



Aktenzeichen IV-7-042 600 003 J

Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I

Im Auftrag von:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Projektleitung:



Projektpartner:



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V. · www.fiw.rwth-aachen.de
Kackertstraße 15 – 17 · 52056 Aachen · Fon 0241 80 2 68 25 · Fax 0241 80 2 28 25 · fiw@fiw.rwth-aachen.de



Aktenzeichen IV-7-042 600 003 J

Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I

KURZBERICHT

Aachen, im Dezember 2011
FiW an der RWTH Aachen

ISA der RWTH Aachen

Dr.-Ing. F.-W. Bolle

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung.....	1
2	Verfahrensbeschreibung und Eliminationsleistung.....	1
2.1	Betrachtete Verfahren.....	1
2.2	Eliminationsleistung verschiedener Verfahren.....	2
3	Energiebedarf der Verfahren zur Spurenstoffelimination.....	4
3.1	Ozonung	4
3.1.1	Literaturdaten zum Energiebedarf von Ozon-Verfahren.....	4
3.1.2	Berechnung des Energiebedarfs einer Ozonung bei Anlieferung von Flüssigsauerstoff.....	5
3.2	Adsorptive Verfahren	7
3.2.1	Literaturdaten zum Energiebedarf von Adsorptionsverfahren	7
3.2.2	Berechnung des Energiebedarfs einer Filtration mit GAK.....	8
3.2.3	Berechnung des Energiebedarfs einer PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken	9
3.2.4	Energiebedarf einer PAK-Zugabe in den Flockungsraum eines Filters.....	11
3.3	Membranverfahren.....	12
3.4	Advanced Oxidation Processes	12
3.5	Modellanlage.....	13
4	CO₂-Bilanzen für verschiedene Verfahren zur Spurenstoffelimination	14
5	Kostenbetrachtung.....	15
6	Zusammenfassende Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination....	17
7	Fazit	18
8	Literaturverzeichnis	18

1 Veranlassung und Zielsetzung

Im alltäglichen Leben benutzt der Mensch eine Vielzahl von synthetischen organischen Verbindungen, beispielsweise in Form von Medikamenten, Pflegeprodukten oder Haushaltschemikalien. Der wachsende Wohlstand im westlichen Raum und der demographische Wandel aufgrund einer stets älter werdenden Bevölkerung lassen einen weiteren Anstieg der Nutzung dieser Produkte vermuten. Vor, während und/oder nach ihrer Nutzphase gelangen diese Produkte in das kommunale Abwasser und somit zur Kläranlage. Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften werden diese Stoffe jedoch oft nur unzureichend abgebaut und gelangen so in geringen Konzentrationen in die Oberflächengewässer.

Zur Elimination von organischen Spurenstoffen aus Abwasserströmen stehen nach dem derzeitigen Stand der Forschung verschiedene oxidative, adsorptive und membranbasierte Verfahren zur Verfügung. Genaue Daten zum Energiebedarf dieser Verfahren liegen zurzeit jedoch nicht vor. Der Schwerpunkt der bisherigen Versuche lag auf der Effektivität der Verfahren. Dabei blieb der Energiebedarf weitgehend unberücksichtigt. Wurde die benötigte Energie dennoch betrachtet, handelte es sich in den meisten Fällen um Versuche im Labormaßstab. Dadurch sind eine energetische und ökologische Beurteilung und die Verwendung der Ergebnisse für eine großtechnische Planung mit Unsicherheiten behaftet.

Hauptziel dieses Projekts ist es, eine Zusammenfassung aller relevanten Verfahren zur Elimination organischer Spurenstoffe aus Abwässern mit energetischen und ökologischen Bewertungskriterien zur Verfügung zu stellen, die Planern und Betreibern von Abwasseranlagen sowie den Überwachungsbehörden als Entscheidungshilfe bei einem zukünftigen Einsatz dieser Techniken dienen kann.

2 Verfahrensbeschreibung und Eliminationsleistung

2.1 Betrachtete Verfahren

Betrachtet werden verschiedene Verfahren, die zur Elimination von organischen Spurenstoffen aus Abwasser eingesetzt werden: Ozonung, Adsorption an granulierter Aktivkohle (GAK) in einem Filter, Zugabe von Pulveraktivkohle (PAK) in ein Kontaktbecken bzw. in den Flockungsraum eines Filters, Nanofiltration und Umkehrosmose sowie Advanced Oxidation Processes (AOP). Die PAK-Zugabe in die Belebungsstufe ist zur Spurenstoffelimination mit sehr hohen Aktivkohledosierungen verbunden und wurde deswegen nicht weiter betrachtet.

Großtechnisch werden zurzeit Ozonverfahren sowie Adsorption an Aktivkohle in einer Vielzahl von Verfahrensvarianten getestet. Im Pilot- oder Labormaßstab werden AOP-Verfahren durch Kombination von Ozon, Wasserstoffperoxid und UV-Strahlung sowie Membranverfahren untersucht.

2.2 Eliminationsleistung verschiedener Verfahren

Die im Rahmen dieses Projekts aus Literaturdaten zusammengestellten Ergebnisse liefern qualitative Aussagen bezüglich der Wirksamkeit der Verfahren zur Entfernung organischer Spurenstoffe. Absolute Aussagen zur Eliminationsleistung können wegen der unterschiedlichen Versuchsdurchführungen, Dosiermengen und Randbedingungen vor Ort nicht getroffen werden. Als sehr gut wird hierbei eine Elimination von mehr als 90 % angesehen. Als gute Eliminationen werden die Leistungen zwischen 50 und 90 % bezeichnet, als mäßige Eliminationen die Leistungen zwischen 10 und 50 %. Bei einer Elimination kleiner 10% wird von einer schlechten Leistung gesprochen.

Eine graphische Zusammenstellung der Wirksamkeit der Hauptverfahren ist für die ausgewählten Spurenstoffe aus den Gruppen *Pharmaka*, *Moschusverbindungen* und *Industriechemikalien* Tabelle 1 zu entnehmen. Keines der untersuchten Verfahren scheint in der Lage zu sein, alle betrachteten Substanzen nahezu vollständig zu eliminieren.

Am besten für die großtechnische Spurenstoffelimination geeignet erscheinen demnach aktuell die Ozonung, die nachgeschaltete PAK-Zugabe in eine Adsorptionsstufe sowie für die Nanofiltration und die Umkehrosmose. Da die Nanofiltration und die Umkehrosmose jedoch aufgrund ihres hohen Energiebedarfs und der notwendigen Konzentratentsorgung als aufwendig gelten, ist in diesen Verfahren kein Vorteil gegenüber den anderen Verfahren zu sehen.

Für die Ozonung erscheinen Dosiermengen zwischen 2,5 und 10 g/m³ Ozon ausreichend; für die Adsorption an PAK sollten Dosierungen im Bereich von 10 und 20 g/m³ Pulveraktivkohle, insbesondere in Verbindung mit einer Rückführung der Überschussskohle in die Belebungsstufe, eine sehr gute Elimination bewirken. Die Ozonung schneidet hierbei für die Entfernung von Sulfamethoxazol und den Komplexbildner EDTA besser ab, wohingegen die Pulveraktivkohle besser zur Entfernung von perfluorierten Tensiden, Benzotriazol und TCPP geeignet zu sein scheint.

Die granulierten Aktivkohle kann relativ einfach in einen bestehenden Filter integriert werden und liefert insbesondere für die perfluorierten Tenside gute Ergebnisse. Weiterhin erfordert die Ertüchtigung einer bestehenden Flockungsfiltration mit PAK-Zugabe relativ geringe Investitionskosten. Die für dieses Verfahren zusammengetragene Eliminationsleistung ist gut, aber nicht als sehr gut anzusehen. Für die Advanced Oxidation Processes können zurzeit kaum Aussagen zur Eliminationsleistung gemacht werden, da nur wenige Daten vorliegen.

**Tabelle 1: Wirksamkeit verschiedener Verfahren bezüglich der Elimination ausgewählter Spurenstoffe
(Generalisierte Eliminationsleistung: -: bis 10 %, 0: 10 bis 50 %, +: 50 bis 90 %, ++: > 90 %)**

Spurenstoffe		Verfahren	Ozonung	GAK-Filtration	PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken	PAK-Zugabe in einen Flockungsraum	NF / RO	UV / H ₂ O ₂	O ₃ / H ₂ O ₂	O ₃ / UV
Pharmaka	Carbamazepin		++	+ bis ++	+ bis ++	0 bis +	++	+ bis ++	++	++
	Diclofenac		++	++	+ bis ++	0 bis +	++	++	++	++
	Metoprolol		+ bis ++	k. A.	++	k. A.	k. A.	+ bis ++	0 bis +	k. A.
	Sulfamethoxazol		++	0	0 bis +	- bis 0	++	+ bis ++	+ bis ++	++
	Amidotrizoesäure/Diatrizoat		0 bis +	- bis +	0 bis +	-	++	k. A.	0	0
Synth. Moschusverbindungen	AHTN (Tonalid)		+ bis ++	k. A.	++	k. A.	++	k. A.	k. A.	k. A.
	HHCb (Galaxolid)		++	k. A.	++	k. A.	++	k. A.	k. A.	k. A.
Industriechemikalien	Benzotriazol		+	k. A.	+ bis ++	0 bis +	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	Bisphenol A		0 bis ++	0	++	Ablaufwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze	+ bis ++	++	k. A.	k. A.
	Perfluorierte Tenside		-	+ bis ++	+	k. A.	+ bis ++	+ bis ++	k. A.	- bis 0
	TCPP		0	+	+ bis ++	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	0
	EDTA		0 bis +	-	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	+

3 Energiebedarf der Verfahren zur Spurenstoff-elimination

Neben der Wirksamkeit der Verfahren spielen auch wirtschaftliche und ökologische Aspekte eine wichtige Rolle bei ihrer großtechnischen Umsetzung. Der Energiebedarf entspricht einem großen Anteil der Betriebskosten und kann von seinen Umweltauswirkungen, insbesondere vom CO₂-Ausstoß, nicht losgelöst werden. Deswegen steht im Folgenden der Energiebedarf der Verfahren im Mittelpunkt der Betrachtungen. Hierzu werden sowohl Angaben aus der Literatur sowie aus Betreiber- und Herstellerumfragen zusammengetragen als auch eigene Berechnungen vorgenommen, um den Einfluss von Betriebsbedingungen auf die benötigte Energie, Kosten und CO₂-Bilanz bewerten zu können. Als Bezugsgröße für den Energiebedarf wurde zum einen die behandelte Abwassermenge (in m³) und zum anderen die Bezugsgröße „Einwohner · Jahr“ (E·a) gewählt.

