



Aktenzeichen IV-7-042 600 003 J

Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase II

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 II

KURZBERICHT

Aachen, im August 2015
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	Energieverbrauchsdaten großtechnischer Kläranlagen mit Spurenstoffelimination.....	2
2.1	Ozonung	2
2.2	Zugabe von PAK	5
2.3	Filtration über GAK.....	7
3	Ganzheitlicher Energiebedarf	9
4	CO₂-Emissionen.....	10
5	Modellkläranlage.....	12
5.1	Ermittlung des Energiebedarfs der Spurenstoffelimination mithilfe der Modellkläranlagen.....	12
5.2	Wesentliche Einflussfaktoren auf den Energiebedarf von Anlagen zur Spurenstoffelimination	15
6	Zusammenfassende Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination....	16
6.1	Spurenstoffelimination.....	16
6.2	Energieverbrauch auf der Kläranlage	17
6.3	Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage	18
6.4	CO ₂ -Emissionen.....	19
6.5	Bewertungstabelle.....	20
6.6	Empfehlungen für Planung und Betrieb von Anlagen zur Spurenstoffelimination....	23
7	Kompensationsmaßnahmen	23
8	Zusammenfassung und Fazit.....	25
9	Literaturverzeichnis	26

1 Veranlassung und Zielsetzung

Im alltäglichen Leben benutzt der Mensch eine Vielzahl von synthetischen organischen Verbindungen, beispielsweise in Form von Medikamenten, Pflegeprodukten oder Haushaltschemikalien. Vor, während und/oder nach ihrer Nutzungsphase gelangen diese Produkte ins Abwasser und somit in kommunale Kläranlagen. Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften werden diese Stoffe jedoch oft nur unzureichend abgebaut und sind deshalb in sehr geringen Konzentrationen in den Oberflächengewässern zu finden.

Zur Elimination dieser organischen Spurenstoffe aus Abwasserströmen stehen verschiedene oxidative, adsorptive und membranbasierte Verfahren zur Verfügung. Bisher lag der Schwerpunkt der Untersuchungen zur Spurenstoffelimination auf der Effektivität solcher Verfahren, wobei der Energiebedarf weitgehend unberücksichtigt blieb.

Hauptziel dieses Projekts ist es, eine zusammenfassende, energetische und ökologische Bewertung der relevanten Verfahren zur Elimination organischer Spurenstoffe aus Abwässern zur Verfügung zu stellen, die Planern und Betreibern von Abwasseranlagen sowie den Überwachungsbehörden als Entscheidungshilfe bei einem zukünftigen Einsatz dieser Techniken dienen kann.

In der ersten Projektphase (vgl. PINNEKAMP ET AL., 2011) wurden unterschiedliche Verfahren zur Spurenstoffelimination hinsichtlich ihrer Elimination von ausgewählten Leitsubstanzen erläutert und bewertet. Zur Beurteilung des Energieverbrauchs direkt auf der Kläranlage sowie auch außerhalb davon (ganzheitlicher Energiebedarf) wurden Berechnungen basierend auf Literatur- und Herstellerangaben für Szenarien mit minimalem, mittlerem und hohem Energieverbrauch durchgeführt.

Aufgrund der hierbei ermittelten Ergebnisse konnte jedoch keine eindeutige Empfehlung für ein bestimmtes Verfahren ausgesprochen werden. Hierzu waren weitere Forschungsergebnisse bezüglich des Energiebedarfs auf großtechnischen Anlagen notwendig. Dieser Aspekt wurde in der vorliegenden zweiten Phase des Projekts untersucht, indem Daten aus großtechnischen Anlagen mit Spurenstoffelimination ausgewertet wurden. Aus den Betriebsdaten erfolgte eine Eingrenzung der zielführenden Dosierungen, so dass die in Phase I angegebenen Bandbreiten des Energiebedarfs auf der Kläranlage, des ganzheitlichen Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen eingegrenzt werden konnten. Da die Verfahren der Nanofiltration/Umkehrosmose und die Advanced Oxidation Processes noch nicht großtechnisch zur Spurenstoffelimination eingesetzt werden und dadurch keine großtechnischen Energieverbrauchsdaten vorliegen, wurden ausschließlich die Verfahren der Ozonung und der Adsorption an Aktivkohle (Pulveraktivkohle (PAK) und granuliert Aktivkohle (GAK)) betrachtet.

Weiterhin wurden tabellarische Modellkläranlagen zur Bemessung und Ermittlung von Idealwerten gemäß DWA-A 216 für zwei Kläranlagen mit vierter Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination und mit für Nordrhein-Westfalen (NRW) repräsentative Größen erstellt. Mit diesen Modellkläranlagen kann insbesondere die Beurteilung der Auswirkungen einer weiteren Reinigungsstufe auf den Gesamtenergieverbrauch auf Basis realer Daten erfolgen.

2 Energieverbrauchsdaten großtechnischer Kläranlagen mit Spurenstoffelimination

Tabelle 2-1 gibt eine Übersicht über die betrachteten großtechnischen Kläranlagen (KA) und die dort eingesetzten Verfahren zur Spurenstoffelimination. Für eine genaue Anlagenbeschreibung wird auf die Langfassung des Berichtes verwiesen.

Tabelle 2-1: Betrachtete Kläranlagen

Anlage	Verfahren
Bad Sassendorf	Ozonung
Schwerte	Ozonung und/oder PAK im Rezirkulationsbetrieb
Duisburg-Vierlinden	Ozonung
Wuppertal Buchenhofen	PAK-Zugabe in Flockungsraum eines Filters
Düren	GAK-Adsorption
Obere Lutter	GAK-Adsorption
Böblingen-Sindelfingen	PAK-Zugabe in Kontaktbecken + Filtration
Mannheim	PAK-Zugabe in Kontaktbecken + Filtration
Gütersloh-Putzhagen	GAK-Adsorption
Kressbronn-Langenargen	PAK-Zugabe in Kontaktbecken + Filtration

Im Folgenden werden die für die großtechnischen Anlagen ermittelten Stromverbräuche zusammengefasst und mit den Literaturwerten aus Phase I verglichen. In diesem Kapitel werden die Begriffe Energieverbrauch und Stromverbrauch synonym verwendet, da hier nur elektrische Energie betrachtet wird.

2.1 Ozonung

Die ermittelten Werte für den spezifischen Stromverbrauch der Ozonung auf den jeweiligen Kläranlagen sind mit den entsprechenden Dosiermengen an Ozon in Bild 2-1 dargestellt. Zusätzlich ist die Pumpenergie zur Überwindung der Förderhöhen gesondert dargestellt. Für die Kläranlage Schwerte sind zudem die Werte mit der theoretisch berechneten Förderhöhe (maximal 34,8 % der Förderhöhe für die Ozonung) dargestellt¹. Bei allen betrachteten Kläranlagen wird Flüssigsauerstoff angeliefert.

Die gemessenen Werte für den Stromverbrauch liegen im Bereich von ca. **0,04 kWh/m³ bis ca. 0,17 kWh/m³** behandeltem Abwasser. Die zugegebenen Dosiermengen an Ozon bewegen sich im Bereich von 2 bis 7 g Ozon/m³ behandeltem Abwasser. Mit steigender

¹ Die weitergehende Behandlung in Schwerte ist als Anlage mit Pilotcharakter ausgelegt. Hier können die Ozonung und die Zugabe von PAK im Rezirkulationsbetrieb direkt verglichen werden und sogar kombiniert werden. Allerdings wird auch bei einer alleinigen Ozonung die PAK-Stufe durchflossen und umgekehrt, weswegen unnötige Förderhöhen überwunden werden müssen. Zum Ausschluss dieser Förderhöhen wird auch mit der theoretisch erforderlichen Förderhöhe gerechnet. Für detailliertere Informationen wird an dieser Stelle auf den Langbericht verwiesen.

Ozondosis steigt auch der spezifische Energieverbrauch an, was auf den höheren Verbrauch des Ozongenerators zurückzuführen ist.

