeigt Kostenvorteile. Dagegen sind die Anlagen mit den hier besonders hohen Investitionskosten jeweils auf eine Vollstrombehandlung ausgelegt. Ozonanlagen, bei denen Kosten des Baus eines Wirbelbettes als Nachbehandlung enthalten sind (Nr. 1, 12, 29), scheinen insgesamt auch von niedrigen Investitionskosten zu profitieren. Es ist aber zu berücksichtigen, dass auch hier örtliche Bedingungen zum Baugrund o. ä. nicht bei der Analyse berücksichtigt werden können.

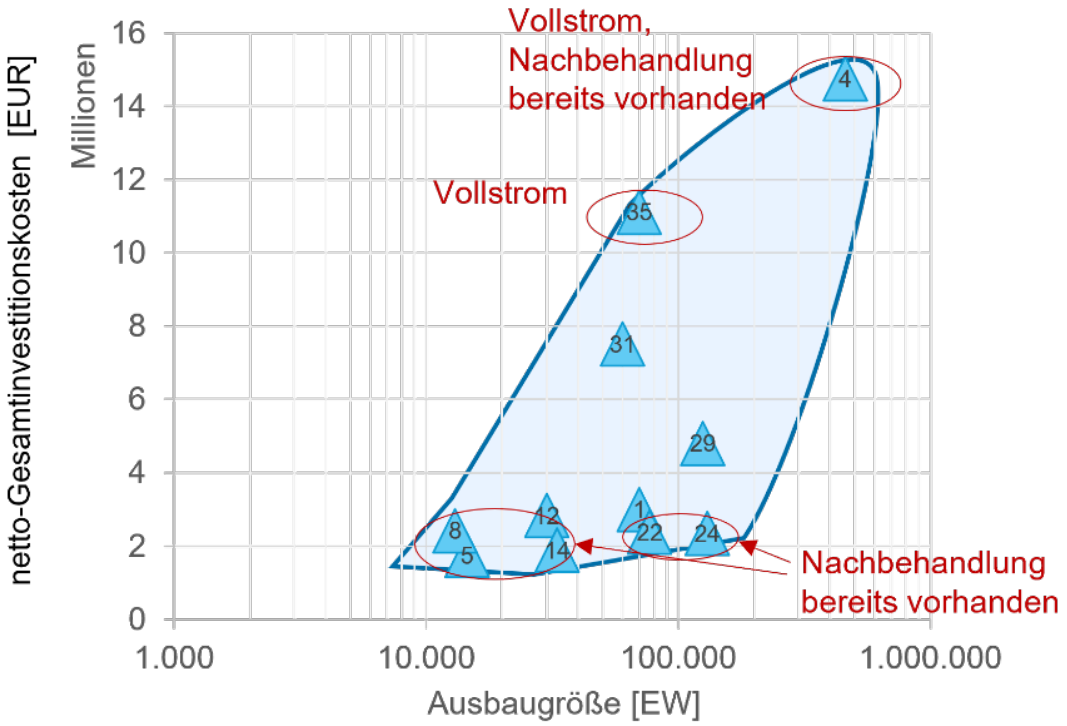


Abbildung 34: Analyse der Einflussfaktoren auf die Gesamtinvestitionskosten der Ozon-Anlagen (die Zahlen der Datenpunkte entsprechen der Kläranlagen-ID)

GAK-Verfahren

Bei den in Nordrhein-Westfalen realisierten GAK-Verfahren wurde, wie die in Abbildung 35 enthaltenen Anmerkungen zeigen, vielfach auf vorhandene Bausubstanz, d. h. vorhandene Filtrationsstufen, zurückgegriffen (Nr. 7, 18, 30, 33). Die Umbaukosten sind in den Kostenangaben enthalten, scheinen aber vergleichsweise gering zu sein. Auch bei GAK-Filtern können die Bedingungen vor Ort sehr unterschiedlich sein. Zusätzliche Einflüsse beispielsweise durch die Wahl des Neubaus als Stahlkessel oder Betonfilter können auf Basis der bestehenden Datengrundlage nicht weiter herausgearbeitet werden.

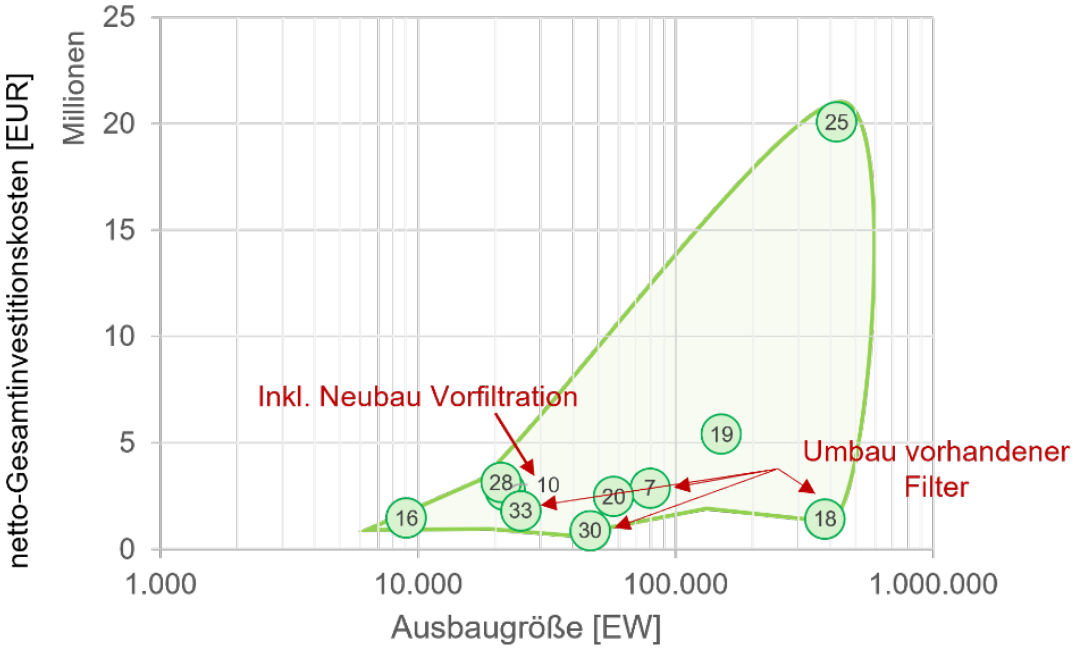


Abbildung 35: Analyse der Einflussfaktoren auf die Gesamtinvestitionskosten bei den GAK-Anlagen (die Zahlen der Datenpunkte entsprechen der Kläranlagen-ID)

Vergleichbarkeit der Investitionskosten

Insbesondere die Nutzung der vorhandenen Bausubstanz hat gemäß der vorherigen Analyse einen großen Einfluss auf die Investitionskosten. Dies erschwert den direkten Vergleich der verschiedenen realisierten Anlagen. Um die Investitionskosten dennoch vergleichbarer zu machen, werden im Folgenden zusätzliche Ersatzwerte für genutzte oder umgebaute vorhandene Bausubstanz bei den Investitionen mitberücksichtigt. Das bedeutet, wie im Abschnitt zur Methodik erläutert, dass bei Anlagen, die beispielsweise einen vorhandenen Sandfilter zur Nachbehandlung, als PAK-Abtrennstufe oder zur Umrüstung in einen GAK-Filter nutzen, die erforderlichen Investitionen für den Bau dieser Stufe als theoretische Kosten mitberücksichtigt werden. Dies betrifft auch Anlagen, die vorhandene Abwasserteichanlagen nutzen.