3.1 Ozonung

3.1.1 Literaturdaten zum Energiebedarf von Ozon-Verfahren

Eine graphische Zusammenstellung der Literaturangaben für den Energiebedarf einer Ozonung auf der Kläranlage ist Bild 1 zu entnehmen. Die angegebenen Daten stammen zum Teil aus Abschätzungen und Modellberechnungen. Andere wurden mittels der aus Pilotversuchen gewonnenen Daten berechnet. Dort wird die große Bandbreite der Angaben deutlich, wobei auf die unterschiedlichen Randbedingungen, Systemgrenzen sowie Ozon-dosierungen zu achten ist (für detaillierte Angaben s. Langfassung des Forschungsberichts). Der Energiebedarf für die alleinige Ozonung kann überschlägig mit 0,1 bis 0,2 kWh/m³ (9 bis 18 kWh/(E·a)) angenommen werden.

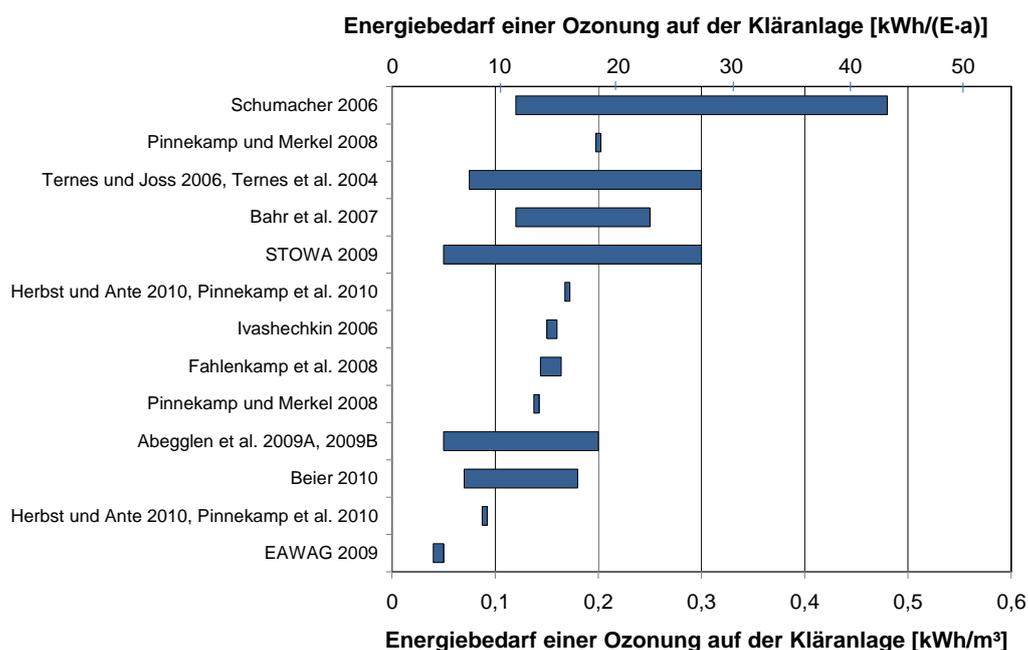


Bild 1: Literaturangaben zum Energiebedarf einer Ozonung auf der Kläranlage

3.1.2 Berechnung des Energiebedarfs einer Ozonung bei Anlieferung von Flüssigsauerstoff

Energiebedarf auf der Kläranlage

Unter Berücksichtigung der großen Anzahl an variablen Parametern für die einzelnen Verfahrensschritte (Ozongenerator, Ozoneintragssystem, Restozonvernichter, Prozesssteuerung, Kühlung sowie Nachbehandlung des Abwassers) kann für jede Ozondosis ein minimales, mittleres und maximales Szenario zusammengestellt werden (s. Bild 2). In dieser Betrachtung wird Ozon vor Ort aus angeliefertem, reinem Sauerstoff hergestellt.

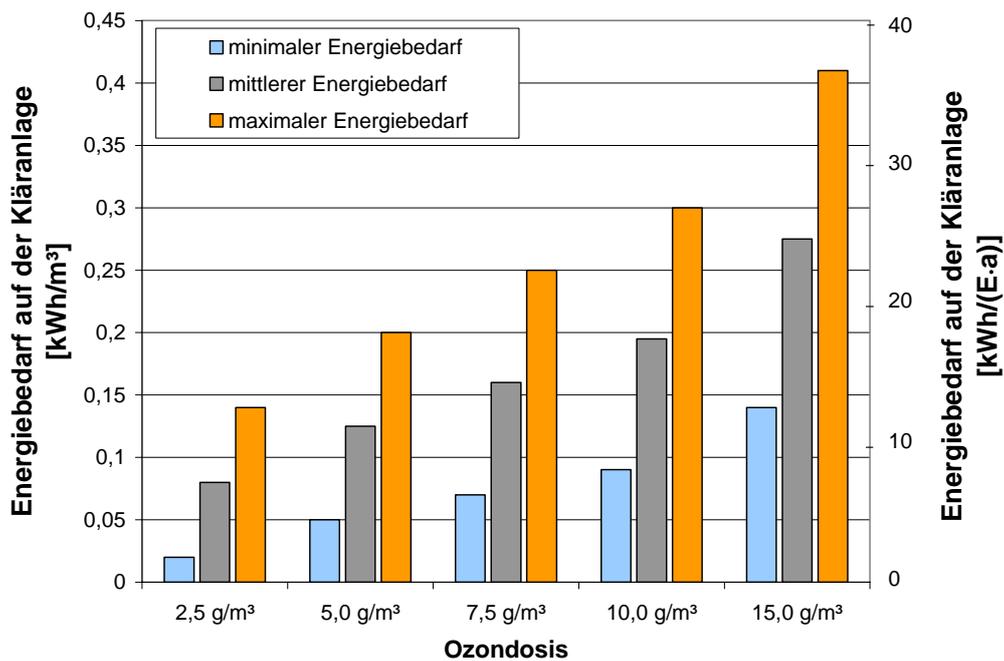


Bild 2: Minimaler, mittlerer und maximaler Energiebedarf auf der Kläranlage bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis

Im Mittel wird auf der Kläranlage für eine Ozonung 0,17 kWh/m³ (entspricht 15 kWh/(E·a)) benötigt. In Abhängigkeit der gewählten Betriebsparameter und Gegebenheiten schwankt dieser Energiebedarf zwischen:

- 0,02 kWh/m³ (1,8 kWh/(E·a)) bei niedriger Ozondosis und günstigen Randbedingungen (kein Hebewerk nötig, Kühlung mit Abwasser, Nachbehandlung im Schönungsteich) und
- 0,41 kWh/m³ (37 kWh/(E·a)) bei höchster Ozondosis und ungünstigen Randbedingungen (10 m Förderhöhe, Kühlung mit Kühlaggregat, Nachbehandlung im Sandfilter)

Bei der Ozonung macht der Energiebedarf für die Ozonherstellung sowie für die Kühlung des Ozongenerators den wesentlichen Anteil aus (vgl. Bild 3).

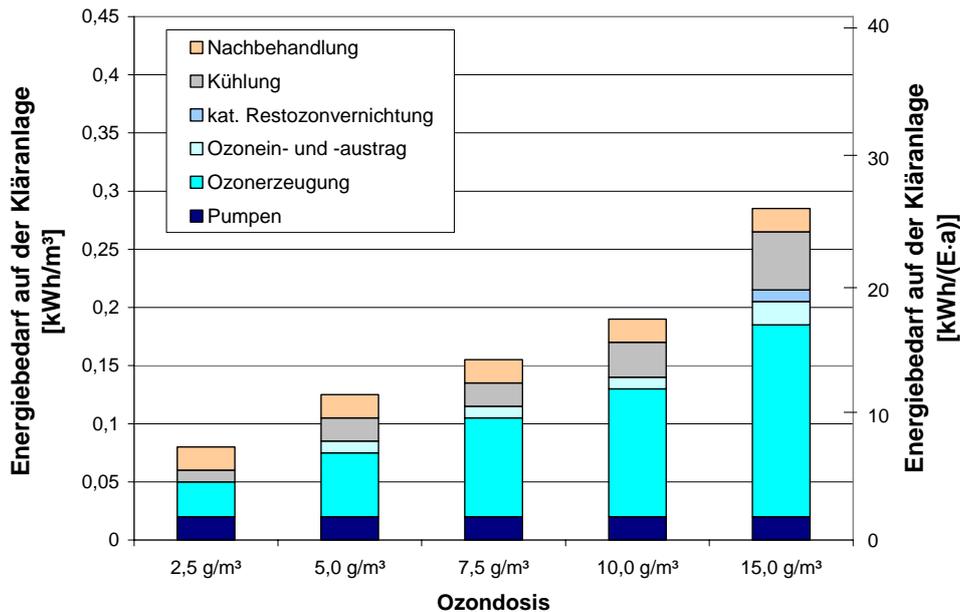


Bild 3: Aufteilung des Energiebedarfs auf der Kläranlage bei einer Ozonung mit Lieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis (alle weiteren Parameter mit Mittelwert angesetzt)

Ganzheitlicher Energiebedarf

Neben dem Energiebedarf auf der Kläranlage wird für Sauerstoffbereitstellung und -lieferung auch Energie benötigt, die bei der ganzheitlichen Betrachtung einbezogen wird. Der mittlere ganzheitliche Energiebedarf für eine Ozonung liegt bei 0,22 kWh/m³ (20 kWh/(E-a)). Der maximale Gesamtbedarf beträgt 0,58 kWh/m³ (52 kWh/(E-a)) bei einer Dosis von 15 g_{Ozon}/m³, der minimale Bedarf 0,03 kWh/m³ (2,7 kWh/(E-a)) bei einer Dosis von 2,5 g/m³ (s. Bild 4).

