

Energetische und ökologische Bewertung von Verfahren zur Elimination organischer Spurenstoffe



Dipl.-Ing. Danièle Mousel
Danièle.mousel@rwth-aachen.de

Hintergrund

Zunehmende Relevanz organischer Spurenstoffe:

- im aquatischen System in Konzentrationen kleiner 1 mg/L
- Eintrag durch die vom Menschen benutzten synthetischen organischen Verbindungen (Medikamente, Pflegeprodukte, Haushaltschemikalien etc.); weiterer Anstieg der Nutzung solcher Produkte zu erwarten
- für viele Stoffe öko- und humantoxikologische Wirkungen vermutet/nachgewiesen
- Organische Spurenstoffe werden aufgrund ihrer Stoffeigenschaften oft nur unzureichend in konventionellen Abwasserreinigungsprozessen abgebaut
- Vermehrt Ansätze den Eintrag von Spurenstoffen in die Gewässer zu vermindern
- Untersuchung unterschiedlicher oxidativer, adsorptiver und membranbasierter Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen

Verfahren

- Nachgeschaltete Ozonung (O₃)
- Nachgeschaltete Advanced Oxidation Processes (AOP) (Kombinationen aus Wasserstoffperoxid (H₂O₂), UV-Strahlung und Ozonung)
- Nachgeschaltete Filtration mit granulierter Aktivkohle (GAK)
- Simultane Zugabe von Pulveraktivkohle (PAK) in die Belebungsstufe
- Nachgeschaltete Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken bzw. in den Flockungsraum eines Filters
- Membranverfahren: Membranbioreaktor (MBR), Nanofiltration/Umkehrosmose (NF/RO)
- Zusätzlicher Aufwand: ökonomische und ökologische Aspekte auch relevant
- Energieverbrauch: neben dem Verbrauch vor Ort muss auch die Bereitstellungsenergie der Hauptverfahrenskomponenten berücksichtigt werden

Ziele

- Bewertung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Verfahren zur Spurenstoffelimination
- Zusammentragen von Daten zum Energieverbrauch aus der Literatur als Grundlage für Berechnungen zum ganzheitlichen Energieverbrauch ausgewählter Verfahren
- Aufstellen einer CO₂-Bilanz sofern möglich
- ganzheitliche Bewertung der Verfahren