Eine weitere Verbesserung der Vergleichbarkeit wird erreicht, indem die Investitionskosten nicht in Abhängigkeit der Ausbaugröße oder Anschlussbelastung der Kläranlage, sondern über die jeweilige (maximale) Auslegungswassermenge verglichen werden. Die Analyse der Kosten hat gezeigt, dass hierdurch die höchste Korrelation und Vergleichbarkeit der Investitionskosten erreicht wird. Dies ist der Fall, da die Dimensionierung der Verfahrenskomponenten der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion (Reaktoren, Kontaktbecken, Adsorber, etc.) eher hydraulisch, d. h. bezogen auf eine Kontaktzeit erfolgt. Weniger Einfluss auf die Investitionskosten hat die zu behandelnde Fracht oder die CSB-Zulaufbelastung der Kläranlage.

Die realen Investitionskosten bezogen auf die Auslegungswassermenge der betrachteten Anlagen weisen große Spannbreiten auf, da die Rahmenbedingungen sehr unterschiedlich sind. Ein Vergleich der Kosten ist dadurch aufgrund einer sehr ungenauen Regressionskurve nicht möglich (Abbildung 36). Die Investitionskosten für die anhand von Ersatzwerten für genutzte Bausubstanz „normierten“ Kosten, in Abhängigkeit der Auslegungswassermenge, zeigt dagegen eine deutlich bessere Korrelation (Abbildung 37). Der dargestellte Trend verläuft für alle Verfahrensvarianten sehr ähnlich. Diese Darstellung liefert die Möglichkeit der Abschätzung

einer möglichen Erstinvestition, sie erfordert aber zunächst die Festlegung der maximal zu behandelnden Auslegungswassermenge. Die Darstellung ist nicht dafür geeignet, reale Kosten über mehrere Standorte bzw. Kläranlagen hochzurechnen, da wie gezeigt, die Investitionskosten im Einzelfall häufig deutlich niedriger ausfallen können.

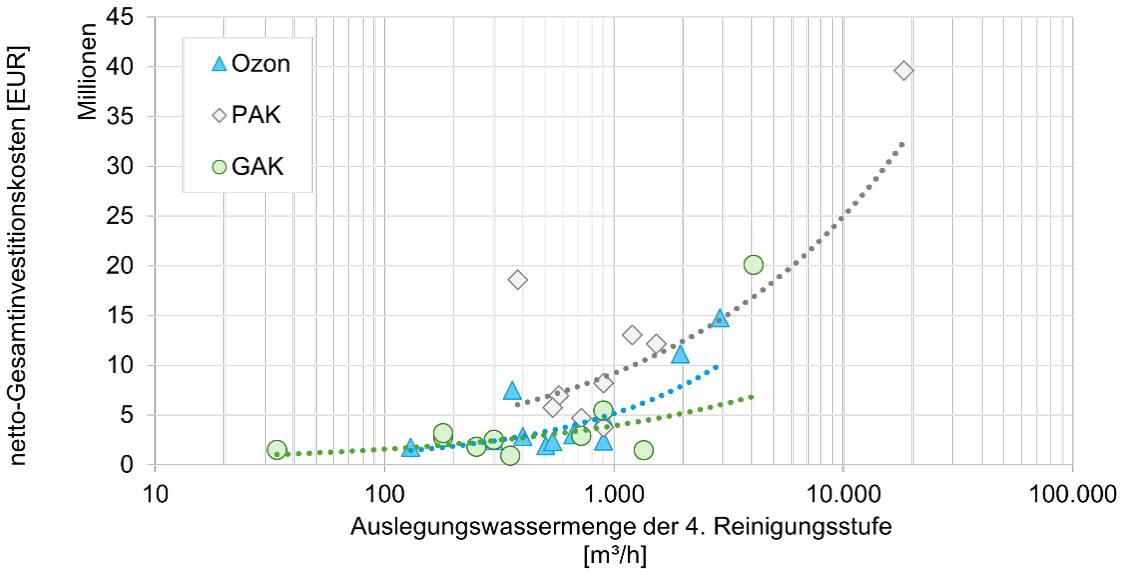


Abbildung 36: Gesamtinvestitionskosten (netto) je nach Technologie in Bezug zur Auslegungswassermenge (die Kosten sind auf das Bezugsjahr 2024 normiert)

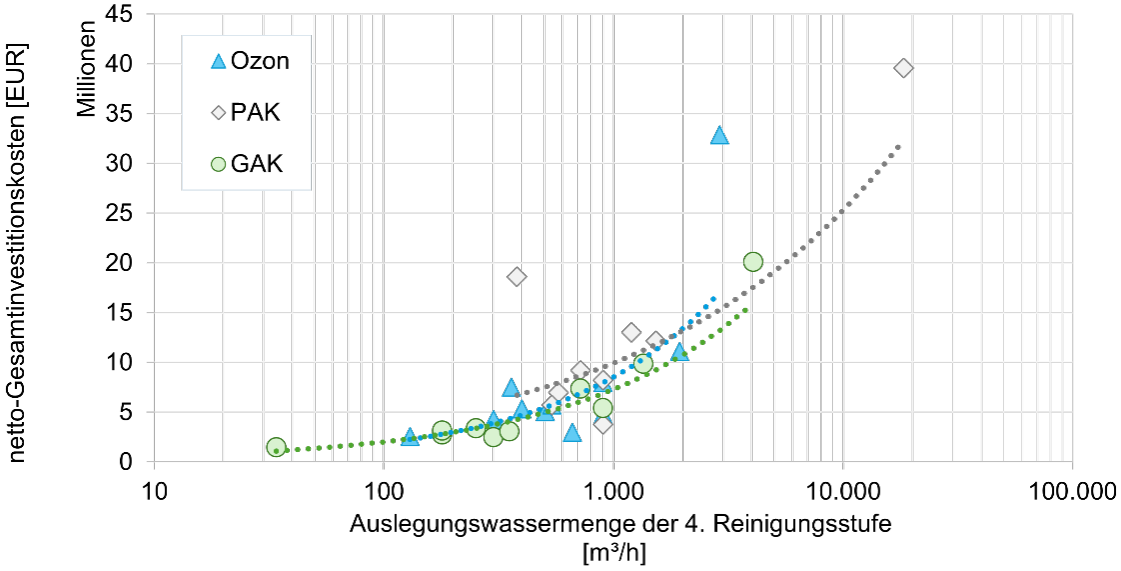


Abbildung 37: Gesamtinvestitionskosten (netto) je nach Technologie in Bezug zur Auslegungswassermenge. Die Kosten sind auf das Bezugsjahr 2024 normiert und ein Ersatzwert für genutzte Bausubstanz wurde angerechnet.

5.2.2 Betriebskosten

Die von den Kläranlagenbetreibenden angegebenen realen Betriebsmittelverbräuche der betrachteten Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion wurden mit den in Kapitel 5.1 genannten einheitlichen Kostenkennzahlen in jährliche Betriebskosten überführt.

Diese Betriebsmittelkosten wurden durch weitere Angaben der Betreibenden bezüglich des erforderlichen Personaleinsatzes sowie zu weiteren externen Wartungskosten ergänzt. Zusätzliche Kosten für Analytik wurden hier nicht betrachtet.

Die Angaben der Betriebskosten sind teilweise mit hohen Ungenauigkeiten verbunden. Einerseits können die realen Verbräuche je nach Betriebsjahr schwanken, andererseits werden nicht alle Angaben auf allen Standorten bzw. Anlagen in der gleichen Qualität erfasst. Teilweise mussten auch Annahmen getroffen werden, um fehlende Angaben zu ergänzen.