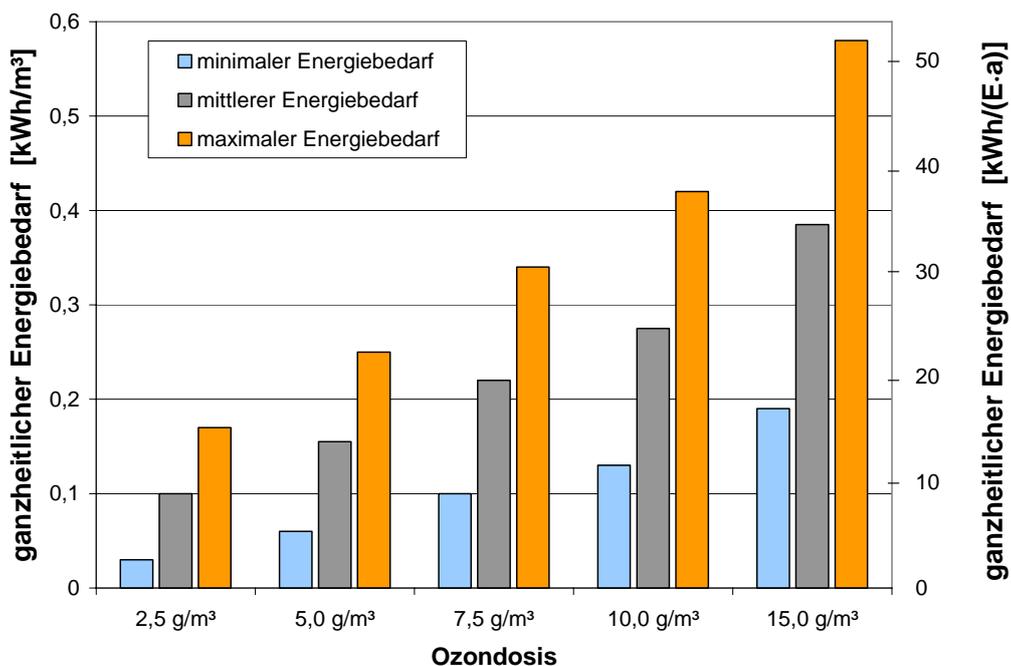


Bild 4: Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf bei einer Ozonung mit Lieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis

Je nach Ozondosis und angesetztem Energiebedarf üben die unterschiedlichen Schritte der Ozonherstellung (inkl. Sauerstoffbereitstellung) verschiedene Einflüsse auf den Energiebedarf aus. Die Herstellung von Sauerstoff und Ozon macht 44 bis 64% der benötigten Energie aus (steigender Anteil mit zunehmender Ozondosis). Der prozentuale Anteil der Vor- und Nachbehandlung wird geringer, umso höher die Ozondosis ist.

Der Fall der Sauerstoffbereitstellung auf der Kläranlage wurde ebenfalls betrachtet und wies einen höheren Energiebedarf auf als bei Anlieferung von Flüssigsauerstoff.

3.2 Adsorptive Verfahren

3.2.1 Literaturdaten zum Energiebedarf von Adsorptionsverfahren

Energiebedarfswerte aus der Literatur für eine Adsorptionsstufe mit PAK bzw. GAK sind graphisch in Bild 5 zusammengetragen. Dort wird, wie bei einer Ozonung, die große Bandbreite der Angaben deutlich, wobei die unterschiedlichen Randbedingungen, Systemgrenzen sowie Dosierungen zu berücksichtigen sind. Da GAK in ein Filterbett eingebaut ist, wird die Kohle nicht direkt pro Volumen an zu behandeltem Abwasser dosiert. Um jedoch einen Vergleich mit anderen Verfahren zu ermöglichen, wird eine äquivalente Dosis berechnet, indem die GAK-Masse im Filter auf das über die Laufzeit eines Filterbetts behandelte Abwasservolumen bezogen wird. Da nur wenige Angaben zur Laufzeit von GAK-Filtern zur Spurenstoffelimination existieren, ist die berechnete Dosis mit Unsicherheit behaftet.

Die Adsorptionsverfahren mit PAK und GAK weisen einen geringen Energiebedarf auf der Kläranlage auf. Die Werte liegen für beide Verfahren insgesamt zwischen 0,01 kWh/m³ (0,89 kWh/(E·a)) und 0,07 kWh/m³ (6,3 kWh/(E·a)).

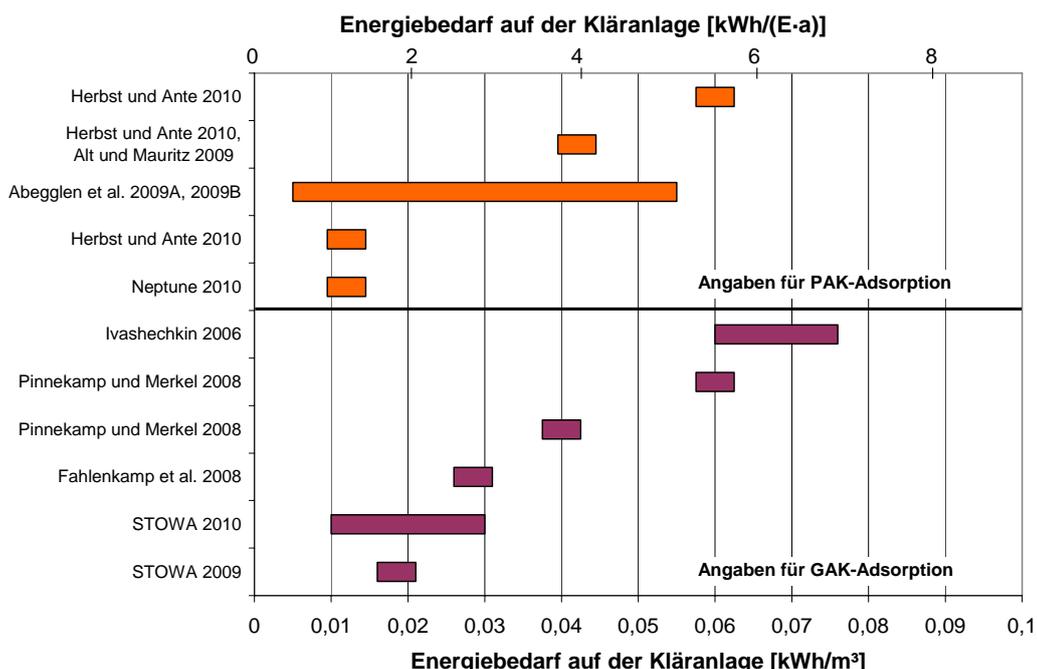


Bild 5: Zusammenstellung der Literaturangaben zum Energiebedarf einer nachgeschalteten PAK- bzw. GAK-Adsorption auf der Kläranlage

3.2.2 Berechnung des Energiebedarfs einer Filtration mit GAK

Energiebedarf auf der Kläranlage

Der Bedarf an Energie auf der Kläranlage für eine GAK-Filtration liegt zwischen 0,06 und 0,17 kWh/m³ (5,36 – 15,21 kWh/(E·a)). Es ergibt sich kein Unterschied bzgl. des Energiebedarfs auf der Kläranlage zwischen der Verwendung von frischer bzw. regenerierter GAK. Die Aufteilung der benötigten Energie zwischen Pumpwerk, Vorfiltration, GAK-Filtration und Nachbehandlung des Rückspülwassers ist in Bild 6 dargestellt.