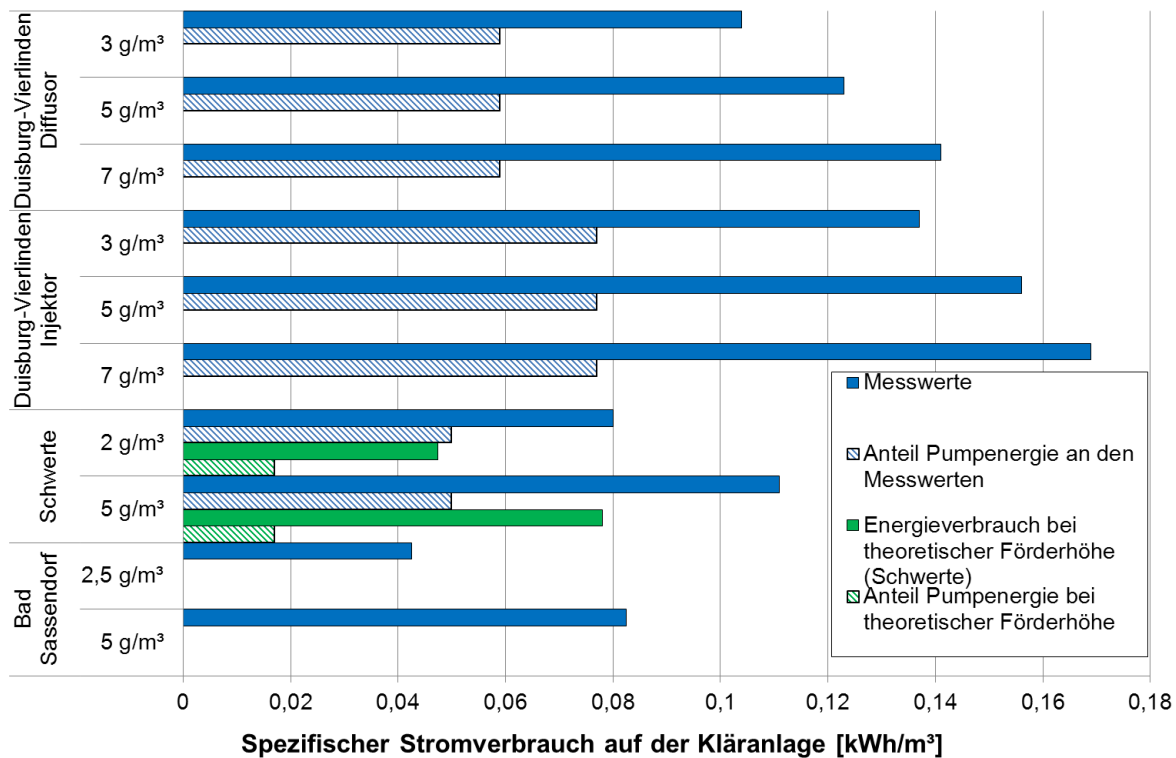


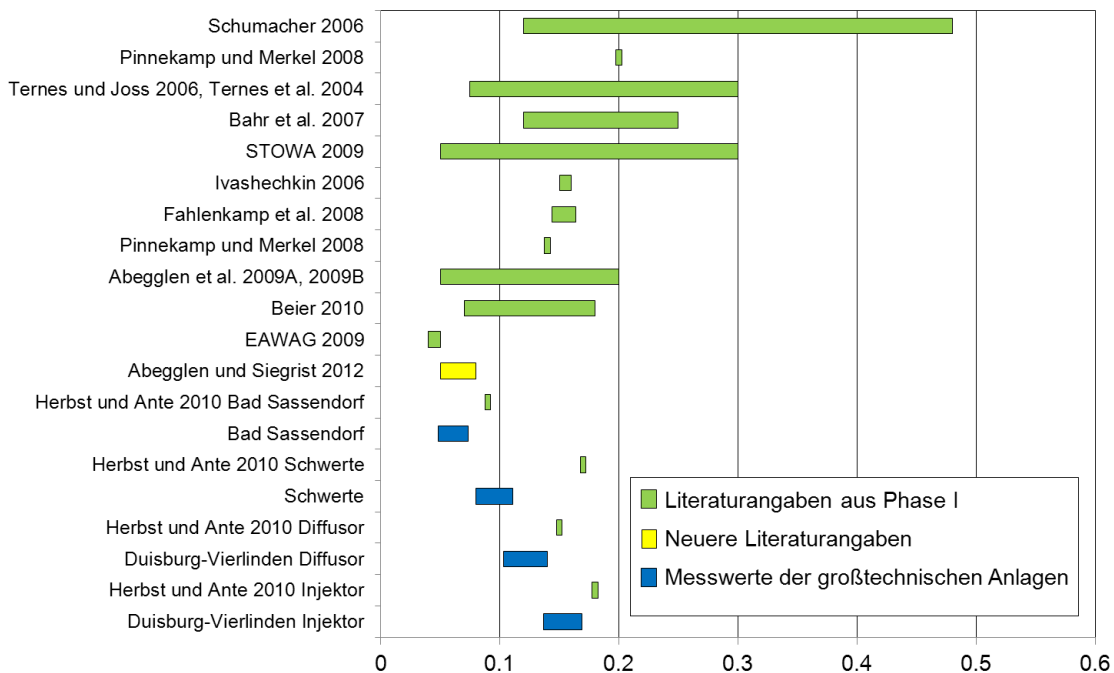
Bild 2-1: Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen Ozonungsanlagen

Die gemittelten Messwerte liegen für die KA **Bad Sassendorf** bei 0,043 kWh/m³ für Dosiermengen um 2,5 g/m³ und bei 0,083 kWh/m³ für Dosiermengen um 5 g/m³. Auf der KA **Schwerte** beträgt der Verbrauch rund 0,08 kWh/m³ für 2 g/m³ bzw. 0,11 kWh/m³ für 5 g/m³. Der im Vergleich zu Bad Sassendorf höhere Stromverbrauch auf der KA Schwerte ist darauf zurückzuführen, dass die Zulaufpumpen 45,3 % bzw. 62,5 % des Gesamtstromverbrauchs ausmachen; in Bad Sassendorf erfolgt die Beschickung im Freispiegel. Bei der theoretisch erforderlichen Förderhöhe in Schwerte läge der Gesamtstromverbrauch nur bei 0,047 kWh/m³ bzw. 0,078 kWh/m³ und damit fast identisch mit dem in Bad Sassendorf. Der Stromverbrauch des Ozongenerators liegt in Bad Sassendorf mit 0,022 kWh/m³ bei Dosiermengen um 2,5 g/m³ und 0,050 kWh/m³ bei 5 g/m³ in derselben Größenordnung wie in Schwerte, wo er 0,020 kWh/m³ (2 g/m³) bzw. 0,054 kWh/m³ (5 g/m³) beträgt.

Für die KA **Duisburg-Vierlinden** wurden mittels der Messwerte Funktionen für den Energiebedarf in Abhängigkeit der Wassermenge erstellt. Bei einem Zulauf von 100 m³/h betragen die Werte zwischen 0,103 kWh/m³ (bei Dosiermengen von 3 g/m³) und 0,140 kWh/m³ (bei 7 g/m³) für die Diffusorstraße und zwischen 0,137 kWh/m³ (bei 3 g/m³) und 0,169 kWh/m³ (bei 7 g/m³) für die Injektorstraße. Diese Werte sind deutlich höher als die Werte für Bad Sassendorf. In Duisburg-Vierlinden macht das Zulaufpumpwerk bei niedrigen Dosiermengen bis zu mehr als 50 % des Stromverbrauchs aus. Bei 5 g/m³ liegt der Energieverbrauch der Ozonherstellung und des -eintrags bei rund 0,06 kWh/m³ für die Diffusorstraße und bei ca. 0,08 kWh/m³ für die Injektorstraße.

Es bleibt zu beachten, dass die Nachbehandlungen noch nicht mitberücksichtigt wurden. Auf der KA Bad Sassendorf ist ein Schönungsteich vorhanden, der jedoch mit keinem relevanten Energiebedarf einhergeht. Auf der KA Schwerte wird das Abwasser in die konventionelle Biologie eingebracht und es wird nicht von einem Mehrbedarf an Sauerstoff (Belüftungsenergie) ausgegangen. In Duisburg-Vierlinden ist im Ablauf der Injektorstraße ein Wirbelbett installiert, bei der Energieverbrauchsmessung aber nicht erfasst. Der von HERBST UND ANTE (2010) für das Wirbelbett angesetzte Verbrauch von 0,02 kWh/m³ würde die entsprechenden Verbräuche der Straße je nach Dosiermenge um bis zu 15 % erhöhen.