Insgesamt sind bei der Interpretation der ausgewerteten Betriebskosten folgende Punkte zu berücksichtigen:

- **Wartungskosten**: Einige Betreibende haben keine speziellen Kosten für Wartungsverträge ausgewiesen. Da auch diese Anlagen einer Wartung unterliegen, die ggf. gesondert beauftragt wird, haben die Anlagen einen Ersatzwert in Höhe von 1 % der Investitionskosten als Wert zugewiesen bekommen.
- **Personalkosten**: Für viele Betreibende ist es trotz Regelbetrieb schwierig, den Personalbedarf für die Mikroschadstoffreduktion anzugeben. Der Personaleinsatz kann je nach erforderlicher, nicht täglicher Arbeit, wie beispielsweise dem Austausch der granulierten Aktivkohle, deutlich variieren. Auch unregelmäßige Reinigungs-/ und Wartungsintervalle haben einen Einfluss auf die Personalkosten. Zudem besteht insbesondere in der Einfahrphase ein deutlich höherer Betreuungsaufwand zur Überwachung der Anlage. Insgesamt liegen von sieben der 33 ausgewerteten Anlagen keine Angaben zu Personalkosten vor. In diesen Fällen wurde auf Basis der anderen Rückmeldungen pauschal ein Wert in Höhe von 0,5 Vollzeitmitarbeiter/innen pro Jahr angenommen.
- **Betriebsmittel**: Die Betriebsmittelverbräuche für die Einsatzstoffe (Aktivkohle, Flüssigsauerstoff, Fällmittel) sind bei allen Verfahrensvarianten abhängig von den Randbedingungen (u. a. Abwassermatrix) sowie von der Betriebsweise bzw. dem Reinigungsziel.
- **Energiebedarf**: Insgesamt liegen von vier der hier 33 ausgewerteten Anlagen keine Angaben zum elektrischen Energiebedarf der Verfahrensstufe der Mikroschadstoffreduktion vor. Da ohne Angabe der Energiekosten für diese Anlagen ein Vergleich der Betriebskosten nicht möglich wäre, wurde in diesen Einzelfällen für den Energiebedarf der Wert in Höhe eines allgemeinen Mittelwertes über alle übrigen Anlagen unabhängig des Verfahrens in Höhe von 50 Wh/m³ angenommen. Dieser entspricht etwa dem Median aller ausgewerteten Anlagen (vgl. dazu Kapitel 3).
- **Fällmittel / Polymer:** Abgefragt wurde nur der für die Mikroschadstoffreduktion zusätzlich anfallende Bedarf an Fäll- oder Flockungshilfsmittel, d.h. nur der Bedarf, der zusätzlich zu der Aufgabe der chemischen Phosphorelimination anfällt. Hier eine Differenzierung anzunehmen, ist im Betrieb jedoch schwierig. Insgesamt liegen von den elf Anlagen mit Pulveraktivkohle nur von vier Anlagen Angaben zu Fäll- / Flockungshilfsmittel vor. Die Vergleichbarkeit ist hierdurch eingeschränkt.

Im Ergebnis liegen die spezifischen Betriebskosten bezogen auf die behandelte Abwassermenge überwiegend in einem großen Bereich zwischen 0,02 und 0,13 €/m³. Dabei zeigt sich auch innerhalb der Verfahrensvarianten eine große Spannbreite. In Abbildung 38 sind die spezifischen Betriebskosten pro Kubikmeter behandelter Abwassermenge für die ausgewerteten Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion dargestellt.

Besonders bei den GAK-Filtrationen sind die sehr unterschiedlichen Betriebskosten auffällig. Während bei Ozon hauptsächlich der Strombedarf und die Wartungskosten variieren, sind es bei den GAK-Filtern vor allem die Kosten für den GAK-Verbrauch. Das kann auch daran liegen, dass diese Betriebsmittelverbräuche aufgrund der sehr unregelmäßigen Intervalle noch nicht von allen Betreibenden mit tatsächlichen Werten hinterlegt sind, sondern vielfach geplanten Austauschintervallen entsprechen. Die Energiekosten variieren ebenso deutlich bei den GAK-Filtern aufgrund unterschiedlicher Förderhöhen. Bei den PAK-Verfahren ist die Spreizung im Vergleich am geringsten. Der Einfluss unterschiedlicher PAK-Dosiermengen je nach Verfahren macht sich aber ebenso bemerkbar wie insbesondere die nicht eindeutige und von allen Betreibenden angegebenen Fällmittelkosten, die zusätzlich für die PAK-Abtrennung eingesetzt werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass auch die Betriebskosten stark von den örtlichen Randbedingungen abhängen.

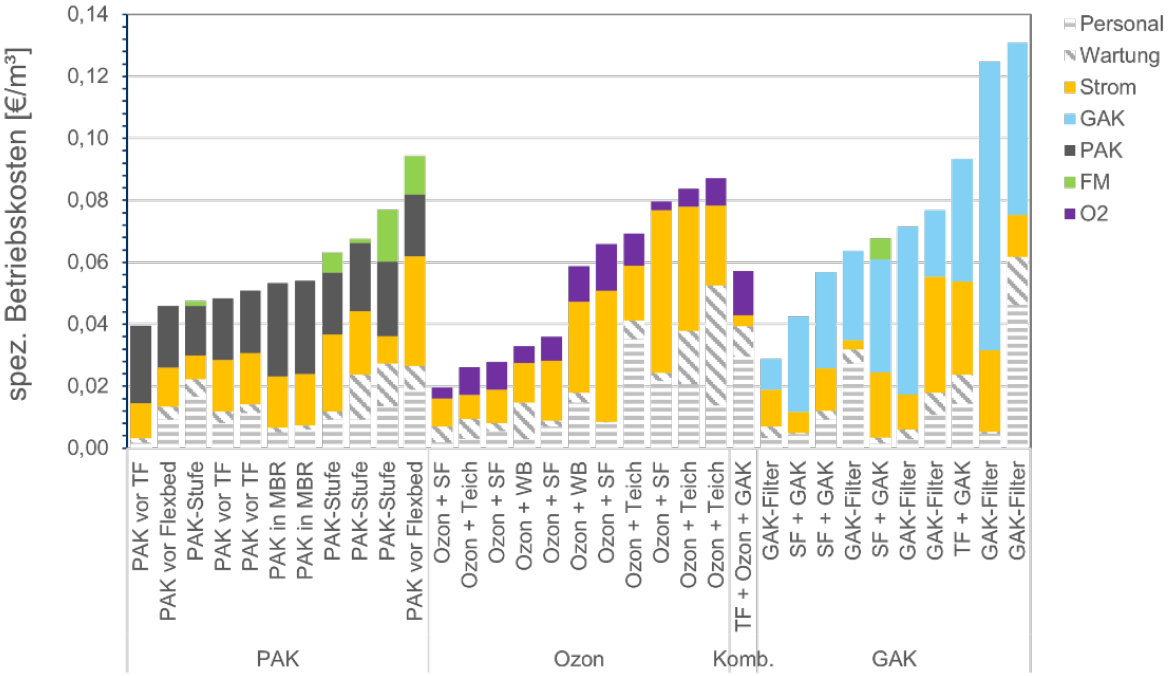


Abbildung 38: Spezifische Betriebskosten pro m³ behandelter Abwassermenge für die ausgewerteten Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion

5.2.3 Gesamtkosten / Jahreskosten

Die jährlichen Gesamtkosten der Mikroschadstoffreduktion setzen sich aus den Kapitalkosten und den laufenden Betriebskosten zusammen. Die Kapitalkosten wurden aus den Investitionskosten unter Verwendung der in Kapitel 5.1 genannten Nutzungsdauern für Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik sowie des einheitlichen Zinssatzes berechnet. Zudem wurden die Investitionskosten wie zuvor beschrieben auf das Jahr 2024 über Preisindizes skaliert. Auf diese Weise konnten für alle Anlagen vergleichbare jährliche Gesamtkostenberechnet werden.

Ergänzend wurden bei den Investitionskosten als ein Kostenszenario wie in Kapitel 5.1 beschrieben weitere theoretische Ersatzwerte für die Investitionskosten der genutzten Bausubstanz berücksichtigt. Hiermit sollen eine bessere Vergleichbarkeit und Normierung der Kosten auf den Fall eines „Neubaus auf die grüne Wiese“ ermöglicht werden. Die realen Kosten bei Nutzung von vorhandener Bausubstanz können je nach Situation niedriger ausfallen.