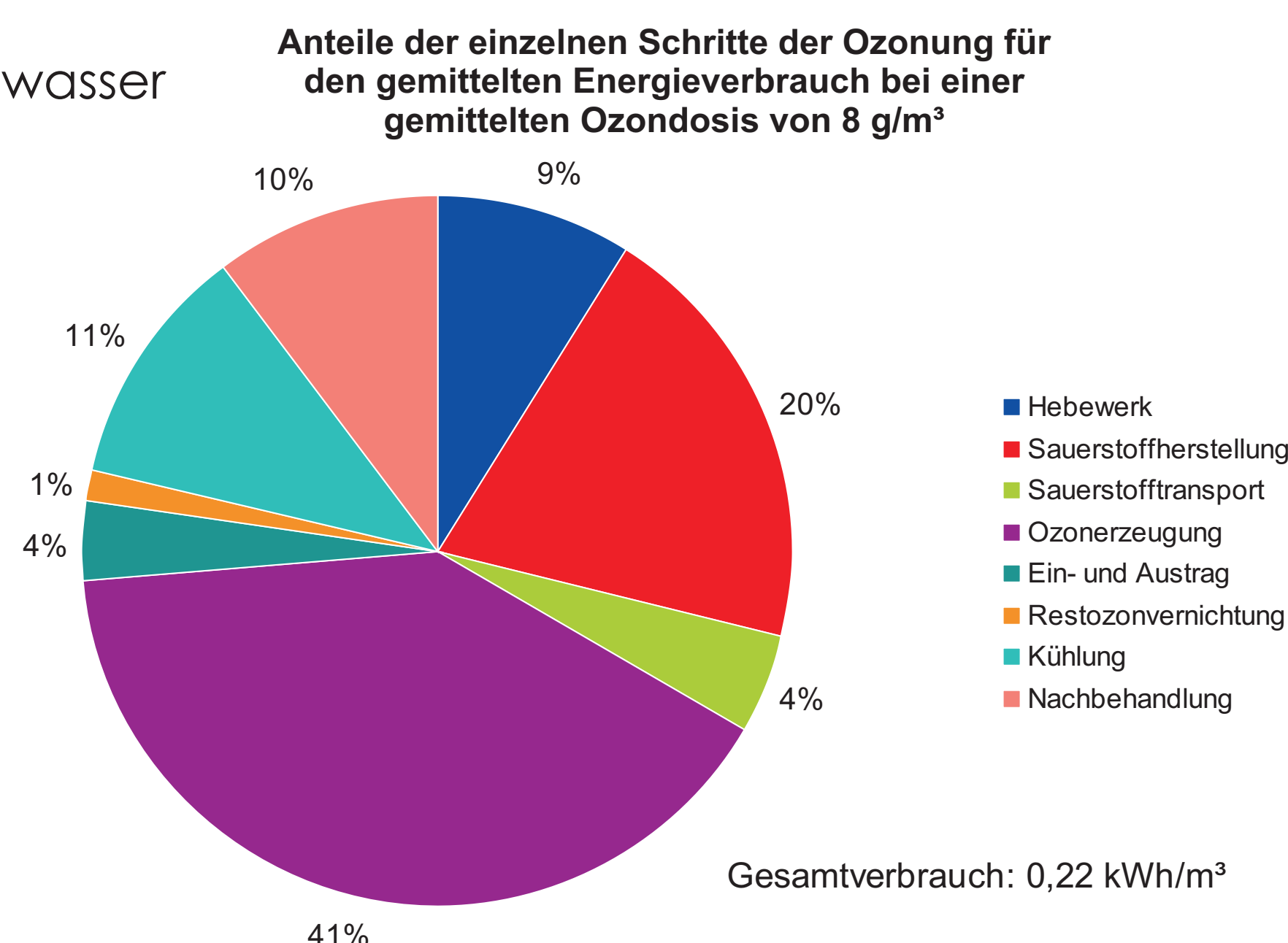
Energetische Bewertung

Berechnungen zum ganzheitlichen Energieverbrauch für unterschiedliche Betriebs-szenarien und Dosismengen