Bild 2-2 ist an Phase I des Projektes angelehnt (Literaturdaten aus Phase I grün dargestellt) und um neuere Literaturdaten (gelb) sowie um Daten der großtechnisch untersuchten Anlagen (blau) ergänzt worden. Die Angaben des Energiebedarfs sind auf die spezifische Abwassermenge bezogen [kWh/m³]. Für die großtechnischen Anlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden, für die CSB-Werte vorlagen, ist zusätzlich der Bezug auf die aus dem CSB ermittelte Einwohnerzahl in den entsprechenden Kapiteln der Langfassung des Berichtes angegeben.



Spezifischer Strombedarf der Ozonung auf der Kläranlage [kWh/m³]

Bild 2-2: Strombedarf einer nachgeschalteten Ozonung auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus den großtechnisch untersuchten Anlagen mit Literaturangaben

Die Literaturwerte liegen in der Spannweite von 0,04 kWh/m³ bis 0,48 kWh/m³. Die angegebenen Daten stammen zum Teil aus Abschätzungen und Modellberechnungen. Andere wurden mittels Daten aus Pilotversuchen berechnet. Die Randbedingungen sind also bei der Interpretation und Verwendung dieser Daten näher zu betrachten (siehe hierzu PINNEKAMP ET AL., 2011). Die Messwerte aus den großtechnischen Anlagen liegen im unteren Drittel der Werte der Literaturangaben. Die Werte der großtechnischen Anlagen aus Phase II liegen

sehr gut im Einklang mit den berechneten Werten aus Phase I für die entsprechenden Dosiermengen und für das in Phase I betrachtete niedrige und das mittlere Szenario.

2.2 Zugabe von PAK

Die ermittelten Werte für den spezifischen Energieverbrauch pro m³ behandeltem Abwasser auf der Kläranlage sind mit den dazugehörigen Dosiermengen an PAK in Bild 2-3 dargestellt. Es werden zum einen die Messwerte von den Anlagen, zum anderen der Energiebedarf bei einer theoretischen Höhe von maximal 33,3 % der tatsächlichen Förderhöhe in Schwerte (siehe auch Kapitel 2.1) angezeigt. Für Schwerte ist der Anteil der Zulaufpumpen entsprechend dargestellt. Für Böblingen-Sindelfingen ist zudem der Energiebedarf der bereits vorhandenen Flockungsfiltration aufgezeigt, der im Messwert enthalten ist.

Für die KA **Mannheim** beträgt der Messwert für den Energieverbrauch der Zugabe von PAK ca. 0,03 kWh/m³. In **Böblingen-Sindelfingen** beträgt der Mehrbedarf an Strom durch die Adsorptionsstufe 0,027 kWh/m³. In **Wuppertal-Buchenhofen** erfolgt die Zugabe von PAK in die Flockungsfiltration mit einem Mehrbedarf an Energie von im Mittel 0,024 kWh/m³. Aufgrund der Rezirkulation in die Biologie ist in **Schwerte** eine gewisse Förderhöhe nicht zu umgehen, weswegen der Verbrauch bei der theoretischen Förderhöhe immer noch bei ca. 0,05 kWh/m³ liegt. In **Kressbronn-Langenargen** wurde ein mittlerer Energieverbrauch für den Betrieb der Adsorptionsstufe von 0,036 kWh/m³ ermittelt. Der Energiebedarf der Zugabe von PAK ist nicht von der Dosiermenge abhängig. Bei günstigen Bedingungen kann der Verbrauch in Höhe von ca. 0,03 kWh/m³ für die Adsorptionsstufe angesetzt werden.

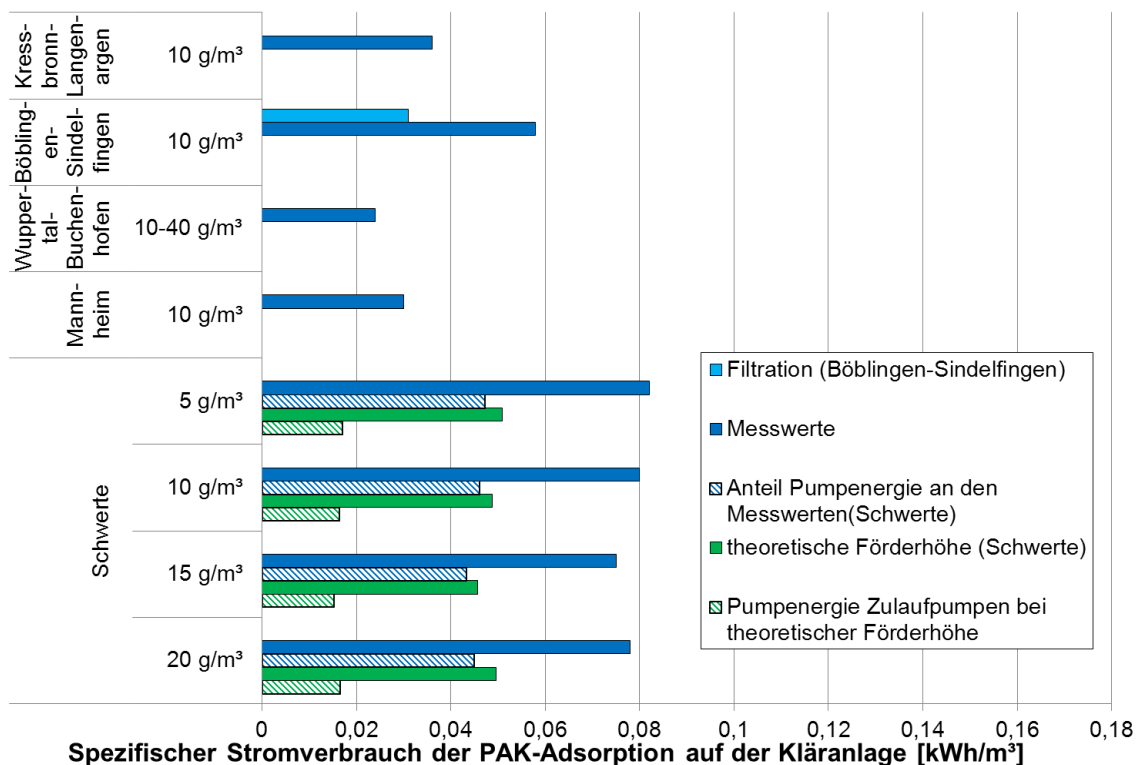
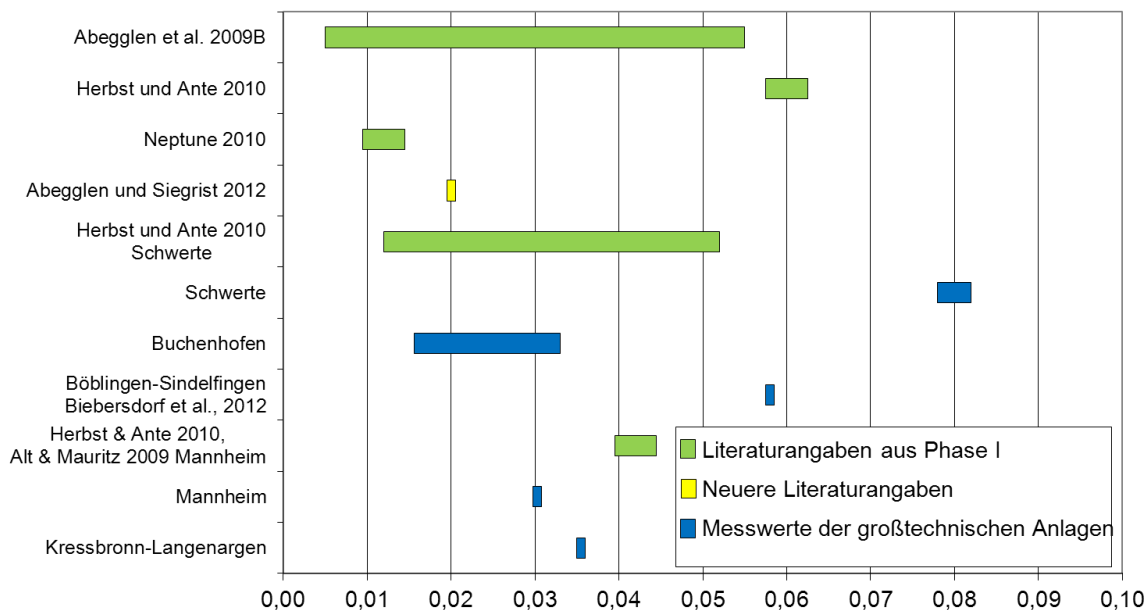


Bild 2-3: Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen Spurenstoff-eliminierungsstufen mit Zugabe von PAK

Bild 2-4 ist aus der ersten Phase des Projektes (Literaturwerte grün dargestellt) übernommen und um neuere Literaturdaten (gelb) sowie um die Daten der großtechnisch untersuchten Anlagen (blau) ergänzt worden.