Die sich daraus ergebenden jährlichen spezifischen Gesamtkosten bezogen auf die behandelte Abwassermenge liegen bei etwa 0,08 bis 0,44 €/m³$_{beh.}$ und weisen damit eine große Spannbreite auf. Eine eindeutige Zuordnung oder Korrelation zu bestimmen Technologien oder Verfahrensvarianten ist nicht möglich (siehe Abbildung 39).

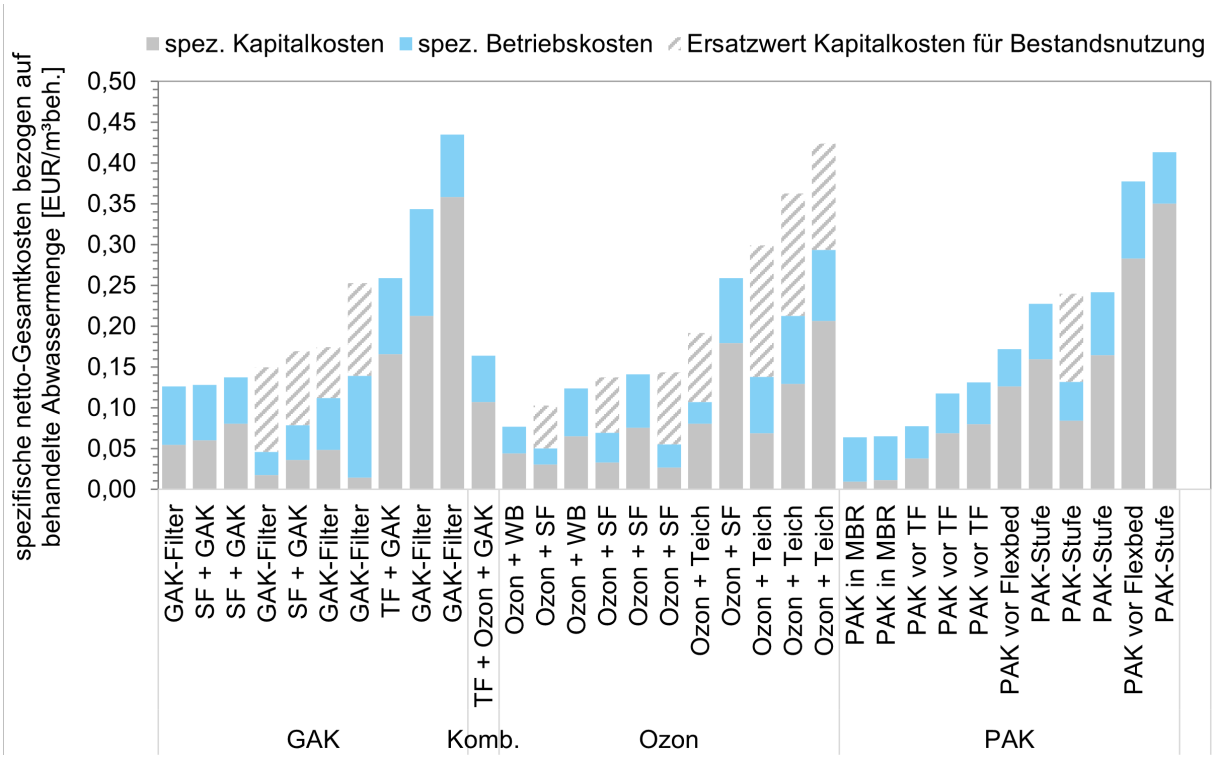


Abbildung 39: Spezifischer netto-Gesamtkosten (Jahreskosten) bezogen auf die behandelte Abwassermenge differenziert nach Kapital- und Betriebskosten sowie unter Annahme eines theoretischen Ersatzwertes für genutzte Bausubstanz

Die spezifischen Jahreskosten ohne Berücksichtigung des Szenarios mit theoretischen Ersatzwerten für genutzte Bausubstanz zeigen eine deutliche Degression mit steigender behandelter Jahresabwassermenge. Zudem sinkt die Spreizung der spezifischen Jahreskosten mit

zunehmender behandelter Jahresabwassermenge (Abbildung 40). Noch deutlicher wird diese Beobachtung unter Berücksichtigung des Szenarios mit theoretischen Ersatzwerten für genutzte Bausubstanz (Abbildung 41). Hierbei ist zu betonen, dass die Datenbasis bereits Anlagen zwischen 9.000 und 705.00 EW Ausbaugröße abdeckt.

Die in Abbildung 41 gezeigten Gesamtkosten eignen sich nicht für eine Hochskalierung der Kosten für die Behandlung von beispielsweise der Abwassermenge aller relevanten Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen. Es kann hiermit aber, entsprechend der zu behandelnden Abwassermenge, eine jeweilige Spannbreite der Kosten für den Fall eines Neubaus der gesamten erforderlichen Anlagenkomponenten abgeschätzt werden.

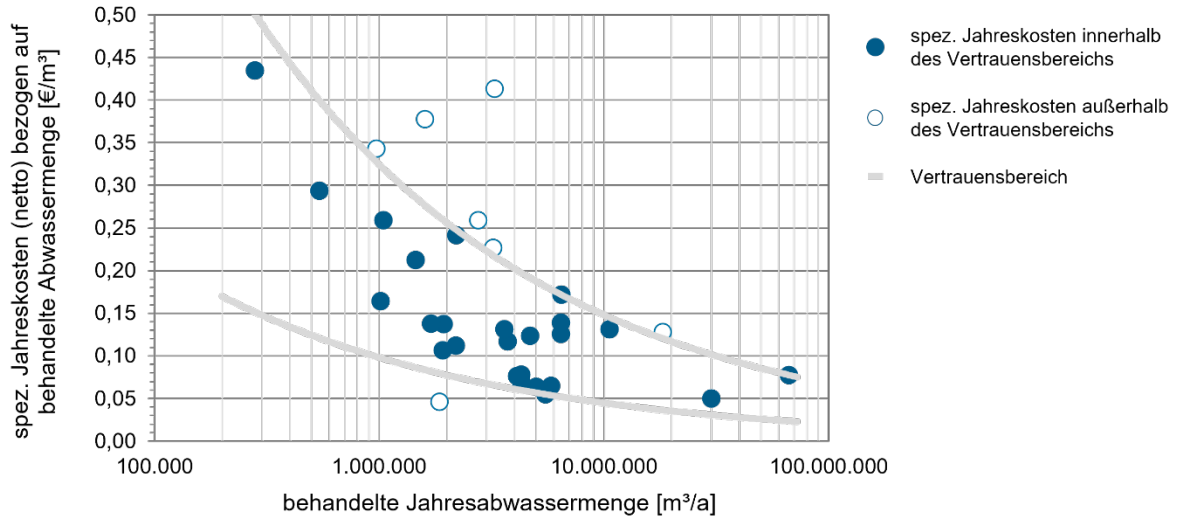


Abbildung 40: Spezifische Jahreskosten (netto) bezogen auf die behandelte Abwassermenge in €/m³ mit Angabe eines Kostenrahmens als Vertrauensintervall, in dem sich statisch 80 % der ausgewerteten Kosten befinden ohne Berücksichtigung eines Szenarios mit theoretischen Ersatzwerten für genutzte Bausubstanz