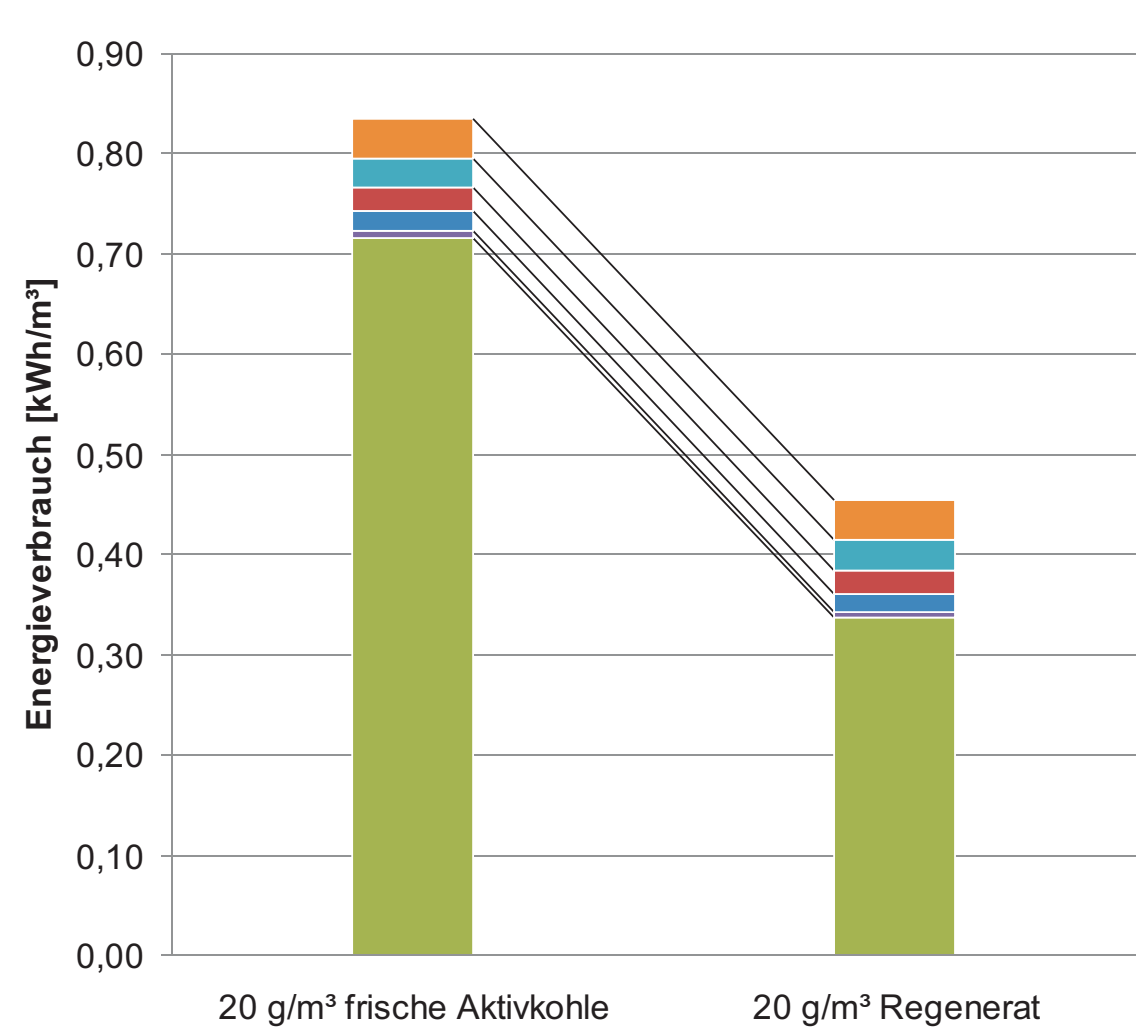
Bezugseinheit: 1 m³ behandeltes Abwasser

Ozonung:

- Literaturwerte: 0,04–0,3 kWh/m
- Hauptanteil: Ozonerzeugung vor Ort, Produktion des i.d.R. angelieferten Sauerstoffs
- Weitere Einflussfaktoren: Kühlung, Nachbehandlung (z.B. Sandfilter), eventuelle Hebewerke