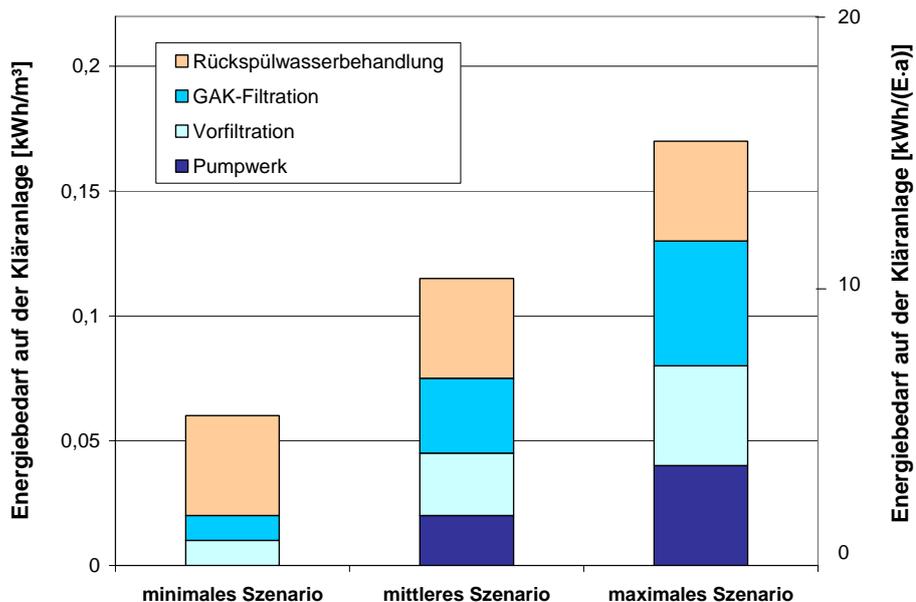


Bild 6: Energiebedarf auf der Kläranlage für eine nachgeschaltete Filtration mit GAK (frisch oder regeneriert)

Ganzheitlicher Energiebedarf

In einer ganzheitlichen Energiebilanz der Verfahren soll auch die Erzeugung bzw. die Reaktivierung und Ergänzung der Aktivkohle betrachtet werden. Die Literaturangaben zur notwendigen Energie bei der Aktivkohleherstellung liegen in unterschiedlichen Größenordnungen. Einheitlich bei allen Quellen ist, dass der Energiebedarf zur Regeneration der Kohle wesentlich niedriger liegt als bei der Herstellung von frischer Aktivkohle.

ABEGGLEN ET AL. (2011) schätzen den Primärenergiebedarf zur Herstellung von Pulveraktivkohle auf 0,17-0,69 kWh/m³ bei einer Dosis von 10 g/m³ Aktivkohle, geben jedoch an, dass nur wenige Daten für die PAK-Herstellung verfügbar sind. Um die unterschiedlichen Größenordnungen der Daten abzubilden, werden zwei Szenarien ausgewählt: Zum einen wird für den Fall eines hohen Energiebedarfs bei der Aktivkohleherstellung das Modell von MEIER (1997), im Einklang mit Werten von STOWA (2010), betrachtet. In einem zweiten Szenario wird ein niedrigerer Energiebedarf bei der Aktivkohleherstellung nach BAYER ET AL. (2005) für die Aktivierung und nach HUTCHENS (1975) für die Regeneration gewählt. Diese Werte dienen auch im NEPTUNE Projekt (2010) als Berechnungsgrundlage und stimmen mit Angaben aus einer Herstellerumfrage überein.

Die ermittelten Werte für den gesamten Energiebedarf einer nachgeschalteten Aktivkohlefiltration mit GAK betragen zwischen 0,2 kWh/m³ (17,9 kWh/(E·a)) und 3,64 kWh/m³ (325 kWh/(E·a)) bei einer Benutzung von frischer Kohle und ca. 0,1 kWh/m³ (8,9 kWh/(E·a)) bis 2 kWh/m³ (179 kWh/(E·a)) bei der Benutzung von regenerierter Aktivkohle (s. Bild 7). Im Mittel liegt der Gesamtbedarf bei ca. 1,2 kWh/m³ (107,3 kWh/(E·a)) für die Verwendung von frischer Aktivkohle und bei ca. 0,6 kWh/m³ (53,6 kWh/(E·a)) bei der Verwendung von Regenerat. Beim Einsatz von frischer Kohle macht die Energie zur Herstellung der Kohle ca. 86 % des gesamten Energiebedarfs aus, bei der Verwendung regenerierter Kohle sind es 74 %. Es bleibt zu beurteilen, inwiefern die Verwendung einer regenerierten, granulierten Aktivkohle den Anforderungen der Entfernung organischer Spurenstoffe im Vergleich zur Anwendung frischer Aktivkohle genügt, da hier von größeren Poren auszugehen ist.

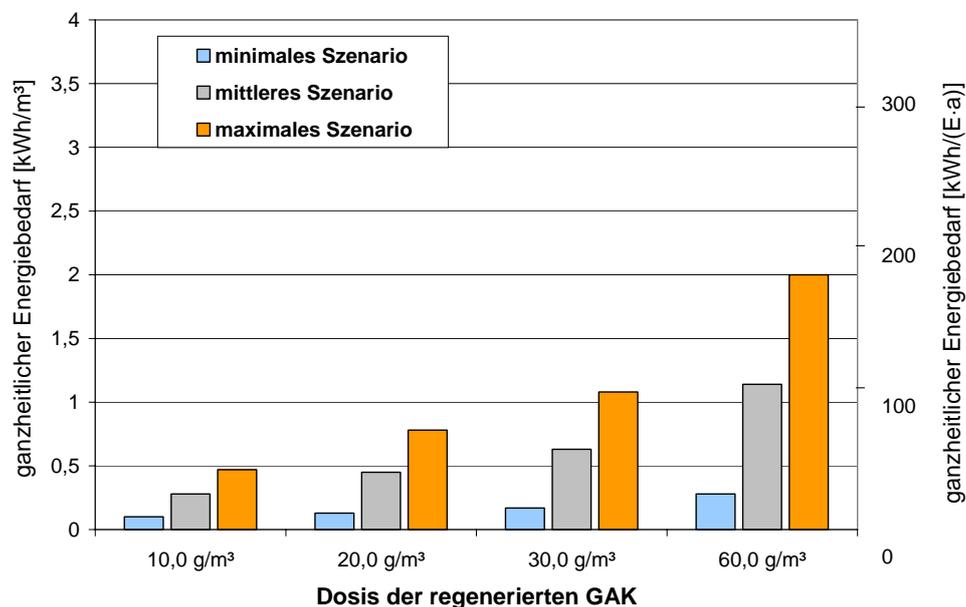


Bild 7: Ganzheitlicher Energiebedarf einer Adsorptionsstufe mit regenerierter GAK

3.2.3 Berechnung des Energiebedarfs einer PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken

Energiebedarf auf der Kläranlage

Im Gegensatz zu GAK kann PAK nicht regeneriert werden. Die verbrauchte Kohle wird dem behandelten Abwasser mit dem Klärschlamm entnommen und der Schlammbehandlung zugeführt. Es wird hier von der Verfahrenskette Voreindickung, Faulung, Nacheindickung, Entwässerung, Trocknung und Verbrennung ausgegangen. Eine landwirtschaftliche Verwertung des Schlammes wird aufgrund des erhöhten Gehalts an Spurenstoffen durch die enthaltene Aktivkohle ausgeschlossen. Die PAK-Zugabe führt zu einem Mehranfall an Klärschlamm. Die dafür im Rahmen der Schlammbehandlung zusätzlich nötige Energie wird für unterschiedliche PAK-Dosierungen ermittelt. Dabei wird angenommen, dass die thermische Energie, die bei der Verbrennung der Aktivkohle mit dem Schlamm freigesetzt wird, Verwendung findet.

Es ergeben sich je nach gewähltem Szenario thermische Energiebilanzen auf der Kläranlage von ca. $-0,18 \text{ kWh/m}^3$ bis $-0,08 \text{ kWh/m}^3$ behandeltem Abwasser (bzw. $-16,4$ bis $-7,2 \text{ kWh/(E-a)}$). Der elektrische Strombedarf auf der Kläranlage beträgt zwischen $0,023$ und $0,133 \text{ kWh/m}^3$ ($2,1$ bis $12,2 \text{ kWh/(E-a)}$). Bild 8 fasst die gesamte benötigte Energie auf der Kläranlage zusammen.

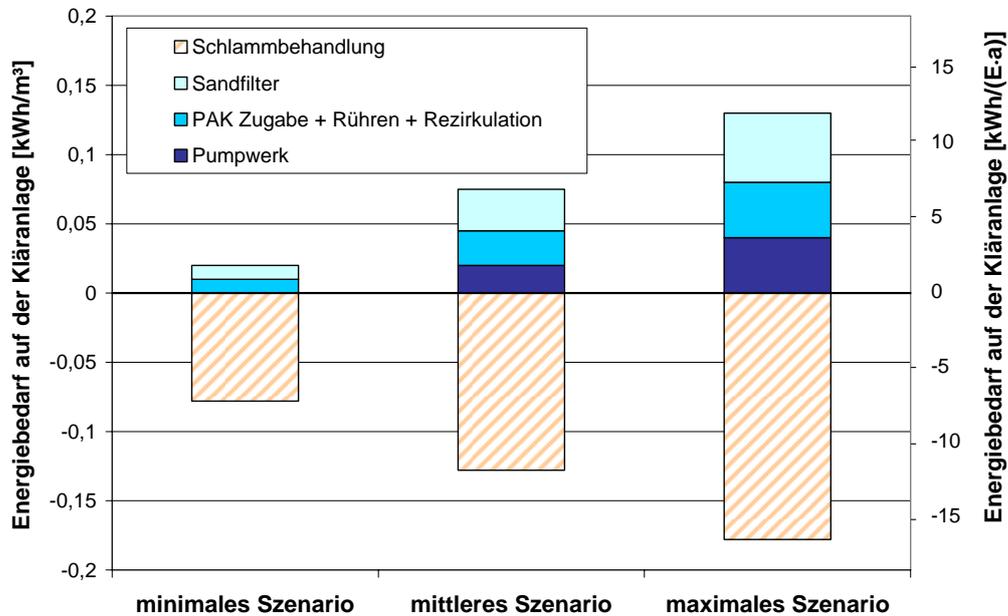


Bild 8: Energiebedarf auf der Kläranlage für eine PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken

Ganzheitlicher Energiebedarf

Für die Berechnung des ganzheitlichen Energiebedarfs einer PAK-Adsorption ergibt sich dieselbe Schwierigkeit wie bei der Betrachtung einer GAK-Filtration: Es wurden ebenfalls zwei Szenarien für die Aktivkohleherstellung betrachtet. Bei der PAK-Zugabe erfolgt zusätzlich eine Dosierung von Fällmitteln und evtl. Flockungshilfsmitteln. Der energetische Aufwand zur Bereitstellung dieser Chemikalien wurde in dieser Energiebilanz aufgrund der geringen Dosierungen nicht berücksichtigt.