Spezifischer Strombedarf der PAK-Adsorption auf der Kläranlage [kWh/m³]

Bild 2-4: Strombedarf einer nachgeschalteten Zugabe von PAK auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus den großtechnisch untersuchten Anlagen mit Literaturangaben

Die Literaturwerte liegen in der Spannweite von 0,005 kWh/m³ bis 0,06 kWh/m³. ABBEGLEN ET AL. (2009) geben für die Adsorption einen Stromverbrauch von 0,005 kWh/m³ an, für die ggf. erforderliche, nachgeschaltete Sandfiltration werden 0,05 kWh/m³ veranschlagt, so dass es zu der großen dargestellten Spannweite kommt. Für die KA Schwerte schätzen HERBST UND ANTE (2010) einen Energieverbrauch von 0,052 kWh/m³ (davon 0,04 kWh/m³ für das Hebewerk) für die PAK-Dosierung. Mit der theoretisch erforderlichen Förderhöhe käme die KA Schwerte auf einen Stromverbrauch von 0,048 kWh/m³ und läge damit im prognostizierten Bereich.

Der zusätzliche Energieverbrauch einer PAK-Adsorptionsstufe (PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken und PAK-Zugabe in die Flockungsfiltration) kann im Bereich von 0,025–0,035 kWh/m³ festgehalten werden. Diese Werte sind ähnlich zu den Berechnungen aus Phase I. Durch die abschließende Filtration/PAK-Abtrennung wird der Verbrauch noch um 0,01–0,05 kWh/m³ erhöht (siehe Böblingen-Sindelfingen). Allerdings verfügen viele Kläranlagen vor Einführung der vierten Reinigungsstufe bereits über eine Filtration, so dass dieser Mehrbedarf an Strom nicht unmittelbar der Spurenstoffelimination zuzuordnen ist. Je nach Anlagenkonfiguration fällt ein zusätzlicher, mehr oder weniger hoher, Strombedarf durch Hebewerke an.

2.3 Filtration über GAK

Die in Phase II ermittelten Messwerte für den spezifischen Energieverbrauch pro m³ behandeltem Abwasser der großtechnischen GAK-Filtrationsanlagen (Großadsorber (GA)²) sind in Bild 2-5 dargestellt. Der mittlere Energiebedarf für **Düren-Merken** liegt bei 0,063 kWh/m³ inklusive Hebework und Rückspülung. Der größte Anteil des Stromverbrauches (rund 79 %) wird durch das Hebework bedingt, das jedoch auch bei der konventionellen Filtration zum Einsatz kommt. Der Vergleich zeigt, dass der Zusatzaufwand sich auf 0,016 kWh/m³ bzw. 32,9 % mehr Energie als bei der konventionellen Filterzelle beläuft. Dies ist durch die häufigeren Rückspülungen der GAK-Zelle in Düren im Vergleich zum konventionellen Filter bedingt.

Der mittlere Energiebedarf des aufwärtsdurchströmten Filters in **Gütersloh-Putzhagen** liegt bei 0,025 kWh/m³, wobei nur ein geringer Anteil durch die tägliche Rückspülung bedingt wird. Eine eventuelle Fällmittelzugabe, die im Versuchsbetrieb nicht vorlag, könnte noch Einfluss auf diese Werte haben. Auf dem Klärwerk **Obere Lutter** liegt der Energiedarf der unterschiedlichen Filter bei ca. 0,037 kWh/m³. Hier werden ca. 0,030 kWh/m³ durch die eigentliche Filtration bewirkt; der Rest ist den Rückspülungen (zweimal wöchentlich) zuzuordnen. Auf dem Klärwerk Obere Lutter sind die Rückspülungen mit einem höheren Energieaufwand verbunden als in Gütersloh-Putzhagen, da das Spülwasser bei der Rückführung einen Höhenunterschied von 9 Metern überwinden muss (vgl. Bild 2-5).

Insgesamt liegen die Werte der drei großtechnischen Anlagen im Bereich der in Phase I ermittelten Werte. Da viele Kläranlagen bereits über eine Filtration verfügen, ist nur der zusätzliche Anteil, im Vergleich zu einer konventionellen Filtration, unmittelbar der Spurenstoffelimination zuzuschreiben. So liegt der alleinige Mehrbedarf an Strom in Düren mit 0,016 kWh/m³ im Bereich der Berechnungen aus Phase I. Auf dem Klärwerk Obere Lutter beträgt der Energieverbrauch der GAK-Zellen zwischen 0,006–0,010 kWh/m³ unterhalb des Verbrauchs der konventionellen Zellen³. Um vermehrte Rückspülungen zu vermeiden, ist ein vorgeschalteter ausreichender Rückhalt an Feststoffen sinnvoll.

² Details zu den Betriebseinstellungen und Kohlearten der einzelnen betrachteten Großadsorber sind in der Langfassung des Berichtes zu finden.

³ Der höhere Wert des Referenzfilters ist zum größten Teil auf das Drehkolbengebläse für die Prozessluft sowie auf die häufigeren Rückspülungen (fünfmal die Woche) zurückzuführen

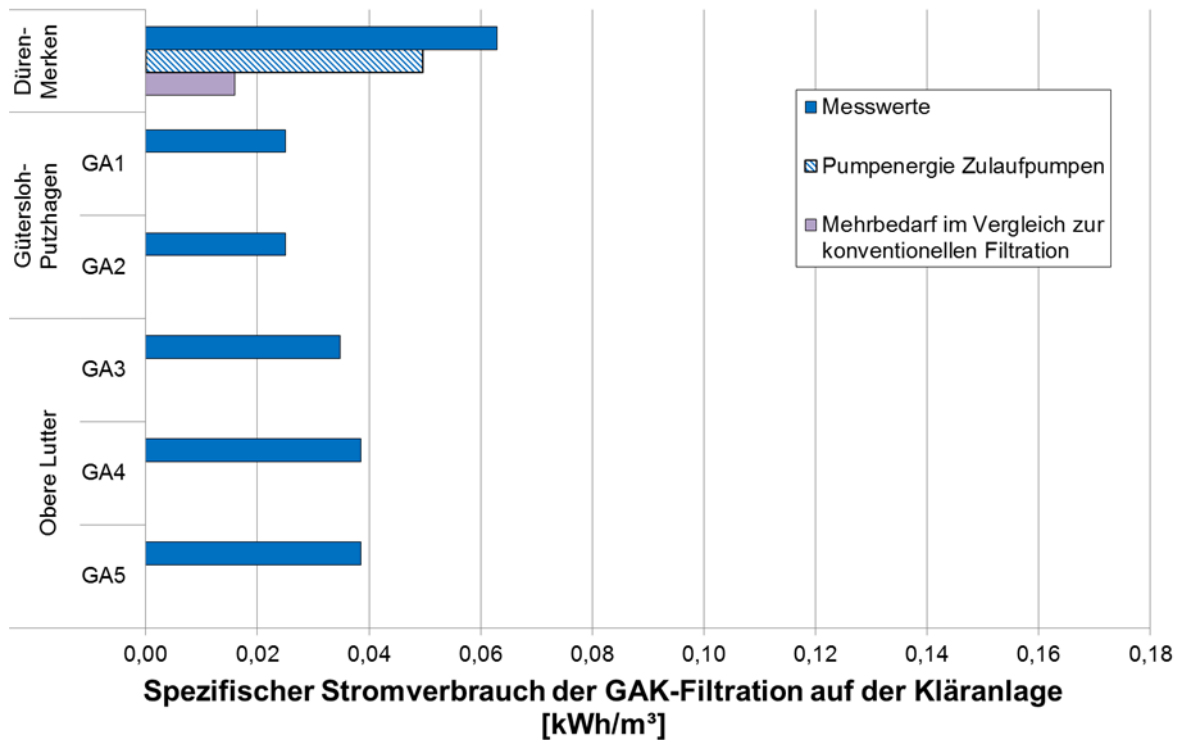


Bild 2-5: Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen GAK-Filtrationsanlagen

Bild 2-6 ist aus der ersten Phase des Projektes (Literaturwerte grün dargestellt) übernommen und um neuere Literaturdaten (gelb) sowie um die Daten der großtechnisch untersuchten Anlagen (blau) ergänzt worden.