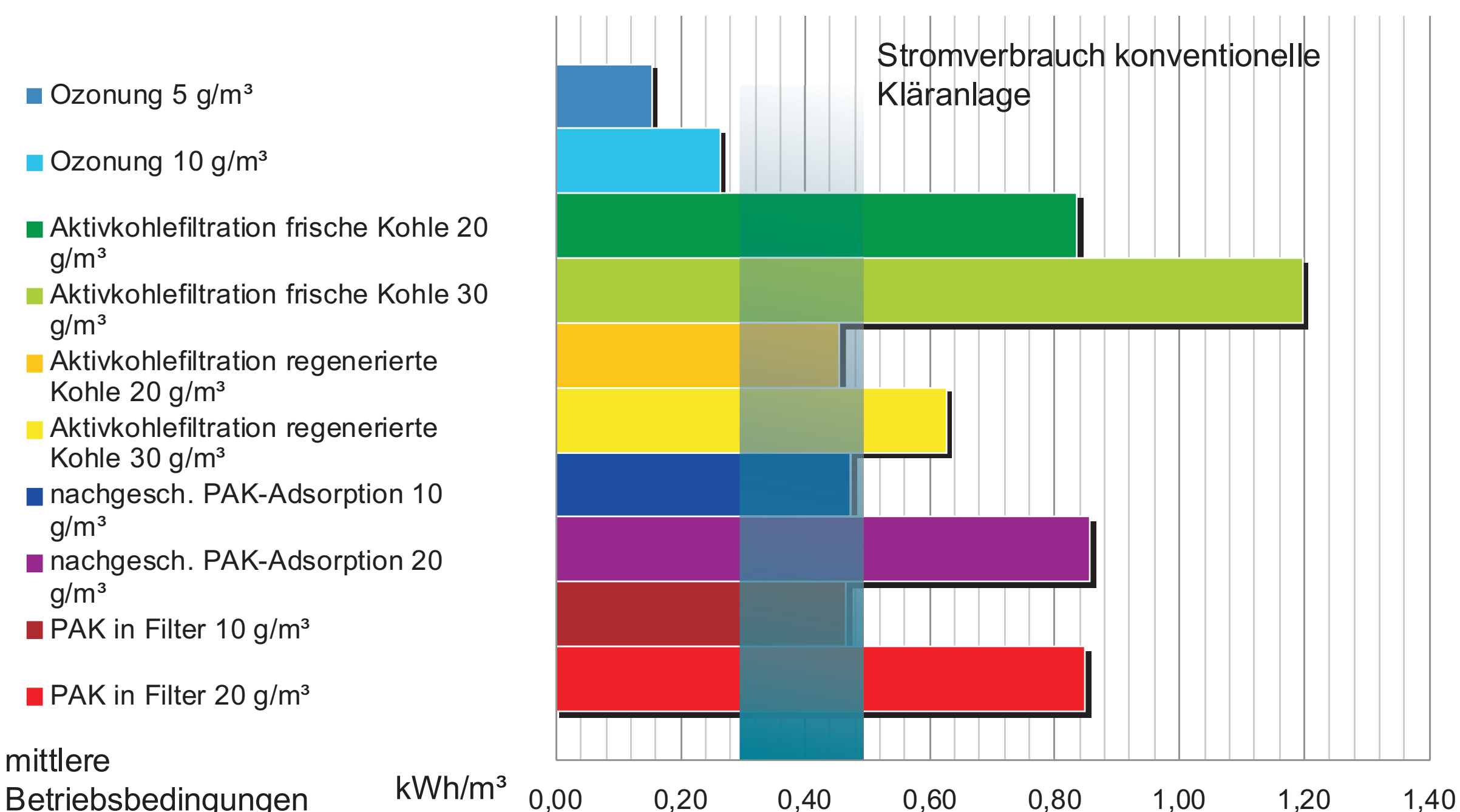
Relative Aufteilungen des spezifischen Energieverbrauchs einer nachgeschalteten Aktivkohlefiltration (20 g/m³) beim gemittelten Szenario



Adsorptive Verfahren:

- Energieverbrauch auf der Kläranlage deutlich geringer als bei Ozonung
- maßgeblicher Anteil: Aktivkohleherstellung
- Literaturwerte mit großen Unsicherheiten verbunden
- Ansetzen von 2 Szenarien (niedriger und hoher Energieverbrauch) für Herstellung, sowie gemitteltes Szenario
- Vorteil der Filtration mit GAK: Möglichkeit der Verwendung von Regenerat
- Für beide PAK-Verfahren: Berücksichtigung der zusätzlichen Schlammbehandlung (gleichzeitige Heizwert-erhöhung des Klärschlamm)

Ganzheitlicher berechneter Energieverbrauch von Verfahren zur Elimination organischer Spurenstoffe



Eliminationsraten

Auswerten von Eliminationsraten aus der Literatur für 13 Substanzen aus den Kategorien Pharmaka, synthetische Moschusverbindungen und Industriechemikalien

- Keines der Verfahren kann aktuell alle 13 Substanzen hinreichend eliminieren
- Beste Ergebnisse bei Ozonung, Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken oder in die Belebung sowie bei NF/RO
- GAK-Filtration sowie Zugabe von PAK in die Flockungsfiltration sind verfahrenstechnisch günstige Maßnahmen mit vielversprechenden Ergebnissen
- Nur wenige Daten für die mit verhältnismäßig hohen Energieverbräuchen verbundenen AOP-Verfahren vorhanden: Verzicht auf weitergehende Berechnungen
- Keine weitere Betrachtung der Membranverfahren: Spurenstoffelimination nicht primäres Ziel (MBR) bzw. aufwändige Konzentratentsorgung (NF/RO)