Die ermittelten Werte für den gesamten (elektrischen und thermischen), ganzheitlichen Energiebedarf einer nachgeschalteten PAK-Adsorption betragen, wie aus Bild 9 ersichtlich, zwischen ca. $0,01 \text{ kWh/m}^3$ und $1,13 \text{ kWh/m}^3$ ($0,89$ bis 101 kWh/(E-a)). Obwohl die Werte für den Energiebedarf einer GAK- und einer PAK-Adsorption auf der Kläranlage vergleichbar sind, ist der ganzheitliche Energiebedarf der PAK-Adsorption geringer. Ausschlaggebend hierfür sind die geringere PAK-Dosis im Vergleich zur GAK-Filtration sowie die Möglichkeit einer Energierückgewinnung bei der Verbrennung von PAK. Der ganzheitliche Energiebedarf für eine PAK-Adsorption bewegt sich im gleichen Bereich wie beim Einsatz von regenerierter, granulierter Aktivkohle. Wie bei der GAK-Filtration ist der wesentliche Anteil des ganzheitlichen Energiebedarfs auf die Herstellung der Aktivkohle zurückzuführen.

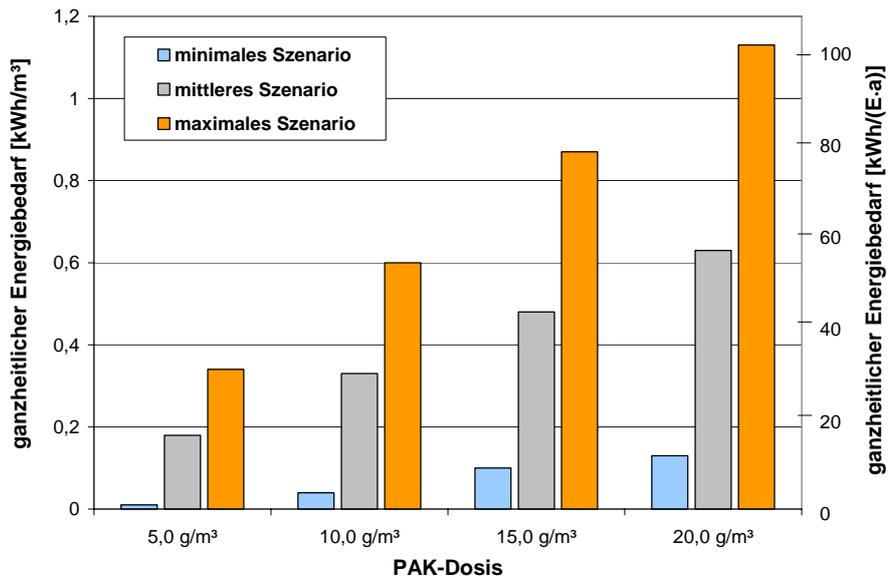


Bild 9: Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf bei einer PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis. Thermische und elektrische Energien wurden addiert.

3.2.4 Energiebedarf einer PAK-Zugabe in den Flockungsraum eines Filters

Die PAK-Zugabe in den Flockungsraum eines vorhandenen Filters wurde bereits im halb- und großtechnischen Maßstab in der Schweiz (vgl. BÖHLER ET AL. 2009) untersucht und wird zurzeit auf der Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen großtechnisch umgesetzt. Spezifische Angaben zum Energiebedarf konnten jedoch noch nicht zusammengetragen werden und werden im Folgenden geschätzt.

Energiebedarf auf der Kläranlage

Es ergibt sich je nach gewählter Verfahrensvariante ein Energiebedarf auf der Kläranlage von ca. 0,05 kWh/m³ bis 0,09 kWh/m³ behandeltem Abwasser (bzw. 4,5 bis 8,0 kWh/(E·a)) ohne Berücksichtigung der Schlammbehandlung. Der Filtration kommt mit 0,01 kWh/m³ (0,89 kWh/(E·a)) nur ein geringer Anteil am Energiebedarf zu. Die zusätzliche Behandlung des Rückspülwassers und die Wasserförderung machen mit 0,04 kWh/m³ (3,6 kWh/(E·a)) bzw. 0 bis 0,04 kWh/m³ (0 bis 3,6 kWh/(E·a)) einen größeren Teil des Bedarfs der Anlage aus. Wird die Behandlung des Schlammes, inkl. Verbrennung und Energierückgewinnung, mitbetrachtet, so ergibt sich ein negativer Wert, d. h. eine Energierückgewinnung, von -0,028 bis -0,055 kWh/m³ (-2,5 bis -4,9 kWh/(E·a)).

Ganzheitlicher Energiebedarf

Die Werte für den ganzheitlichen Energiebedarf betragen zwischen ca. 0,08 bis ca. 1,1 kWh/m³ behandeltem Abwasser (bzw. 7,15 bis 98,3 kWh/(E·a)). Damit bewegt sich der ermittelte Energiebedarf in einem ähnlichen Bereich wie der der nachgeschalteten Adsorption. Auch bei der Filtration mit Zugabe von Pulveraktivkohle in den Flockungsraum eines Filters entspricht der Energiebedarf zur Herstellung der Aktivkohle dem Hauptanteil der

notwendigen Energie. Bei den dargestellten Bedingungen werden für die Aktivkohleherstellung zwischen 0,36 und 0,72 kWh/m³ (32,2 bis 64,4 kWh/(E·a)) benötigt.

3.3 Membranverfahren

Der Einsatz von Nanofiltration und Umkehrosmose zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aus Abwasser ist bisher kaum verbreitet. So beziehen sich die Energiewerte aus der Literatur entweder auf andere (Ab-)Wasserarten oder es handelt sich um Schätzungen. HERBST UND ANTE (2010) zitieren den SCHWEIZERISCHEN VEREIN DES GAS UND WASSERFACHES (2004) mit der Aussage, dass für eine Nanofiltration im Trinkwasserbereich Energieaufwendungen von 0,3 bis 0,5 kWh/m³ nötig sind. Diese Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie die von IVASHECHKIN (2006) geschätzte Annahme von 0,37 kWh/m³ (33,1 kWh/(E·a)) für die Nanofiltration von kommunalem Abwasser. EILERS (2001), PINNEKAMP ET AL. (2009) und ABEGGLEN ET AL. (2009B) geben jedoch höhere Werte zwischen 1 und 2,7 kWh/m³ (89 - 241 kWh/(E·a)) an. Für die Umkehrosmose liegen die Werte aufgrund der höheren Betriebsdrücke i.d.R. höher als für die Nanofiltration.

Eine energetische Betrachtung der Herstellung der Membranen würde den ganzheitlichen Energiebedarf weiter erhöhen. Zudem ist die Entsorgung des anfallenden Konzentrats mit hohen Kosten verbunden und die betrachtete Eliminationsleistung im Vergleich zu den anderen betrachteten Verfahren nicht höher einzustufen.

3.4 Advanced Oxidation Processes

Bei der Kombination von UV und H₂O₂ werden Werte für den Energiebedarf von 0,4 bis 0,55 kWh/m³ (36 – 49 kWh/(E·a)) für die Wasseraufbereitung genannt. Unter Berücksichtigung der H₂O₂-Herstellung wird ein Wert von max. 2,3 kWh/m³ (203 kWh/(E·a)) angegeben (MÜLLER UND JEKEL 2001). Für die Abwasserbehandlung ist ein höherer Energiebedarf von 2 – 8 kWh/m³ (179 – 715 kWh/(E·a)) zu verzeichnen (STOWA 2009). Für die Kombination von Ozonung und H₂O₂ wird zwischen 0,12 – 0,25 kWh/m³ (10,7 – 22,3 kWh/(E·a)) benötigt (RIED ET AL. 2010, BAHR ET AL. 2007). Die Kombination von Ozon und UV-Licht ist bei hohen Belastungen des Wassers sehr energieintensiv. Für im Allgemeinen schwächer belastetes kommunales Abwasser gehen PINNEKAMP UND MERKEL (2008) von einem Energiebedarf von 0,11 kWh/m³ (8,9 kWh/(E·a)) aus. Die Werte für den ganzheitlichen Energiebedarf von MÜLLER UND JEKEL (2001) betragen 2,92 kWh/m³ (261 kWh/(E·a)) bei gleichzeitiger Ozondosierung und Bestrahlung und 1,22 kWh/m³ (109 kWh/(E·a)) bei einer zweistufigen Verfahrensvariante mit nachgeschalteter Bestrahlung.

Insgesamt scheint die Zugabe von H₂O₂ zur Ozonung das AOP-Verfahren mit dem geringsten Energieaufwand zu sein, wohingegen die Bestrahlung mit UV-Licht und Zugabe von H₂O₂ das energieintensivste Verfahren zu sein scheint (vgl. MÜLLER UND JEKEL 2001 und SAFARZAHED-AMIRI 2001).