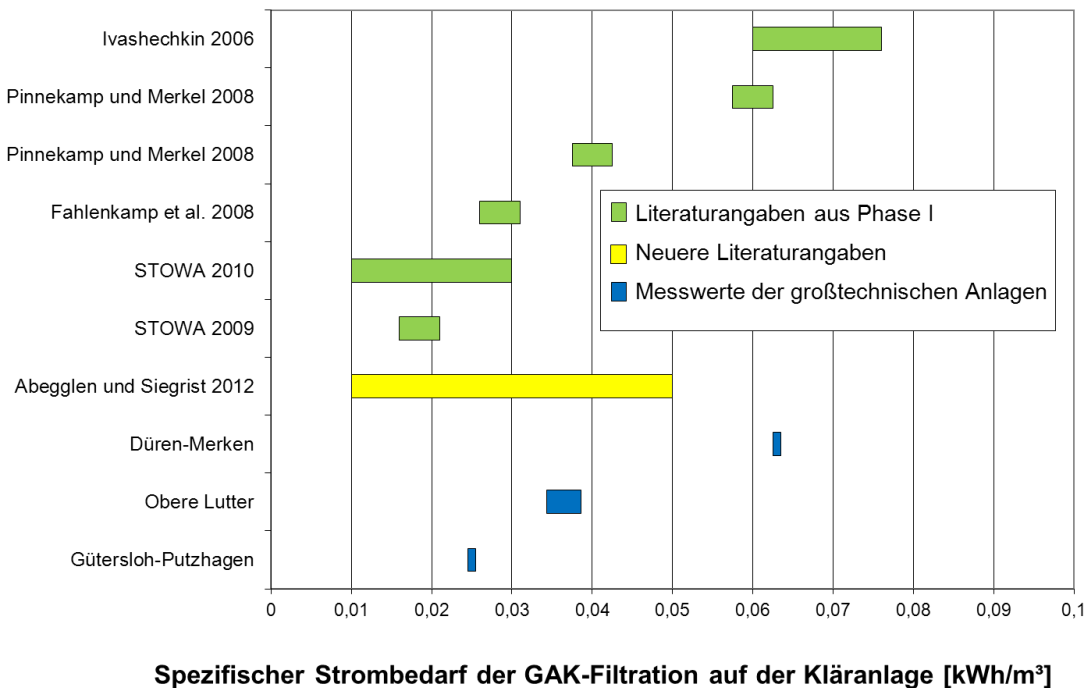


Bild 2-6: Strombedarf einer nachgeschalteten GAK-Filtration auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus den großtechnisch untersuchten Anlagen mit Literaturangaben

Die aus der Literatur zusammengetragenen Werte liegen in der Spannweite von 0,01 kWh/m³ und 0,076 kWh/m³. In ABEGGLEN UND SIEGRIST (2012) wird der Energiebedarf für GAK-Filter im Bereich von 0,01–0,05 kWh/m³, ähnlich eines Sandfilters, angegeben.

Je nach Abwasserbeschaffenheit kann Aktivkohle sich aufgrund ihrer Partikelgröße schneller mit Feststoffen zusetzen als herkömmliches Filtermaterial, was zu häufigeren Rückspülungen, wie in Düren, führen kann. Dies kann den Verbrauch im Vergleich zu konventionellen Filtern erhöhen. Wie bei den anderen Verfahren haben die Höhenunterschiede, die bei der GAK-Filtration zu überwinden sind, auch Einfluss auf den Energieverbrauch.

3 Ganzheitlicher Energiebedarf

Zusätzlich zum in Kapitel 2 betrachteten Energiebedarf auf der Kläranlage (vorwiegend elektrische Energie) wird für die Verfahren der Spurenstoffelimination auch Energie (elektrisch und thermisch) außerhalb der Kläranlage benötigt. Dieser Bedarf muss ebenfalls berücksichtigt werden, um den ganzheitlichen Energiebedarf der Verfahren abbilden zu können. So muss bei der Ozonung Flüssigsauerstoff zur Ozonherstellung produziert und angeliefert werden. Bei den adsorptiven Verfahren muss die Aktivkohle hergestellt bzw. regeneriert und angeliefert werden, wofür hauptsächlich thermische Energie benötigt wird.

Nach den Ergebnissen aus Phase I (Berechnungen für unterschiedliche Dosiermengen und Szenarien unter Berücksichtigung von Literaturquellen) machen Herstellung und Transport bei einer Ozonung 17 bis 29 %, bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken 69 bis 91 % (oder mehr, wenn der thermische Energiegewinn aus der Schlammverbrennung (Heizwert-erhöhung durch Abtrennung der PAK mit dem Schlamm) berücksichtigt wird), bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters 73 bis 92 % (oder mehr, wenn der thermische Energiegewinn aus der Schlammverbrennung berücksichtigt wird), bei Filtration über frische GAK 70 bis 95 % und bei Filtration über regenerierte GAK 40 bis 92 % des ganzheitlichen Energiebedarfs aus. Es wird deutlich, dass bei der Ozonung der größte Teil des Energiebedarfs auf der Kläranlage anfällt, wohingegen bei den adsorptiven Verfahren der größte Teil durch die Herstellung/Regeneration der Aktivkohle bedingt wird. Die Literaturangaben für die Herstellung/Regeneration der Aktivkohle liegen jedoch in unterschiedlichen Größenordnungen und sind mit Unsicherheiten verbunden.

Die Werte für den Stromverbrauch auf der Kläranlage können durch die Datenauswertung der großtechnischen Anlagen aktualisiert werden. Zudem kann eine Eingrenzung der spezifischen Dosiermengen aus Phase I aufgrund der großtechnischen Erfahrungen erfolgen. Zum besseren Vergleich der Energieformen erfolgt eine Umrechnung des Strombedarfs auf Primärenergie über den kumulierten Energieverbrauch (KEV)

(2,19 kWh_{primär}/kWh_{el} in Deutschland für den nichterneuerbaren Anteil in 2012 [IINAS, 2013]).⁴

Tabelle 3-1 fasst die ermittelten Werte für den ganzheitlichen Energiebedarf für die in Phase II eingegrenzten Dosiermengen für die Bandbreiten des minimalen und maximalen Szenarios aus Phase I zusammen. Gegenüber der Auswertung in Phase I wurde der elektrische Energiebedarf, der dem Stromverbrauch zuzuschreiben ist, auf Primärenergie umgerechnet. Dadurch erhöhen sich insbesondere die Zahlenwerte für die Ozonung, da hier der größte Teil am Energieverbrauch durch den Verbrauch elektrischer Energie bewirkt wird. Trotzdem liegen die ermittelten Werte für die Ozonung immer noch unter denjenigen der adsorptiven Verfahren. Der höchste ganzheitliche Energieverbrauch pro m³ behandeltem Abwasser ist aufgrund der hohen „Dosiermengen“ der Filtration über frische GAK zuzuordnen. Deutliche Einsparungen können durch die Verwendung von Regenerat erreicht werden. Bei der Zugabe von PAK (in ein Kontaktbecken oder in den Flockungsraum eines Filters) erfolgt ein leichter Energiegewinn durch die Schlammverbrennung, der den ganzheitlichen Energieverbrauch reduziert.