Generalisierte Eliminationsraten für die Ozonung, die GAK-Filtration sowie eine nachgeschaltete PAK-Adsorption aus Literaturangaben

Spurenstoff/Verfahren	Ozonung	GAK-Filtration	PAK nachgesch.
<i>Pharmaka</i>			
Carbamazepin	++	+(+)	+(+)
Diclofenac	++	++	+(+)
Metoprolol	+(+)		++
Sulfamethoxazol	++	0	0(+)
Diatrizaot	0(+)	-(+)	0(+)
<i>Synthetische Moschusverbindungen</i>			
AHTN (Tonalid)	+(+)		++
HHCB (Galaxolid)	++		++
<i>Industriechemikalien</i>			
Benzotriazol	+		+(+)
Bisphenol A	(0)++	0	++
Perfluorierte Tenside	-	+(+)	+
TCPP	0	+	+(+)
EDTA	0(+)	-	

Generalisierte Eliminationsrate: - : 10 %, 0 : 10 bis 50 %, + : 50 bis 90 %, ++ : > 90 %

Quellen:

Bahr et al. 2007, Beier 2010, EAWAG 2009, Fahlenkamp et al. 2006, Fahlenkamp et al. 2008, Huber et al. 2005, Jekel 2010, Metzger und Kapp 2008, NEPTUNE 2010, Pinnekamp und Merkel 2008, Schaar et al. 2009, Schrader 2007, Schröder et al. 2010, Ternes et al. 2003, Wintgens et al. 2002, Zwicknagl et al. 2010.

Ökologische Bewertung

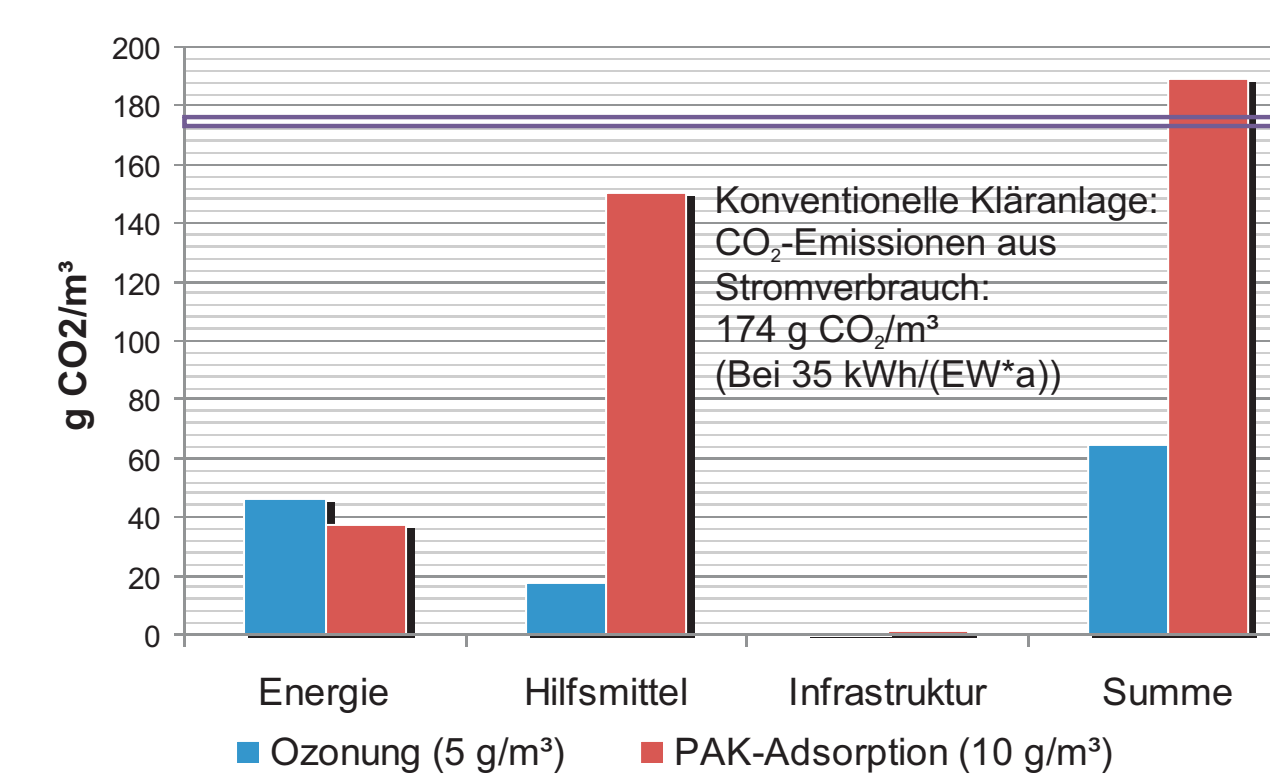
CO₂-Bilanzen bei gemittelten Betriebsbedingungen