3.5 Modellanlage

Im Rahmen des Projekts „Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen – Phase I“ aus dem Themenschwerpunkt „Energie und Klima“ (AZ IV-7-042 600 003 I, PINNEKAMP 2011) wurde auf der Basis des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ (MURL, 1999) eine Modellanlage entwickelt. Die Grundlagen dieser Kläranlage wurden für das Projekt ENVELOSO übernommen und durch die zusätzliche Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ergänzt. Für die Energiebetrachtung wird, ebenso analog zu den Ansätzen aus dem Forschungsbericht EnReMem und der entwickelten Modellanlage des Handbuchs, die potenzielle Anschlussgröße von 100.000 E betrachtet. Der tägliche Energiebedarf der konventionellen, energetisch optimierten Abwasserreinigung basierend auf einer einstufigen Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation beträgt 5.680 kWh/d, bzw. 20,7 kWh/(E·a) (MURL, 1999).

Aus Bild 10 wird ersichtlich, dass der Energiebedarf einer Kläranlage durch die Ertüchtigung mit einer Ozonung zur Spurenstoffelimination um 9 bis 180% steigt, je nach Dosierung und Randbedingungen vor Ort. Der Einsatz von GAK oder PAK zur weitergehenden Abwasserreinigung führt zu einer Erhöhung der auf einer Kläranlage benötigten Energie um 21 bis 83%. Dabei ist anzumerken, dass der Energiebedarf der Modellanlage, die als Referenz für diesen Vergleich dient, durch theoretische Betrachtungen unter optimalen Voraussetzungen ermittelt wurde und dadurch einem idealen Wert entspricht. Wird der Wert von 35 kWh/(E·a) (entspricht 0,39 kWh/m³), der aus der Praxis für eine Kläranlage der Größenklasse 4 ermittelt wurde (HABERKERN ET AL., 2008), als Referenz verwendet, dann ist die Steigerung der benötigten Energie durch die Spurenstoffelimination niedriger. Durch eine Ozonung wird der Energiebedarf auf der Kläranlage um 6 bis 108% gesteigert, durch eine Aktivkohleadsorption um 12 bis 49%.

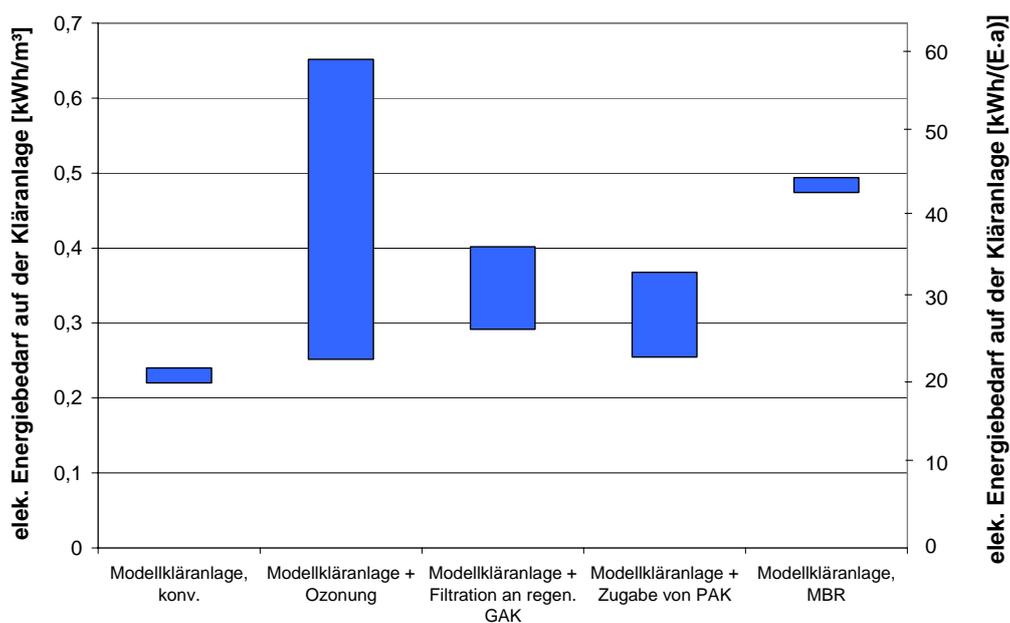


Bild 10: Zusammenfassende Gegenüberstellung der Bandbreite der Werte für den spezifischen Energiebedarf der betrachteten Verfahren zur Spurenstoffelimination

4 CO₂-Bilanzen für verschiedene Verfahren zur Spurenstoffelimination

Neben dem Energiebedarf spielen auch ökologische Aspekte eine Rolle bei der ganzheitlichen Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination aus kommunalem Abwasser. Um eine ganzheitliche ökologische Bewertung vorzunehmen, müssten theoretisch alle bei den Verfahren zum Einsatz kommenden Komponenten von der Herstellung bis zur Entsorgung erfasst und ihre Auswirkungen auf die Umwelt bewertet werden. Eine solche Ökobilanz nach ISO 14040 (2006) erfordert jedoch eine ausführliche Datenerfassung, die an dieser Stelle nicht vorliegt. Die ökologische Bewertung der Verfahren erfolgte stattdessen anhand einer CO₂-Bilanz für eine Ozonung und eine PAK-Adsorption.

Wie bei der im NEPTUNE-Projekt (LARSEN ET AL. 2010) durchgeführten Ökobilanz wird zur CO₂-Bilanzierung zwischen Infrastruktur, Energie auf der Kläranlage und Inputstoffen unterschieden. Diese drei Kategorien wurden ebenfalls für die CO₂-Bilanz einer nachgeschalteten Ozonstufe und Adsorption an Pulveraktivkohle aufgestellt und bewertet (s. Tabelle 2). Aus dieser ersten Betrachtung kann festgehalten werden, dass die Bandbreite, die sich für die PAK-Adsorption bei den verschiedenen Szenarien einstellt, mit der Bandbreite der Ozonung vergleichbar ist. In Einzelfällen ist ein Verfahren günstiger.

Tabelle 2: CO₂-Ausstoß aus einer Ozonung und einer PAK-Adsorption

Summe der CO₂-Emissionen [kg CO₂/m³]			
PAK (Dosis von 5 – 20 g/m³)		Ozon (Dosis von 2,5 – 15 g/m³)	
Szenario Kokosnussschalen	-0,045 bis 0,054	minimale Emissionen	0,017 – 0,111
Niedriges Szenario	0,042 bis 0,178	mittlere Emissionen	0,059 – 0,211
Hohes Szenario	0,090 bis 0,368	maximale Emissionen	0,101 – 0,311
Summe der CO₂-Emissionen [kg CO₂/(E-a)]			
PAK (Dosis von 5 – 20 g/m³)		Ozon (Dosis von 2,5 – 15 g/m³)	
Szenario Kokosnussschalen	-4,0 bis 4,8	minimale Emissionen	1,5 – 9,9
Niedriges Szenario	3,8 bis 15,9	mittlere Emissionen	5,3 – 18,8
Hohes Szenario	8,0 bis 32,9	maximale Emissionen	9,0 – 27,8

Ein Vergleich der ganzheitlichen CO₂-Emissionen einer konventionellen Kläranlage (nach REMY ET AL. 2011) mit den Emissionen von Verfahren zur Spurenstoffelimination ist in Bild 11 dargestellt. Aufgrund der großen Bandbreite der Emissionen für die weitergehende Abwasserreinigung kann keine eindeutige Aussage zur Steigerung der durch eine Spurenstoffelimination verursachten Emissionen ausgesprochen werden.

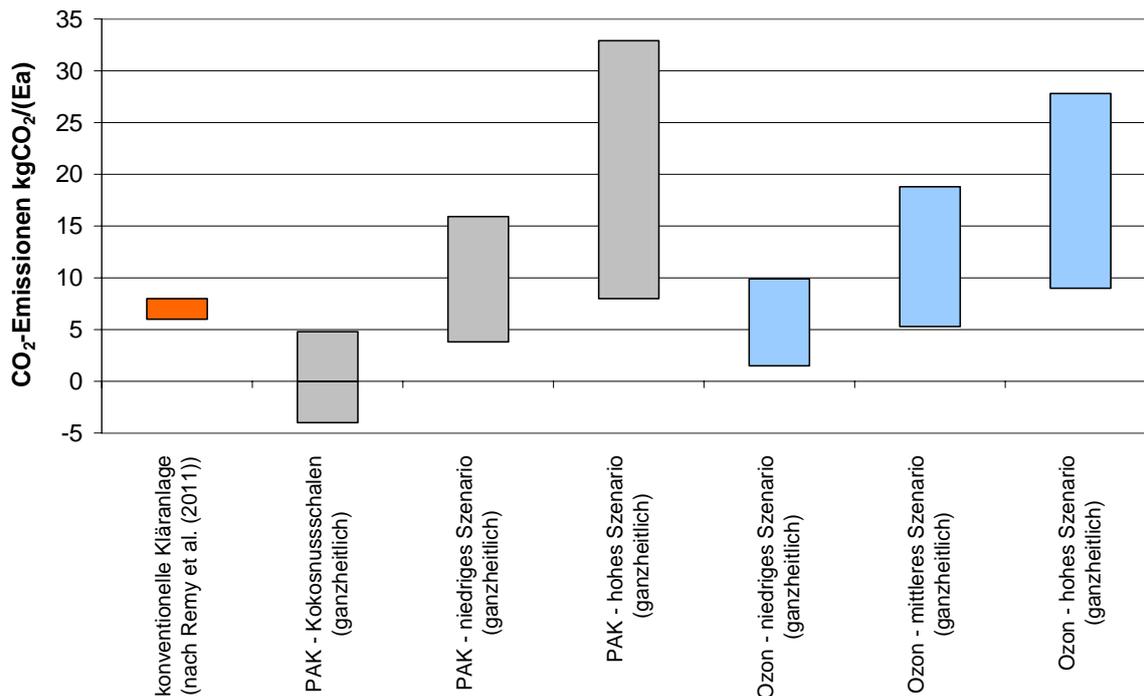


Bild 11: Ganzheitliche Kohlenstoffdioxidemissionen aus einer konventionellen Kläranlage im Vergleich zu den Emissionen von Verfahren zur Spurenstoffelimination