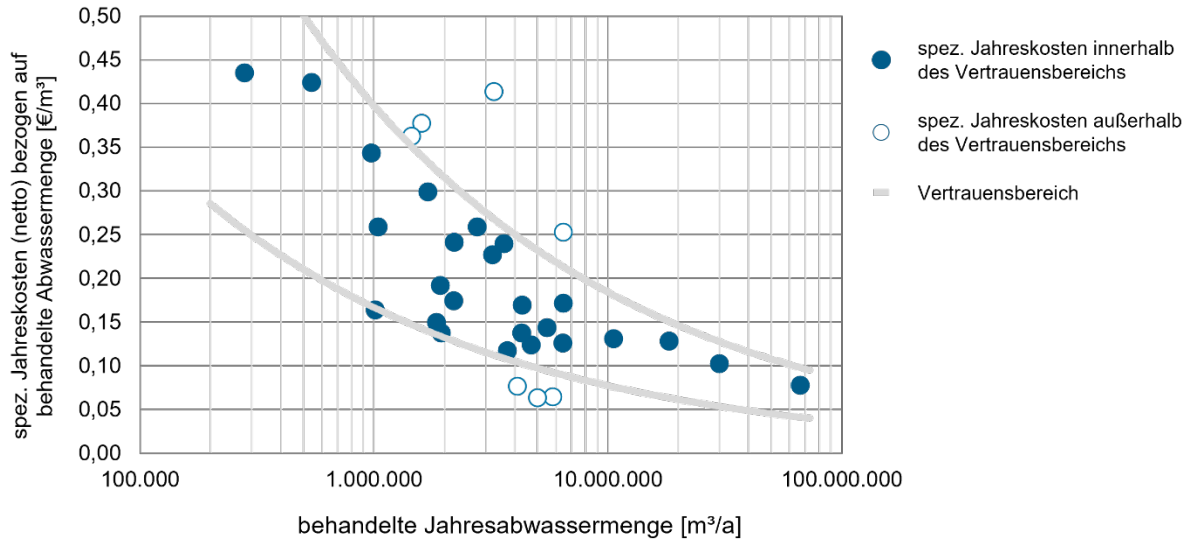


Abbildung 41: Spezifische Jahreskosten (netto) bezogen auf die behandelte Abwassermenge in €/m³ mit Angabe eines Kostenrahmens als Vertrauensintervall, in dem sich statisch 80% der ausgewerteten Kosten befinden und unter Berücksichtigung von theoretischen Ersatzwerten für genutzte Bausubstanz

Für viele Anlagen ergibt sich ein vergleichsweiser hoher Anteil der Kapitalkosten an den Gesamtkosten von durchschnittlich 56 % (Abbildung 42). Unter Einbeziehung des Ersatzwerts für genutzte Bausubstanz steigt der Anteil im Durchschnitt auf 67 % (Abbildung 43). Lediglich Kläranlagen, die als Verfahren eine Simultandosierung von PAK oder ein nachgeschaltetes Verfahren ohne Sedimentationsstufe haben, weisen einen größeren Anteil bei den Betriebskosten auf. Der Anteil der Kapitalkosten unterliegt zudem den jeweils gewählten Abschreibungszeiten und kann daher im Einzelfall auch anders ausfallen.

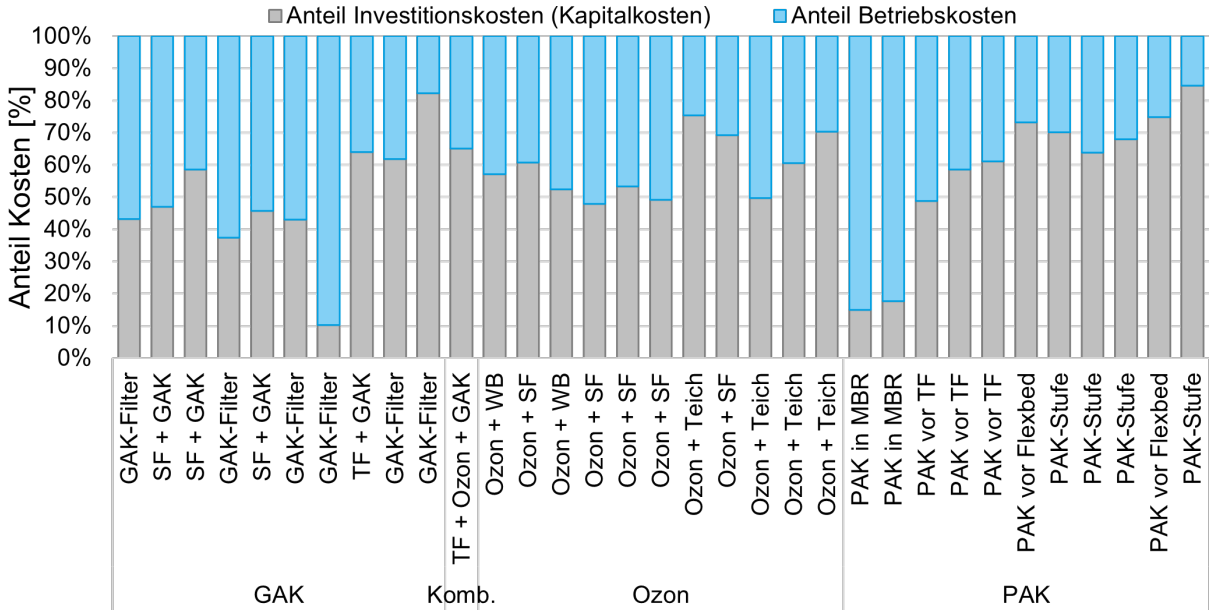


Abbildung 42: Anteil der Kapital- und Betriebskosten an den Gesamtkosten der ausgewerteten Anlagen ohne Berücksichtigung eines Ersatzwertes für die theoretischen Investitionskosten der Bestandsnutzung.

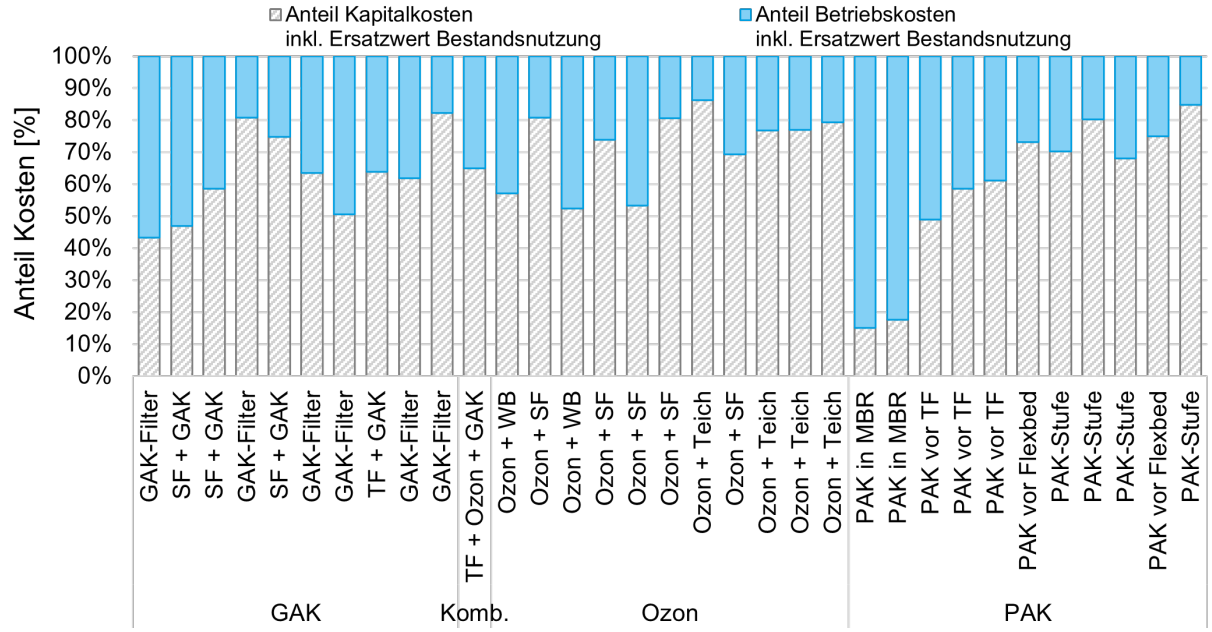


Abbildung 43: Anteil der Kapital- und Betriebskosten an den Gesamtkosten der ausgewerteten Anlagen inklusive Berücksichtigung eines Ersatzwertes für die theoretischen Investitionskosten der Bestandsnutzung

6 Fazit und Ausblick

Die durchgeführte Erhebung von Betreiberdaten gibt mit einer Gesamtzahl von insgesamt 35 beteiligten Kläranlagen einen breiten Überblick über den Stand zu Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen. Die Auswertung umfasst mit jeweils elf Anlagen die etablierten Technologien Ozonung, Dosierung von pulverförmiger Aktivkohle (PAK), Filtration über granulare Aktivkohle (GAK) sowie eine Anlage mit Kombinationsverfahren und einem naturnahen Verfahren. Auch wenn die Technologien in verschiedenen Varianten realisiert sind, ermöglicht die hohe Anzahl der ausgewerteten Anlagen die Ableitung detaillierter Aussagen zum Status quo hinsichtlich der Themen Energiebedarf, Nachhaltigkeit und Kosten.