Tabelle 3-1: Spezifischer ganzheitlicher Primärenergiebedarf der unterschiedlichen Verfahren zur Spurenstoffelimination

Verfahren	Ganzheitlicher Primärenergiebedarf	Anmerkungen
Ozonung	0,07 – 0,73 kWh/m ³	2,5 – 7,5 g O ₃ /m ³
PAK (Kontaktbecken)	0,09 – 1,29 kWh/m ³	10 – 20 g PAK/m ³
		Energiegewinn aus Schlammverbrennung berücksichtigt
PAK (Flockungsfilter)	0,22 – 1,20 kWh/m ³	20 g PAK/m ³
		Energiegewinn aus Schlammverbrennung berücksichtigt
GAK (Frischkohle)	0,27 – 3,85 kWh/m ³	10 – 60 g GAK/m ³
GAK (Regenerat)	0,17 – 2,21 kWh/m ³	10 – 60 g GAK/m ³

4 CO₂-Emissionen

In Phase I wurden CO₂-Bilanzen für eine nachgeschaltete Ozonung und eine Zugabe von PAK für unterschiedliche Dosiermengen und Szenarien aufgestellt. Hierbei wurden der Energieverbrauch auf der Kläranlage, die Herstellung und der Transport der Inputstoffe sowie der Bau der Infrastruktur berücksichtigt.

Der Energieverbrauch auf der Kläranlage konnte durch die Datenauswertung großtechnischer Anlagen aktualisiert werden. Für die anderen Komponenten ergeben sich,

⁴ Für die Berechnungen wird nur der nichterneuerbare Anteil des KEV betrachtet. Bei der Aktivkohleherstellung/-regeneration ist davon auszugehen, dass rein thermische Energie benötigt wird und dass diese größtenteils mittels fossiler Brennstoffe bereitgestellt wird. Der elektrische Anteil ist vernachlässigbar bis gering und hat vor dem Hintergrund der Unsicherheit der Werte zur Herstellung/Regeneration keinen wesentlichen Einfluss (vgl. PINNEKAMP ET AL. 2011).

mit Ausnahme der Aktivkohleherstellung (siehe hierzu auch NAHRSTEDT ET AL. 2013), keine neuen Erkenntnisse.

Der aus dem Strombedarf auf der Kläranlage resultierende CO₂-Ausstoß kann mittels des CO₂-Ausstoßes des in Deutschland verwendeten Strommixes berechnet werden. In Phase I wurden hierfür 0,6 kg CO₂/kWh [UMWELTBUNDESAMT, 2010] angesetzt. Dieser Wert wird weiterhin verwendet, da die Hochrechnungen für den reinen Strominlandsverbrauch in 2012 einen Wert von 0,601 kg CO₂/kWh [UMWELTBUNDESAMT, 2013] liefern.

In Tabelle 4-1 sind die berechneten Bandbreiten der spezifischen CO₂-Emissionen pro m³ behandeltem Abwasser der Ozonung und der Zugabe von PAK für die eingegrenzten Dosiermenge sowie die ermittelten CO₂-Emissionen für die Filtration über GAK der Kläranlage Obere Lutter (siehe hierzu NAHRSTEDT ET AL. 2013) zusammengestellt. Hierbei wurden für die Ozonung und die Adsorption an PAK, wie in Phase I, die Summe der CO₂-Emissionen für den Energieverbrauch vor Ort, die Herstellung und den Transport der Inputstoffe sowie den Bau der Infrastruktur für unterschiedliche Szenarien und Dosiermengen gebildet. Bei den Werten der Kläranlage Obere Lutter handelt es sich um eine Fallstudie für die Adsorber auf dem Klärwerk.

Tabelle 4-1: Spezifische CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Verfahren zur Spurenstoffelimination

Verfahren	Spez. CO ₂ -Emissionen	Anmerkungen
Ozon (Berechnung)	0,02 – 0,20 kg CO ₂ /m ³	2,5 – 7,5 g O ₃ /m ³
PAK (Berechnung)	0,07 – 0,37 kg CO ₂ /m ³	10 – 20 g PAK/m ³
GAK (Obere Lutter, Fallstudie)	0,19 kg CO _{2e} /m ³	Reaktivat (50 g GAK/m ³ Wasser), konstante Beschickung
	0,26 kg CO _{2e} /m ³	Frischkohle (38 GAK/m ³ Wasser), konstante Beschickung
	0,33 kg CO _{2e} /m ³	Frischkohle (50 GAK/m ³ Wasser), dynamische Beschickung

Die Werte für die PAK-Adsorption liegen um einen Faktor zwei bis vier höher als für die Ozonung. Der minimale für die GAK-Filtration auf dem Klärwerk Obere Lutter berechnete Wert von 0,19 kg CO_{2e}/m³ (Reaktivat) liegt im mittleren Bereich der berechneten Werte für die PAK-Zugabe. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei der GAK-Filtration die Dosis an Aktivkohle höher ist als bei der Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken. Durch die Verwendung von Regenerat/Reaktivat können ca. 40 % der Emissionen vermieden werden, auch wenn die Kohle wegen der schlechteren Adsorptionsleistung häufiger ausgetauscht werden muss. Auch unter Berücksichtigung einer Eigenstromerzeugung von 40 % durch ein Blockheizkraftwerk in den Berechnungen für das Klärwerk Obere Lutter entfällt der maßgebliche Anteil der CO₂-Emissionen auf die Herstellung der Aktivkohle. Das höchste

⁵ Es kann hier davon ausgegangen werden, dass die CO₂-Emissionen maßgeblich sind, und andere Treibhausgase wie N₂O und CH₄ eine untergeordnete Rolle spielen, so dass die Werte für CO₂ und CO_{2e} (CO₂-Äquivalent) verglichen werden können.

Treibhausgaspotential ist der Filtration über frische GAK zuzuweisen (vgl. NAHRSTEDT ET AL., 2013). Durch Verwendung regenerierter GAK nähert sich die GAK-Filtration den Verfahren der Ozonung und der Zugabe von PAK an.

Bei der Ozonung werden nahezu die gesamten CO₂-Emissionen durch den Stromverbrauch zur Herstellung von Sauerstoff und Ozon bedingt, wohingegen der Großteil der Emissionen bei den adsorptiven Verfahren auf die Herstellung der Aktivkohle zurückzuführen ist. Die Werte für die Herstellung der Aktivkohle sind jedoch mit Unsicherheiten verbunden. Transport und Infrastruktur spielen für beide Verfahren nur eine untergeordnete Rolle. Die hier dargestellten CO₂-Emissionen beinhalten keine normierte Eliminationsleistung für Spurenstoffe.

Im Vergleich zur konventionellen Abwasserreinigung, die mit 0,145 kg CO₂/m³ (0,246 kg CO_{2e}/m³) in REMY ET AL. (2011) aufgeführt ist, erfolgt eine nennenswerte Erhöhung durch die weitergehenden Verfahren. Für eine abschließende Bewertung der Treibhausgasemissionen sind weitere Bilanzierungen und weitere belastbare Daten zur Herstellung der Aktivkohle nötig. Durch Eigenstromerzeugung aus regenerativen Energiequellen auf der Kläranlage kann die CO₂-Bilanz der Ozonung verbessert werden; energiesparendere Herstellungs- und Regenerationsprozesse für Aktivkohle können die Emissionen der adsorptiven Verfahren vermindern.

5 Modellkläranlage

5.1 Ermittlung des Energiebedarfs der Spurenstoffelimination mithilfe der Modellkläranlagen

Ziel der Anlagenmodellierung ist es, den theoretisch zu erwartenden Energiebedarf einer standardisierten Kläranlage mit Spurenstoffelimination zu ermitteln. Dazu wurden zwei Modellkläranlagen unterschiedlicher Größenordnung und Anlagenkonzipierung erstellt. Als Grundlage dafür wurden statistische Auswertungen aller Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen anhand der Unterlagen der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] und des LANUV [LANUV, 2013] ausgewertet.

Insgesamt ergeben sich daraus die Anschlussgrößen von 20.000 E (am häufigsten vorkommend) und 100.000 E (anteilig größte Abwasserreinigungsleistung) als die zu betrachtenden Modellkläranlagen.