5 Kostenbetrachtung

Literaturdaten sowie vorläufige Daten, die aus dem Teilprojekt 9 „Volkswirtschaftlicher Nutzen“ (AZ IV-7-042 600 001 I, TÜRK ET AL. (bisher unveröffentlicht)) zur Verfügung gestellt wurden, lassen eine erste Bewertung der Kosten der Anlagen zur Elimination von Spurenstoffen zu (s. Bild 12). Dabei sind die Besonderheiten, wie z.B. die unterschiedlichen betrachteten Strompreise zu berücksichtigen (für detaillierte Angaben s. Langfassung des Forschungsberichts). Weiterhin ist zu beachten, dass einige Angaben, u. a. von ABEGGLEN ET AL. (2009A), die verschiedenen Behandlungsstufen und nötige weitere Verfahrensschritte sowie Zwischenhebewerke betrachten. Andere Angaben beziehen sich nur auf den eigentlichen Verfahrensschritt zur Spurenstoffelimination. Trotz der unterschiedlichen Bewertungsansätze gibt Bild 12 einen Überblick über die Bandbreite, in der sich die Kosten der Verfahren zur Spurenstoffelimination bewegen. Sind bei der Ozonung die Kosten für die Investition sowie die Energiekosten für die Ozonherstellung wesentliche Parameter, so spielt beim Einsatz von Aktivkohle der Materialpreis für die frische oder regenerierte Kohle eine ausschlaggebende Rolle.

Mit den erwähnten Einschränkungen ist bei niedrigen Dosierungen die Ozonung das kostengünstigste Verfahren mit 0,007 bis 0,27 €/m³ (SCHUMACHER 2006 und ABEGGLEN ET AL. 2009A). In Abhängigkeit der örtlichen Randbedingungen können die anderen Verfahren (vor allem PAK und GAK) kostengünstige Alternativen darstellen.

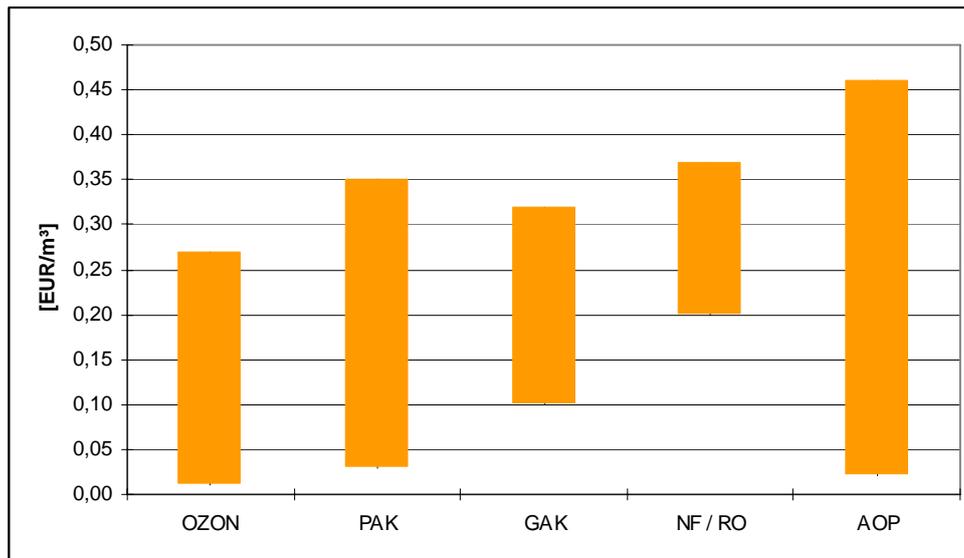


Bild 12: Bandbreite der spezifischen Kosten [EUR/m³] der einzelnen Verfahren zur Spurenstoff-elimination. Teilweise handelt es sich um Betriebskosten, teilweise um Jahreskosten

Außerdem wurden Bandbreiten für die Investitionskosten der Ozonung zusammengetragen und in drei Kategorien unterteilt (für die Kläranlagengrößen 10.000 – 50.000 E, 50.000 – 100.000 E und größer als 100.000 E) und mittels des Kapitalwiedergewinnungsfaktors gemäß der Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser als spezifische Kosten [EUR/(E·a)] aufgetragen (s. Bild 13). Allgemein kann festgehalten werden, dass mit zunehmender Kläranlagengröße die spezifischen Kosten sinken. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die spezifischen Investitionskosten bei höheren Einwohnerwerten geringer werden.

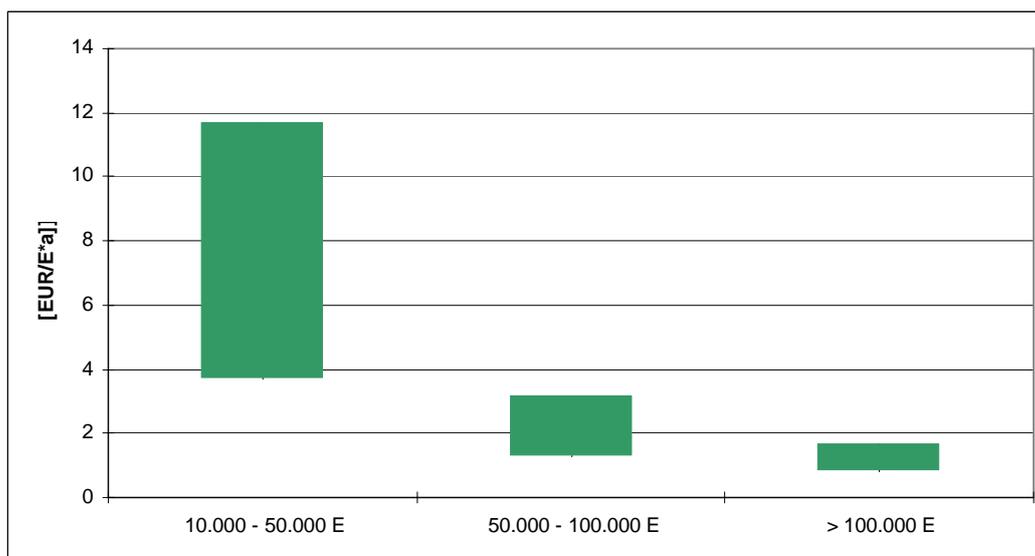


Bild 13: Bandbreite der spezifischen Investitionskosten [EUR/(E·a)] für Ozonung

6 Zusammenfassende Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination

Tabelle 3 fasst die Daten zu Eliminationsleistung, Kosten, Energiebedarf und CO₂-Emissionen verschiedener Verfahren zur Spurenstoffelimination in Form einer qualitativen Bewertungsmatrix zusammen. Die Bewertung reicht von negativ (-) bis sehr positiv (++). Da für die einzelnen Kriterien jedes Verfahren in Abhängigkeit der Abwasserzusammensetzung, Reinigungsziele und anderen Randbedingungen sehr unterschiedlich bewertet werden kann, wurden teilweise Bandbreiten angegeben.

In der Übersicht zeigt sich, dass die Ozonung die meisten positiven Bewertungen erhält. Insbesondere bei dem ganzheitlichen Energiebedarf und den Kosten erweist sich die Ozonung gegenüber den anderen Verfahren positiv. Verglichen mit GAK-Filtration bzw. PAK-Zugabe benötigt eine Ozonung jedoch mehr Energie auf der Kläranlage selbst. Die Tatsache, dass die für die Ozonung notwendige Energie als Strom aufgebracht wird, hat negative Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen. Bei der Ozonung gilt es darüber hinaus zu berücksichtigen, dass die Spurenstoffe während der Behandlung nur umgewandelt und nicht mineralisiert bzw. entfernt werden. Die Problematik von dabei möglicherweise entstehenden ökotoxischen Nebenprodukten wurde im Rahmen dieser Untersuchung nicht betrachtet.

GAK-Filtration mit regenerierter Aktivkohle und PAK-Zugabe sind teilweise ähnlich zu bewerten: Beide Verfahren benötigen wenig Energie auf der Kläranlage, sind jedoch bei einer ganzheitlichen Betrachtung durch die energieintensive Herstellung der Aktivkohle im Nachteil. Die PAK-Dosierung weist eine bessere Eliminationsleistung auf als die GAK-Filtration sowie, bedingt durch die niedrigeren Dosierungen, einen niedrigeren ganzheitlichen Energiebedarf. Da die Pulverkohle nicht reaktiviert, sondern entsorgt wird, können höhere CO₂-Emissionen resultieren, wenn die thermische Energie aus der PAK-Verbrennung nicht genutzt wird. Die Tabelle unterstellt eine Nutzung nicht nachwachsender Rohstoffe zur Aktivkohleproduktion (bspw. Stein- oder Braunkohle, Torf etc.). Durch die Nutzung nachwachsender Rohstoffe (bspw. Kokosnussschalen) als Rohmaterial für die Aktivkohleproduktion könnte die CO₂-Bilanz der adsorptiven Verfahren deutlich verbessert werden, so dass sie in diesem Punkt sogar sehr positiv (++) und damit besser bewertet würde als eine Ozonung.