Zu berücksichtigen ist, dass die Ergebnisse den Stand der Datenerhebung aus dem Jahr 2025 wiedergeben und nicht immer den optimierten Regelbetrieb der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion beinhalten, da einige Anlagen noch im Bau, in der Inbetriebnahme oder in der Optimierungsphase sind. Mit der innerhalb der nächsten Jahre erwarteten Zunahme an Anlagen zur Reduktion von Mikroschadstoffen wird sich die Datengrundlage stetig vergrößern und es werden in zunehmendem Umfang Betriebsdaten und Erfahrungswerte vorliegen.

Zu den wesentlichen Ergebnissen der Bestandsaufnahme gehört die Auswertung des elektrischen Energiebedarfs der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion mit einer großen Spannbreite von 1,0 bis 15 kWh/E/a bzw. 10 bis 175 Wh/m³. Bei Ansatz des Medians von etwa 4,4 kWh/E/a erhöht sich der Gesamtenergiebedarf einer „Musterkläranlage“ mit Belebtschlammverfahren und anaerober Schlammstabilisierung der Größenklasse 3, 4 und 5 mit 35 kWh/E/a um rund 12,6 %. Die detaillierte Betrachtung der Einflussfaktoren hat für jedes Verfahren die Haupteinflüsse identifiziert. Zukünftig sind weitere Optimierungen möglich, da auch die ausgewerteten Verfahrensstufen teilweise noch in einer Einfahrphase sind und zudem nur ein einzelnes Betriebsjahr betrachtet wurde.

Hinsichtlich der Nachhaltigkeit konnten die CO_2e-Emissionen der Mikroschadstoffreduktion detailliert und vergleichend analysiert werden. Auch hier zeigen sich große Spannbreiten, die maßgeblich auf standortspezifische Rahmenbedingungen zurückzuführen sind, insbesondere auf Art und Umfang des eingesetzten Betriebsmittelverbrauchs. Eine Szenariobetrachtung hat aufgezeigt, dass die Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion zwischen 7 und 23 % der summierten Emissionen aus konventioneller Behandlung und Mikroschadstoffreduktion ausmachen. Der konsequente Einsatz erneuerbarer Energien und biogener Produkte könnte den Anteil aber auf 5 % reduzieren.

Die Kosten der Mikroschadstoffreduktion wurden auf Basis der Bestandsaufnahme umfassend ausgewertet. Wie bei den vorgenannten Aspekten liegen auch hinsichtlich der Kosten große Spannbreiten vor. Die jährlichen Gesamtkosten (netto) bezogen auf die behandelte Abwassermenge liegen bei etwa 0,08 bis 0,44 €/m^3_{beh}. Als wesentlicher Einflussfaktor konnten Synergien durch Nutzung vorhandener Bausubstanz und Infrastruktur identifiziert werden. Die Vergleichbarkeit der Kosten verbessert sich deutlich, wenn diese auf die Auslegungswassermenge statt auf die Ausbaugröße oder Anschlussbelastung bezogen werden.

Die Auswertung stellt Behörden, planenden Ingenieurbüros, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Betreibenden Informationen zur Verfügung, die eine Einordnung geplanter Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in dem zu erwartenden zusätzlichen Energiebedarf, CO_2-Footprint, Investitionskosten und Betriebskosten ermöglicht. Für Bestandsanlagen können die Informationen genutzt werden, um die eigene Anlage im Vergleich zu

anderen Anlagen einzuordnen (Benchmark), auch wenn für einen direkten Vergleich immer die örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen.

Der Betrieb der hier ausgewerteten Anlagen zur Reduktion von Mikroschadstoffen erfolgt i. d. R. auf Basis der bisher in Nordrhein-Westfalen verwendeten Stoffliste mit sechs Indikatorsubstanzen (KOM-M.NRW, 2016). Vor diesem Kontext sind auch die Kosten und Kennzahlen zu sehen. Die Reduktion ist künftig gemäß der EU-KARL Teil C, in Tabelle 3 aufgelisteten 12 Substanzen der Kategorien 1 (Stoffe, die sehr leicht zu behandeln sind) und 2 (Stoffe, die leicht zu entfernen sind) bzw. deren Vorgaben gemäß nationaler Umsetzung nachzuweisen. Die Mitgliedstaaten haben hierfür eine geeignete Überwachungsmethode festzulegen. Unter Berücksichtigung des Gewässermonitorings, welches im Rahmen der Maßnahmenprogramme zur Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie durchzuführen ist, wird sich in den nächsten Jahren ein zunehmend dichteres Bild der Gewässerbelastung mit Mikroschadstoffen wie auch des Erfolgs der Maßnahmen zur Reduktion der Einträge ergeben.

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AK	Aktivkohle
BB	Belebungsbecken (biologische Abwasserbehandlung)
CO_2e	CO_2 Äquivalente
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Dissolved Organic Carbon (Gelöster Organischer Kohlenstoff)
ID	Identifikationsnummer (hier: Interne Nummerierung der Kläranlagen)
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuerungs-, und Regeltechnik
EU-KARL	Europäische Kommunalabwasserrichtlinie
EW	Einwohnerwert
FM	Fällmittel
GAK	Granulierte Aktivkohle
GWP	Global Warming Potential
IPCC	International Panel for Climate Change
JAM	Jahresabwassermenge
JSM	Jahresschmutzwassermenge
KA	Kläranlage
KOM-M NRW	Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW
KomS	Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg
KVR	Kostenvergleichsrechnung
LANUK NRW	Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen
LOX	Liquid Oxygen (Flüssigsauerstoff)
MA	Mitarbeitender
MBR	Membranbioreaktor
O_3	Ozon
PAK	Pulveraktivkohle
RBF^{plus}	$Retentionsbodenfilter^{plus}$
SF	Sandfilter
TF	Tuchfilter
TS	Teilstrom
VS	Vollstrom
VSA	Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
WB	Wirbelbett
4. RS	Vierte Reinigungsstufe (Synonym für Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion)

Literatur

Alt, K. (2018): „Umbau von Flockungsfiltrationsanlagen zu Aktivkohle- / Ozonanlagen“, Vortrag im Rahmen Veranstaltung Oswald Schulze Stiftung, 27. September 2018

Alt, K.; Beckhoff, M.; John / Sterzenbach, P.: „MBR und Tuchfilter mit PAK-Dosierung als wirtschaftliche Alternative?“, Beitrag im Rahmen VSA Micropoll-Fachtagung Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA Erfahrungen und Ausblick, Dienstag 12. März 2024, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA

ASKURIS (2016): „Anthropogene Spurenstoffe und Krankheitserreger im urbanen Wasserkreislauf, Bewertung, Barrieren und Risikokommunikation (ASKURIS)“, Herausgeber, Jekel, M.; Ruhl, A.S. / Universitätsverlag der TU Berlin, 2016; DOI 10.14279/depositonce-4979 http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-4979

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 , 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.

BMU/UBA (2019): Ergebnispapier - Ergebnisse der Phase 2 des Stakeholder-Dialogs »Spurenstoffstrategie des Bundes« zur Umsetzung von Maßnahmen für die Reduktion von Spurenstoffeinträgen in die Gewässer. Eds.: Hillenbrand, T.; Tettenborn, F.; Bloser, M.; Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit/Dessau: Umweltbundesamt.

Böhler M.; Joss A.; McArdell 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.