Weiterhin werden für die Elimination von Spurenstoffen als vierte Reinigungsstufe zwei unterschiedliche Verfahren ausgewählt: die nachgeschaltete Zugabe von Pulveraktivkohle und die Ozonung, da für diese Verfahren bisher die meisten Erfahrungswerte vorliegen. Im Ablauf der vierten Reinigungsstufe wird in beiden Fällen das Wasser über einen Sandfilter gereinigt. Für die Modellkläranlage mit 100.000 E wird davon ausgegangen, dass ein Sandfilter bereits als eigene Verfahrensstufe Bestandteil der Kläranlage ist. Für die Modellkläranlage mit 20.000 E wird der Sandfilter als nicht vorhanden angesehen, sondern energetisch der vierten Reinigungsstufe zugeordnet. Es werden somit folgende Modellkläranlagen hinsichtlich ihres Energiebedarfs betrachtet:

- 20.000 E, Filtration zugehörig zur vierten Reinigungsstufe
 - mit Pulveraktivkohle (Rezirkulation in das Belebungsbecken und Filtration): 10 g/m³ PAK
 - mit Ozonung: 5 O₃/m³
- 100.000 E, Filtration als bereits existierende Verfahrensstufe
 - mit Pulveraktivkohle (Sedimentationsbecken und Filtration): 10 g/m³ PAK
 - mit Ozonung: 5 O₃/m³

Für die Berechnung des Energiebedarfs der einzelnen Verfahrensstufen und Verbraucher wurde das Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] und die neueren Angaben des DWA Arbeitsblatts A 216 [DWA-A 216, 2013] herangezogen. Unabhängig davon welches Verfahren als vierte Reinigungsstufe gewählt wird, sind in der Ermittlung des Energiebedarfs nur die elektrischen Verbraucher berücksichtigt, die auch direkt auf dem Klärwerk angeordnet sind.

In Tabelle 5-1 ist die 100.000 E Modellkläranlage mit einer PAK-Zugabe bzw. einer Ozonung dargestellt.

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der 100.000 E Modellkläranlagen mit PAK und Ozonung

100.000 E Verbraucher	PAK		OZONUNG	
	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m ³]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m ³]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]
Zulaufhebwerk	14,86	1,33	14,86	1,33
Rechen	0,84	0,08	0,84	0,08
Sandfang	7,20	0,64	7,20	0,64
Vorklärung einschl. PS Pumpwerk	1,75	0,16	1,75	0,16
Belüftung BB	115,35	10,3	115,3	10,3
Rührwerke	21,27	1,90	21,27	1,90
RLS Pumpwerk	5,84	0,52	5,84	0,52
Rezipumpe	5,84	0,52	5,84	0,52
Nachklärung inkl. ÜSS PW	1,60	0,14	1,59	0,14
Fällmittelzugabe	0,50	0,04	0,50	0,04
Voreindickung	9,79	0,78	9,66	0,77
Stabilisierung	18,00	1,53	17,14	1,46
Entwässerung	12,86	1,15	12,24	1,10
Flockungsfilter	22,40	2,00	22,40	2,00
4. Reinigungsstufe	45,00	2,87*	105,00	6,71*
Infrastruktur	17,67	1,59	17,67	1,59
Summe:	300,75	25,58	359,15	29,28
* bezogen auf Trockenwetterzulauf				

In Summe ist der Energiebedarf der Modellkläranlage mit Ozonung als vierte Reinigungsstufe um ca. 20 % (ca. 59 Wh/m³ bzw. ca. 4 kWh/(E·a)) höher als der Energiebedarf der Modellkläranlage mit Pulveraktivkohle. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Festlegung der Systemgrenzen, unter denen der Energiebedarf der Modellkläranlagen bestimmt wird.

Bei der Betrachtung der einzelnen Verfahrensstufen beider 100.000 E-Modellkläranlagen ist der Einfluss der rezirkulierten Pulveraktivkohle im Bereich der auf die Schlammbehandlung zurückzuführenden Verbraucher erkennbar. Durch die Rückführung der PAK in die Belebung

erhöht sich die Menge an Überschussschlamm. Dies wirkt sich auf alle Aggregate aus, deren Energiebedarf in direkter Abhängigkeit zur Schlammmenge bestimmt wird, allerdings nur in sehr geringem Umfang.

Die Flockungsfiltration, die als eigene Verfahrensstufe betrachtet wird, weist in beiden 100.000 E Anlagen, unabhängig von der vierten Reinigungsstufe, den gleichen Energiebedarf auf.

Abschließend wird die Modellkläranlage 20.000 E mit Ozonung der Modellkläranlage mit PAK gegenübergestellt. Die Energieverbräuche sind in nachfolgender Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der 20.000 E Modellkläranlagen mit PAK und Ozonung

20.000 E Verbraucher	PAK		OZONUNG	
	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m ³]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m ³]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]
Zulaufnebewerk	14,86	1,40	14,86	1,40
Rechen	0,80	0,08	0,80	0,08
Sandfang	9,05	0,85	9,05	0,85
Belüftung BB	158,73	14,92	158,73	14,92
Rührwerke	22,63	2,13	22,63	2,13
RLS Pumpwerk	5,84	0,55	5,84	0,55
Rezipumpe	5,84	0,55	5,84	0,55
Nachklärung inkl. ÜSS PW	2,39	0,22	2,39	0,22
Fällmittelzugabe	0,50	0,05	0,50	0,05
Entwässerung	12,23	1,15	11,65	1,10
4. Reinigungsstufe	62,40	4,27*	127,40	8,72*
Infrastruktur	16,92	1,59	16,92	1,59
Summe:	312,18	27,75	376,60	32,14
*bezogen auf Trockenwetterzulauf				

Erwartungsgemäß weist auch hier die Modellkläranlage mit Ozonung einen höheren Energiebedarf (32,14 kWh/(E·a)) auf als die Modellkläranlage mit Pulveraktivkohle (27,75 kWh/(E·a)). Insgesamt benötigt die Anlage mit Ozonung ca. 64 Wh/m³ bzw. 4,4 kWh/(E·a) mehr Energie als die Vergleichsanlage mit PAK. Der Einfluss des Sandfilters ist nicht separat aufgelistet, da er hier als Bestandteil der vierten Reinigungsstufe zugeordnet wird.

Für die 100.000 E Modellkläranlage mit vorhandener Filtration ergibt sich durch die Einführung einer PAK-Stufe mit Sedimentation eine Steigerung des Energiebedarfs um ca. 18 %, durch die Einführung einer Ozonung eine Steigerung um ca. 41 %. Für die 20.000 E Modellkläranlage ohne bereits vorhandene Filtration ergibt sich durch die Einführung einer PAK-Stufe + Filtration eine Steigerung des Energiebedarfs um ca. 25 %, durch die Einführung einer Ozonung + Filtration eine Steigerung um ca. ca. 50 %.

Die dargestellten ermittelten Idealwerte für die zwei Modellkläranlagengrößen (20.000 E und 100.000 E) mit den beiden unterschiedlichen Reinigungsverfahren (PAK und Ozon) müssen immer in Zusammenhang mit den hier angenommen Ausgangsdaten gesehen werden. Sie sind Ergebnis einer konkret und differenziert ausgelegten Modellkläranlage und können nicht beliebig mit bestehenden Anlagen anderer Konfigurationen verglichen werden.

Um den theoretischen Energiebedarf einer Kläranlage (inkl. vierter Reinigungsstufe) zu erhalten, müssen Anlagenbetreiber alle ihnen verfügbaren anlagenspezifischen Randbedingungen wie Wassermengen, Förderhöhen, Beckengrößen, Einwohnerzahlen etc. in die Berechnungstabellen der Modellkläranlage einsetzen. Somit kann dann ein individuell theoretischer Bedarf errechnet bzw. abgeschätzt werden. Die Energiebedarfswerte der Modellkläranlagen können aber in keinem Fall als verallgemeinert zutreffende Richtwerte angesehen werden. Vielmehr stellen die Berechnungstabellen das nötige Werkzeug für Anlagenbetreiber dar, um mit ihren Daten eine Abschätzung des zu erwartenden Energiebedarfs für die gegebene Ausgangslage zu erhalten.

5.2 Wesentliche Einflussfaktoren auf den Energiebedarf von Anlagen zur Spurenstoffelimination

Wenn Betreiber von Kläranlagen zwischen den diversen Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen abwägen, müssen verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Bei der Ozonung gibt die Erzeugung der eingesetzten Dosis den wesentlichen Ausschlag auf den Energiebedarf. Durch eine effektive Vorreinigung in der vorgeschalteten Kläranlage, die möglichst niedrige DOC-Werte im Zulauf zur Ozonung bewirkt, kann eine geringe, auf den DOC bezogene, Ozondosis appliziert werden. Weitere Einflussfaktoren bei der Ozonung sind die Auslegungsgröße des Generators (welcher effizienter ist, wenn er im Bereich der Auslegungsgröße betrieben wird) sowie die Art des Ozoneintrags (Diffusor, Injektor) und der Generatorkühlung. Die Wahl der Nachbehandlung (z. B. Sandfilter, Schönungsteich) hat ebenfalls einen Einfluss auf den Energieverbrauch.