- Ozonung: Stromverbrauch für Ozonherstellung bewirkt wesentlichen Anteil der CO₂-Emissionen
- Aktivkohle: größter Anteil durch Herstellung und Verbrennung der Kohle
- Infrastrukturen tragen nur minimal zu den spezifischen CO₂-Emissionen bei

Methodik zum Aufstellen der CO₂-Bilanzen

Kategorien	Ozonung	Nachgeschaltete PAK-Adsorption
Energie	Ozonung (Strom)	Adsorptionsstufe (Strom)
Hilfsmittel	Sauerstoffherstellung	Schlammbehandlung (Strom)
	Sauerstofftransport	Herstellung PAK
Infrastruktur	Baumaterial/Becken	Schlammverbrennung
		Fäll- und Flockungsmittel

Spezifische CO₂-Emissionen [g CO₂/m³] für eine nachgeschaltete Ozonung (5 g/m³ O₃) und eine nachgeschaltete PAK-Adsorption (10 g/m³ PAK)



Einordnung der Verfahren nach spezifischen CO₂-Emissionen

- Steigende spezifische CO₂-Emissionen [g CO₂/m³]
- Aktivkohlefiltration mit Regenerat
 - Ozonung
 - Stromverbrauch konventionelle Kläranlage
 - PAK-Zugabe in Filter
 - Nachgeschaltete Adsorptionsstufe mit PAK
 - Aktivkohlefiltration mit frischer Aktivkohle

Qualitative Bilanzierung der anderen adsorptiven Verfahren:

- niedrigste CO₂-Emissionen durch die Filtration mit GAK-Regenerat, vor Ozonung und Zugabe von PAK in einen Flockungsfilter oder in ein Kontaktbecken
- Höchste Emissionen bei Filtration mit frischer GAK (große Dosismengen)

Schlussfolgerung

- Ozonung und nachgeschaltete PAK-Adsorption stellen die effizientesten Verfahren dar, jedoch kann aktuell kein Verfahren alle Stoffe zielführend eliminieren.
- Bei dem berechneten ganzheitlichen Energieverbrauch erreicht die Ozonung die besten Ergebnisse. Hier erfolgte jedoch keine Umrechnung der hier maßgeblichen elektrischen Energie auf thermische Energie (maßgeblich bei Aktivkohle).
- Die berechneten Energieverbräuche sind zum Teil höher als der Stromverbrauch einer konventionellen Kläranlage.
- Die Verwendung von regenerierter Aktivkohle anstatt frischer Aktivkohle führt zu relevanten Einsparungen an Energie und CO₂, kommt jedoch in der Regel nur für die GAK-Filtration in Frage.
- Energieeinsparungen bei der Ozonung können durch optimierte Sauerstoff- und Ozonerzeugung bewirkt werden, bei der Kohleherstellung können durch Verwendung von Sekundär- oder nachwachsenden Rohstoffen Ressourcen gespart werden.
- Eine eindeutige Empfehlung hinsichtlich eines Verfahrens ist aktuell nicht möglich
- Weiterer Forschungsbedarf ist gegeben, insbesondere hinsichtlich des Energieverbrauchs bei der Aktivkohleherstellung.