Destatis, 2025: Baupreisindizes: „Deutschland, Jahre, Messzahlen mit/ohne Umsatzsteuer, Gebäudearten, Bauarbeiten (Hochbau)”, Statistisches Bundesamt, URL: https://genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/61261/table/61261-0001

DIN EN ISO 14040/44 (2021): „Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen”, 2021-02, DOI https://dx.doi.org/10.31030/3179655

DWA-A 216 (2015): „Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen“, Arbeitsblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef 2014

DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 (2016): „Aktivkohleeinsatz auf Kläranlagen“, Fachbeitrag in: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2016 (63) Nr. 12

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 227 (2014): “Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren)“, Merkblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef 2014

DWA-M 230-2 (2022): „Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung - Teil 2: Motivation und Vorgehen zur Erstellung von CO_2e-Bilanzen“, ISBN: 978-3-96862-521-8,

10/2022, Merkblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA Hennef 2022)

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 2021

ELWAS WEB: Elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW, https://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.xhtml

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

Hillebrandt, D.; Firk, J.; Otto, U.; Gohlke, J. (2024): „Verfahrenskombination Ultrafiltration / Aktivkohlefiltration – Unsere Erfahrungen“, Vortrag 5. Juni 2024 im Rahmen 13. KomS Technologieforum n Uhldingen, Baden-Württemberg

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, 28. September 2024

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/wassertechnik/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.

KlickTool (2025): „Webtool – Klimabilanz für Kläranlagen mit einem KlicK”, Umwelttechnik BW GmbH, Landesagentur für Umwelttechnik und Ressourceneffizienz Baden-Württemberg, URL: https://klimabilanzklaeranlage.de/

KOM-M.NRW (2016): „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination – 2. Auflage“, Herausgeber: ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW, Köln.

LANUK NRW (2026a) „Mikroschadstoffreduktion auf Kläranlagen in NRW: Verfahren und Hinweise zur Verfahrensauswahl“. LANUK-Fachbericht 172 veröffentlicht unter https://www.lanuk.nrw.de/publikationen/publikation/mikroschadstoffreduktion-auf-klaeranlagen-in-nrw-verfahren-und-hinweise-zur-verfahrensauswahl

LANUK NRW (2026b): „Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen“ 21. Auflage, Fachbericht 169

LAWA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). 8. überarbeitete Auflage, Herausgabe in Kooperation DWA und DVGW.

Menn, K.: Mikroschadstoffstrategie in NRW – Stand der Umsetzung. In: Tagungsband zum 22. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium. RWTH Aachen, 2024

Pinnekamp, J.; Mousel, D.; Krebber, K.; Palmowski, L.; Bolle, F.-W.; Gredigk Hoffmann, S.; Genzowsky, K.; Miethig, S.; Krüger, M.; Eckers, S.; Simsheuser, C.; Lyko, S.; Thöle, D. (2015). „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase II“, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV), URL : https://www.lanuk.nrw.de/fileadmin/tx_mmkresearchprojects/Enve-los_II_Langbericht_FINAL.pdf

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.

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

Thalmann U.; Egli C. (2025): EMV-Kombiverfahren auf der ARA Altenrhein: Fazit nach fünf Betriebsjahren. Aqua & Gas, Nr. 2, S. 17 – 21.

UBA (2025): „Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2024“, DOI: https://doi.org/10.60810/openumwelt-7844 , ISSN 1862-4359, Dessau-Roßlau, April 2025

VSA (2016): „Pulveraktivkohle in der Schlammbehandlung“ (Faktenblatt, Stand Mai 2016), Herausgeber: Plattform „Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen“ www.micropoll.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 (2025): „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/

Wirtschaft.NRW (2025): “Carbon Management Strategie NRW”, Herausgeber: Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIKE NRW), URL: https://wirtschaft.nrw/carbon-management-strategie-nrw

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kommunale Kläranlagen mit Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen, die an der Datenerhebung teilgenommen haben (Stand Februar 2025). Der aktuelle Ausbaustatus und weitere Informationen sind unter www.mikroschadstoffe.nrw.de verfügbar © Land NRW 2026 8

Abbildung 2: Anzahl der (voraussichtlich) ausgebauten Kläranlagen zur Mikroschadstoffreduktion in Nord-rhein-Westfalen entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025) 10

Abbildung 3: Anzahl der in Nordrhein-Westfalen an der Bestandsaufnahme teilgenommenen vierten Reinigungsstufen je Technologie sowie deren Betriebsstatus (Stand Februar 2025) 10

Abbildung 4: In Nordrhein-Westfalen umgesetzte oder in Bau befindliche Verfahrensvarianten (n=35) ent-sprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025).....11

Abbildung 5: Verteilung der ausgewerteten Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion hinsichtlich der Aus-baugröße (n=35) entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025) 12

Abbildung 6: Anteil der behandelten Jahresabwassermenge der ausgewerteten Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion für das jeweilige Bezugsjahr (n=35) entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025).....13

Abbildung 7: Beispiele für Energieverbraucher (links: Hebewerk KA Dülmen (Quelle: HI GmbH); rechts, Ozongenerator KA Lemgo (Quelle: Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo)) 14

Abbildung 8: Bilanzraum zum Energiebedarf der Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion 15

Abbildung 9: Spezifischer elektrischer Energiebedarf der ausgewerteten Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion bezogen auf die behandelte Abwassermenge in Wh/m³.....17

Abbildung 10: Spezifischer elektrischer Energiebedarf der ausgewerteten Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion bezogen auf die mittlere CSB-Anlagenbelastung im Kläranlagenzulauf in kWh/E/a.....17

Abbildung 11: Zusammenstellung des spezifischen Energiebedarfs bezogen auf die behandelte Abwassermenge der Verfahrensstufen (n = 30) entsprechend der Bestandsaufnahme (Stand Februar 2025; zum Zeitpunkt der Datenerhebung keine Angaben für PAK in MBR oder MBR+GAK verfügbar 19

Abbildung 12: Spezifischer Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion für die ausgewerteten Anlagen nach Technologie bezogen auf die mittlere Anlagenbelastung (links: spezifischer Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlag Kläranlagenzulauf [kWh/E/a]; rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf die behandelte Abwassermenge [Wh/m³]) 21

Abbildung 13: Einfluss der Förderhöhe auf den spezifischen Energiebedarf der Mikroschadstoffreduktion (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf

(kWh/E/a); rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf behandelte Abwassermenge [Wh/m³])....22

Abbildung 14: Spezifischer Energiebedarf der PAK-Anlagen unterteilt nach mittlerer Anlagenbelastung (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf [kWh/E/a]; rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf behandelte Abwassermenge [Wh/m³])....23

Abbildung 15: Spezifischer Gesamtenergiebedarf der ausgewerteten Anlagen mit Ozonverfahren in Abhängigkeit der jeweiligen Ozondosierung (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf [kWh/E/a]; rechts: bezogen auf behandelte Abwassermenge [Wh/m³]) 24

Abbildung 16: Spezifischer Energiebedarf der ausgewerteten Anlagen mit Ozonverfahren aufgeteilt nach mittlerer Anlagenbelastung mit Anmerkung zu den Unterscheidungsmerkmalen (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf [kWh/E/a]; rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf behandelte Abwassermenge [Wh/m³]) 25

Abbildung 17: Spezifischer Energiebedarf der ausgewerteten Anlagen mit GAK-Verfahren aufgeteilt nach mittlerer Anlagenbelastung (links: Energiebedarf bezogen auf den Jahresmittelwert der CSB-Anschlussbelastung im Kläranlagenzulauf (kWh/E/a); rechts: spez. Energiebedarf bezogen auf behandelte Abwassermenge (Wh/m³)) 26

Abbildung 18: Einrichtungen zur Annahme und Lagerung externer Betriebsstoffe (links: Tank für Flüssigsauerstoff, KA Lemgo (Quelle Abwasserbeseitigungsgesellschaft Lemgo GmbH); rechts: Silo für Pulveraktivkohle und Tank für Fällmittel, KA Brilon (Quelle: Ruhrverband))....27