Advanced Oxidation Processes wurden nicht in allen Punkten einer Bewertung unterzogen, da sie bei einer nur unwesentlichen Verbesserung der Eliminationsleistung für einen Großteil der Substanzen zu höheren Kosten und einem höheren Energiebedarf führen. Auch die dichten Membranverfahren wurden nicht hinsichtlich ihres ganzheitlichen Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen bewertet, da die Entsorgung bzw. Aufbereitung des Retentats derzeit ungeklärt ist. Vor diesem Hintergrund ist auch die sehr gute Eliminationsleistung bezogen auf das Permeat in einem anderen Licht zu sehen.

Tabelle 3: Beurteilung einer granulierten Aktivkohlefiltration aus regenerierter AK, einer Zugabe von Pulveraktivkohle in ein Kontaktbecken, Ozonung, Nanofiltration/Umkehrosmose und Advanced Oxidation Processes bezüglich verschiedener Kriterien

Verfahren Kriterium	GAK-Filtration regeneriert	PAK-Zugabe in ein Kontakt- becken	Ozonung	Nanofiltration/ Umkehr- osmose	Advanced Oxidation Processes
Eliminationsleistung	0 bis +	+ bis ++	+	++	+
Energiebedarf auf der Kläranlage	+	+	0	-	- bis 0
Ganzheitlicher Energiebedarf	- bis 0	- bis +	+	k. A.	k. A.
CO ₂ -Emission	0	- bis +	- bis +	k. A.	k. A.
Kosten	0	0	+	-	0

7 Fazit

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse kann zum aktuellen Zeitpunkt keine eindeutige Empfehlung für ein Verfahren ausgesprochen werden. Hierzu sind weitere Forschungsergebnisse bezüglich der Eliminationsraten und des Energiebedarfs notwendig. Diese offenen Fragen sollen in der zweiten Phase des Projekts beantwortet werden, indem Daten aus großtechnischen Anlagen mit Spurenstoffelimination ausgewertet werden. Aus den Betriebsdaten wird eine Eingrenzung der zielführenden Dosierungen möglich sein, so dass die in dem vorliegenden Bericht angegebene Bandbreite des Energiebedarfs auf der Kläranlage, des ganzheitlichen Energiebedarfs, der Kosten und CO₂-Emissionen reduziert werden kann. Die Bewertungsmatrix wird somit verfeinert und ihre Aussagekraft als Entscheidungshilfe für die weitergehende Abwasserreinigung verbessert.

8 Literaturverzeichnis

ABEGGLEN, C., BÖHLER, M., HOLLENDER, J., & SIEGRIST, H. (2011). Verfahrenstechnische Ansätze zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aus dem Abwasser – Kosten, Energieverbrauch und Effizienz der Verfahren. In J. PINNEKAMP (Hrsg.), *44. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 23.3 - 25.3.2011 in Aachen* (S. 26/1-26/10). Aachen: Gesellschaft zu Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.

ABEGGLEN, C., ROSENSTIEL, R., ORT, C. & SCHÄRER, M. (2009A). Weitergehende Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei kommunalen Abwasserreinigungsanlagen – Verfahren und Kosten. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 56 (6), S. 584-592.

ABEGGLEN, C., JOSS, A., & SIEGRIST, H. (2009B). Spurenstoffe eliminieren: Kläranlagentechnik. *EAWAG News*, 67d, Juni 2009, S. 25-27.

- ALT, K., & MAURITZ, A. (2009). Projekt zur Teilstrombehandlung mit Pulveraktivkohle im Klärwerk Mannheim. In J. PINNEKAMP (Hrsg.), *10. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium 2009* (S. 19/1-19/12). Aachen: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.
- BAHR, C., ERNST, M., & JEKEL, M. (2007). *Pilotuntersuchungen zur kombinierten oxidativ-biologischen Behandlung von Kläranlagenabläufen für die Entfernung von organischen Spuren- und Wirkstoffen und zur Desinfektion*. (Bd. 5). Berlin: Schriftenreihe Kompetenzzentrum Wasser Berlin.
- BEIER, S. (2010). *Elimination von Arzneimitteln aus Krankenhausabwasser* (Bd. 222). (J. PINNEKAMP, Hrsg.) Aachen: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.
- BÖHLER, M., JOSS, A., MILADINOVIC, N., SIEGRIST, H., STERKELE, B., TERNES, T., et al. (2009). „Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration der Kläranlage Kloten-Opfikon. Ergänzende Untersuchungen zum Micropoll, Zwischenbericht, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Dübendorf.
- EAWAG: ABEGGLEN, C., ESCHER, B., HOLLENDER, J., KOEPKE, S., ORT, C., PETER, A., et al. (2009). *Ozonung von gereinigtem Abwasser*. Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf, Dübendorf.
- EILERS, L. (2001). *Verfahrenskombination von Nanofiltration und Adsorption an Pulverkohle zur kontinuierlichen Abwasserreinigung*. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Aachen.
- FAHLENKAMP, H. et al. (2008). *Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen Phase 3*. Abschlussbericht, Universität Dortmund, Fakultät Chemie- und Bioingenieurwesen, Lehrstuhl Umwelttechnik, Dortmund.
- HABERKERN, B., MAIER, W., & SCHNEIDER, U. (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Text 11/08, Umweltbundesamt (Hrsg.), ISSN 1862-4804, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3347.pdf>
- HERBST, H., & ANTE, S. (2010). Energiebedarf von Anlagen zur Mikroschadstoffentfernung. In G. z.-U. Bochum (Hrsg.), *Zukunftsthema Energie - Die Siedlungswasserwirtschaft ist gefordert*. S. 113-126. Bochum.
- ISO 14040 (2006). *DIN EN ISO: 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Norm.
- IVASHECKIN, P. (2006). *Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser*. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Aachen.
- LARSEN, H. F., HANSEN, P. A., & BOYER-SOUCHET, F. (2010). *NEPTUNE - New sustainable concepts and processes for optimization and upgrading municipal wastewater and sludge treatment: Deliverable 4.3 Decision support guideline based on LCA and cost/efficiency*. <http://www.eu-neptune.org>
- MEIER, M. A. (1997). *Eco-Efficiency Evaluation of Waste Gas Purification Systems in the Chemical Industry*. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zürich.
- MÜLLER, J.-P., & JEKEL, M. (2001). Comparison of advanced oxidation processes in flow-through pilot plants (Part 1). (P. WILDERER, Hrsg.) *Water Science and Technology*, 44 (5), S. 303-309.
- MURL (1999). *Energie in Kläranlagen – Handbuch*, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen.
- NEPTUNE (New sustainable concepts and processes for optimization and upgrading municipal wastewater and sludge treatment) (2010). *Deliverable 5.4: Catalogue with criteria for evaluating technologies*.
- PINNEKAMP, J. & MERKEL, W. (2008). *Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen - Güte- und Kostenbetrachtungen*. Abschlussbericht Forschungsvorhaben, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Aachen/Mühlheim.
- PINNEKAMP, J. (2011). *Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen - Phase I*. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,

Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, (AZ IV-7-042 600 003 I).

PINNEKAMP, J., BEIER, S., CRAMER, C., SCHRÖDER, H. F., MAUER, C. & SELKE, D. (2009). *Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwässern mit Membrantechnik und weitergehenden Behandlungsverfahren – Pilotprojekt Kreiskrankenhaus Waldbröl*. Pilotprojekt Kreiskrankenhaus Waldbröl (Abschlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Förderkennzeichen IV – 9 – 042 1B4 0020), RWTH Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft.

PINNEKAMP, J., KEYSERS, C., MONTAG, D., & VELTMANN, K. (2010). Elimination von Mikroschadstoffen. In J. PINNEKAMP (Hrsg.), *43. Essener Tagung*. Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.

REMY, C., LESJEAN, B., & HARTMANN, A. (2011). Die Methodik der Ökobilanz zur ganzheitlichen Erfassung des Energieverbrauchs in der Abwasserreinigung. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 58 (6), S. 572-576.

RIED, A., WIELAND, A., & MIELCKE, J. (2010). Advanced Oxidation Processes (AOP) - Comparison of different treatment scenarios based on processes combining Ozone, UV and Hydrogen Peroxide. *IWA Montreal 2010*.

SAFARZAHED-AMIRI, A. (2001). O₃/H₂O₂ treatment of methyl-tert-Butyl ether (MTBE) in contaminated waters. *Water Research*, 35 (15), S. 3706-3714.

SCHUMACHER, J. (2006). *Ozonung zur weitergehenden Aufbereitung kommunaler Kläranlagenabläufe*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät III-Prozesswissenschaften, Berlin.

SCHWEIZERISCHER VERBAND DES GAS- UND WASSERFACHES (SVGW), BUNDESAMT FÜR ENERGIE SCHWEIZ (BFE) (2004). *Handbuch: Energie in der Wasserversorgung – Der Ratgeber zur Energiekosten- und Betriebsoptimierung* (Art. Nr. 2068).

STOWA (2010). *Actievekoolfiltratie op afloop nabezinktank*. Forschungsbericht, Amersfoort.

STOWA (2009). *Nageschakelde zuiveringstechnieken op de AWZI Leiden Zuid-West*. Forschungsbericht, Utrecht.

TERNES, T. A., JANEX-HABIBI, M.-L., KNACKER, T., KREUZINGER, N., & SIEGRIST, H. (2004). *Assessment of Technologies for the Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Sewage and Drinking Water Facilities to Improve the Indirect Potable Water Reuse*. Abschlussbericht POSEIDON.

TERNES, T., & JOSS, A. (Hrsg.). (2006). *Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrance: The Challenge of Micropollutants in Urban Water Management*. London: IWA Publishing.

TÜRK, J. et al. (bisher unveröffentlicht): Abschlussbericht zum Projekt „Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren“, gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, in Bearbeitung (bisher unveröffentlicht).