Abbildung 19: Bilanzraum für die Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte....29

Abbildung 20: Betriebsmittelverbräuche* der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen für die drei etablierten Technologien: Ozonung (Betriebsmittel Flüssigsauerstoff), Adsorption mit PAK und Adsorption mit GAK. *Die Verbräuche sind berechnet aus den Jahresverbräuchen des jeweiligen Betriebsmittels in Bezug auf die behandelte Jahresabwassermenge der jeweiligen Reinigungsstufe. Bei GAK-Verfahren entspricht der Betriebsmittelverbrauch dem jährlichen Materialaustausch....31

Abbildung 21: CO2e-Emissionen der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion in Nordrhein-Westfalen nach Technologie und in Abhängigkeit der behandelten Abwassermenge (links: PAK-Produkte wurden als frische Produkte basierend auf fossilen Rohstoffen angenommen; rechts: PAK-Produkte wurden als Regenerate bzw. biogenen Rohstoffursprungs angenommen). Für GAK ist stets der CO_2e-Faktor für Regenerate angenommen (vgl. Tabelle 1 für Zahlwerte der Faktoren)....32

Abbildung 22: Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen der Anlagen mit Einsatz von Pulveraktivkohle, unter der Annahme, dass alle Anlagen frische, fossilbasierte PAK verwenden; sortiert nach Ausbaugröße der Kläranlagen in EW 34

Abbildung 23: Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen der Anlagen mit Einsatz von Pulveraktivkohle unter der Annahme, dass alle Anlagen regenerierte

PAK-Produkte verwenden; sortiert nach Ausbaugröße der Kläranlagen in EW 34

Abbildung 24: Zusammensetzung der CO_2e-Emissionen der Anlagen mit GAK-Verfahren unter der Annahme, dass alle Anlagen regenerierte GAK-Produkte verwenden; sortiert nach Ausbaugröße der Kläranlagen in EW 35

Abbildung 25: Zusammensetzung der CO2e-Emissionen der Anlagen mit Ozon-Verfahren unter der Annahme, dass alle Anlagen 100 % Netzstrom verwenden; sortiert nach Ausbaugröße der Kläranlagen in EW 35

Abbildung 26: CO2e-Emissionen je behandelter Abwassermenge der Anlagen je Technologie unter den Annahmen, dass der Energiebedarf der Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion zu 0 kgCO2e/m³ berücksichtigt wird (links: PAK-Verfahren mit frischer, fossil basierter Aktivkohle; rechts: PAK-Verfahren mit regenerierter Aktivkohle) 36

Abbildung 27: CO_2e-Emissionsfaktoren verschiedener Aktivkohleprodukte im Vergleich. Mit „DWA“ gekennzeichnete Daten entstammen einer Veröffentlichung in der Korrespondenz Abwasser, Abfall (DWA 2016); Der „GAK mix (global)“ beruht auf dem ecoinvent-Datensatz “market for activated carbon, granular (GLO)” 37

Abbildung 28: Anteile verschiedener Einflussfaktoren an den CO_2e-Emissionen einer konventionellen Kläranlage gemäß einer 50.000 EW Beispielanlage (Quelle: KlickTool BW) 38

Abbildung 29: Relation der CO_2e-Emissionen von Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion zu konventioneller Abwasserreinigung für vier verschiedene Szenarien 39

Abbildung 30: Bau der PAK-Adsorptionsstufe KA Dortmund Deusen (EGLV, Michael Rasche) 41

Abbildung 31: Mögliche Ausführungsfälle zur Integration einer Verfahrensstufe zur Mikroschadstoffreduktion mit unterschiedlichem baulichem Aufwand, die zu unterschiedlichen Kosten führen und bei einem Vergleich berücksichtigt werden müssen. (rot = Neubau, blau = Umnutzung mit Umbau, grün = Umnutzung ohne Umbaukosten, grau = nicht für 4. RS) 43

Abbildung 32: Netto-Gesamtinvestitionskosten der betrachteten Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion gemäß der Bestandsaufnahme aus dem Frühjahr 2025. Alle Kostenangaben wurden über Preisindex auf das Bezugsjahr 2024 normiert. Ein theoretischer Ersatzwert für genutzte Bausubstanz ist in dieser Darstellung nicht berücksichtigt 46

Abbildung 33: Analyse der Einflussfaktoren auf die Gesamtinvestitionskosten bei den PAK-Anlagen (die Zahlen der Datenpunkte entsprechen der Kläranlagen-ID) 48

Abbildung 34: Analyse der Einflussfaktoren auf die Gesamtinvestitionskosten der Ozon-Anlagen (die Zahlen der Datenpunkte entsprechen der Kläranlagen-ID) 49

Abbildung 35: Analyse der Einflussfaktoren auf die Gesamtinvestitionskosten bei den GAK-Anlagen (die Zahlen der Datenpunkte entsprechen der Kläranlagen-ID) 50

Abbildung 36: Gesamtinvestitionskosten (netto) je nach Technologie in Bezug zur Auslegungswassermenge (die Kosten sind auf das Bezugsjahr 2024 normiert) 51

Abbildung 37: Gesamtinvestitionskosten (netto) je nach Technologie in Bezug zur Auslegungswassermenge. Die Kosten sind auf das Bezugsjahr 2024 normiert und ein Ersatzwert für genutzte Bausubstanz wurde angerechnet. 51

Abbildung 38: Spezifische Betriebskosten pro m³ behandelter Abwassermenge für die ausgewerteten Anlagen zur Mikroschadstoffreduktion 53

Abbildung 39: Spezifischer netto-Gesamtkosten (Jahreskosten) bezogen auf die behandelte Abwassermenge differenziert nach Kapital- und Betriebskosten sowie unter Annahme eines theoretischen Ersatzwertes für genutzte Bausubstanz 54

Abbildung 40: Spezifische Jahreskosten (netto) bezogen auf die behandelte Abwassermenge in €/m³ mit Angabe eines Kostenrahmens als Vertrauensintervall, in dem sich statisch 80 % der aus-gewerteten Kosten befinden ohne Berücksichtigung eines Szenarios mit theoretischen Ersatzwerten für genutzte Bausubstanz....55

Abbildung 41: Spezifische Jahreskosten (netto) bezogen auf die behandelte Abwassermenge in €/m³ mit Angabe eines Kostenrahmens als Vertrauensintervall, in dem sich statisch 80% der aus-gewerteten Kosten befinden und unter Berücksichtigung von theoretischen Ersatzwerten für genutzte Bausubstanz....55

Abbildung 42: Anteil der Kapital- und Betriebskosten an den Gesamtkosten der ausgewerteten Anlagen ohne Berücksichtigung eines Ersatzwertes für die theoretischen Investitionskosten der Bestandsnutzung. 56

Abbildung 43: Anteil der Kapital- und Betriebskosten an den Gesamtkosten der ausgewerteten Anlagen inklusive Berücksichtigung eines Ersatzwertes für die theoretischen Investitionskosten der Bestandsnutzung 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete CO2e-Faktoren je Parameter inkl. Spezifikation von Quelle bzw. Datensatz (im Falle von Daten aus der Datenbank ecoinvent). Aktivkohlefaktoren wurden gleichermaßen für GAK wie für PAK verwendet. 30

Tabelle 2: Verwendete Kostenkennzahlen (netto) 44

Tabelle 3: Zusammenstellung der ausgewerteten Daten zu den Verfahrensstufen zur Mikroschadstoffreduktion mit Einflüssen auf die Investitionskosten....47

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	Dr.-Ing. Gerd Kolisch, Yannick Taudien Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH Untere Lichtenplatzer Straße 100, 42289 Wuppertal Klaus Alt, Pascal Sterzenbach Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft Stockkampstraße 10, 40477 Düsseldorf 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 Paderborn-Sande, STEB Paderborn/Stadt Paderborn
Stand	Februar 2026
Veröffentlichung	November 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