Bei der Adsorption an PAK übt die Dosis keinen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch aus. Bei der Adsorption an PAK durch Zugabe in ein Kontaktbecken wird die Kohle in den hier vorgestellten Beispielen (Mannheim, Böblingen-Sindelfingen, Kressbronn-Langenargen) mittels einer Kombination aus Sedimentation und Flockungsfiltration aus dem Abwasser entfernt. BORNEMANN ET AL. (2012) führen jedoch Alternativen zur Abscheidung der PAK (z. B. Tuchfilter, Mikrosieb) auf, deren Einfluss auf den Energiebedarf im Falle einer Zuordnung dieser Stufe zur Spurenstoffelimination zu berücksichtigen ist.

Bei der Filtration über GAK wird der Energiebedarf auf der Kläranlage durch die Anzahl der Rückspülungen beeinflusst. Durch einen effizienten Rückhalt an Feststoffen in der vorgeschalteten Kläranlage können diese möglichst gering gehalten werden. Sollte hierfür eigens eine Vorfiltration implementiert werden, wäre diese energetisch zu berücksichtigen. (vgl. auch PINNEKAMP ET AL., 2011)

Da die Pulveraktivkohle und die granulierte Aktivkohle nicht auf dem Gelände der Kläranlage erzeugt werden, entfällt dieser wesentliche Einflussfaktor für den Energieverbrauch des Verfahrens auf der Kläranlage. Der Energieverbrauch zur Herstellung der Aktivkohle und ggf. zur Reaktivierung der GAK wird über die Betriebsmittelkosten berücksichtigt.

Unabhängig vom gewählten Verfahren ist der Energiebedarf, der für die Pumpenergie aufgewendet werden muss, um das Wasser auf Anlagenniveau zu heben, zu

berücksichtigen. Dieser Energiebedarf ist anlagenspezifisch und kann somit nur bei der Planung des Aufstellortes der Anlage beziffert werden.

6 Zusammenfassende Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination

6.1 Spurenstoffelimination

Ergebnisse zur Spurenstoffelimination auf den betrachteten Kläranlagen sind in den entsprechenden Kapiteln des Langberichtes aufgeführt, zudem wird auf die weitergehende Literatur hierzu verwiesen. Vor dem Hintergrund einer bisher nicht vorgegebenen Zielelimination/-konzentration für definierte Spurenstoffe kann kein unmittelbarer Vergleich zwischen den Verfahren gezogen werden, da die Verfahren für einzelne Spurenstoffe zum Teil stark unterschiedliche Eignungen aufweisen.

Bei den untersuchten Kläranlagen führten Dosiermengen von 5 g O₃/m³ und 10 g PAK/m³ in der Regel zu zufriedenstellenden Eliminationsleistungen. Insbesondere die Effektivität der Ozonung ist jedoch von der organischen Hintergrundbelastung des Abwassers abhängig. So werden in ARGE (2014) die in Tabelle 6-1 aufgeführten Dosierstufen für die Verfahren der Ozonung und der Adsorption an PAK in einem Kontaktbecken festgehalten. Die Dosierstufen für Ozon aus Tabelle 6-1 entsprechen für den DOC der hier untersuchten Kläranlagen mit Ozonstufe den applizierten Dosiermengen von 2 – 7 g O₃/m³. Bei den Dosierstufen für die PAK-Adsorption muss beachtet werden, dass in Tabelle 6-1 der Sonderfall des Rezirkulationsbetriebes, wie er auf der KA Schwerte stattfindet, betrachtet wird. Bei einer nachgeschalteten PAK-Adsorption durchläuft das Abwasser nur einmal die Adsorptionsstufe, so dass dort eine höhere Dosiermenge (i.d.R. zwischen 10 und 20 g/m³) als sinnvoll erachtet wird.

Tabelle 6-1: Dosierstufen nach ARGE (2014)

	Ozonung	PAK-Adsorption (Rezi)
Basisdosierung	$z_{\text{spez.}} = 0,3 - 0,5 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$	$c_{\text{PAK}} = 5 \text{ g PAK}/\text{m}^3$
Mittlere Dosierung	$z_{\text{spez.}} = 0,6 - 0,8 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$	$c_{\text{PAK}} = 10 \text{ g PAK}/\text{m}^3$
Hochdosierung	$z_{\text{spez.}} = 0,8 - 1,2 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$	$c_{\text{PAK}} = 15 \text{ g PAK}/\text{m}^3$

Die in ARGE (2014) eingeführten Dosierstufen zeichnen sich dadurch aus, dass bei der Basisdosierung bei den meisten Spurenstoffen eine signifikante Eliminationsleistung (> 50 %) erzielt wird. Die mittlere Dosierung führt bei weiteren einzelnen Spurenstoffen zu hohen Eliminationsleistungen von bis zu rund 80 %. Bei der Hochdosierung werden stoff- und verfahrensspezifisch noch weitergehende Eliminationen erreicht, die jedoch mit einem erhöhten Aufwand einhergehen. [ARGE, 2014]

Bei der Filtration über GAK kann eine Dosiermenge nur durch Verrechnung der eingesetzten GAK-Masse mit den Bettvolumina, die auf das Aktivkohlevolumen bezogene durchgesetzte Wassermenge, angegeben werden. Je nach gewähltem Abbruchkriterium und gewählter

Kontaktzeit im Filter können Unterschiede in der Standzeit eines GAK-Filters mehrere Monate betragen. Der Rückhalt an Spurenstoffen nimmt während der Laufzeit ab. Bei der frischen Aktivkohle auf dem Klärwerk Obere Lutter werden für beide Stoffe nach 10.000 Bettvolumina noch Eliminationsgrade von ca. 90 % verzeichnet [NAHRSTEDT ET AL., 2013]. Die Umrechnung der betrachteten Standzeiten in Gütersloh-Putzhagen und auf dem Klärwerk Obere Lutter auf Dosiermengen passt zu den in Phase I betrachteten höheren Dosiermengen für die GAK von 30 bis 60 g GAK/m³.

Die untersuchten Verfahren der Ozonung, der Zugabe von PAK und der Filtration über GAK sind bei geeigneten Randbedingungen, wie einem möglichst geringen Anteil an Feststoffen und einer effizienten biologischen Vorreinigung, für die Spurenstoffelimination auf Kläranlagen geeignet. Der flexiblen Dosiermöglichkeit der Verfahren der Ozonung und der Adsorption an PAK steht die relativ einfach realisierbare Umrüstung auf GAK in einer existierenden Filterzelle gegenüber. Allerdings ist aktuell keins der Verfahren in der Lage, die gesamte Bandbreite der in den unterschiedlichen Projekten untersuchten Spurenstoffe gänzlich aus dem Abwasser zu entfernen. Vor diesem Hintergrund kann hinsichtlich der Elimination von Spurenstoffen ohne Betrachtung der örtlichen Randbedingungen keine eindeutige Empfehlung für ein Verfahren gegeben werden. Aus diesem Grund geht in die aktualisierte Bewertungstabelle (Tabelle 6-2) keine erzielbare Spurenstoffelimination ein.

6.2 Energieverbrauch auf der Kläranlage

Die ausgewerteten Daten für die **Ozonung** in Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden liegen im Bereich von ca. 0,04 kWh_{el}/m³ bis ca. 0,17 kWh_{el}/m³ behandeltem Abwasser. Die Umrechnung auf Primärenergie (PE) (aus nicht erneuerbaren Quellen) führt hier zu Werten von 0,09 kWh/m³ bis ca. 0,37 kWh/m³. Für die unterschiedlichen Anlagen kann der Energiebedarf von Förderpumpen mehr als 50 % des Gesamtverbrauchs ausmachen. Die hiermit korrespondierenden Dosiermengen bewegen sich im Bereich von 2 bis 7 g O₃/m³. Nachbehandlungen zum Abbau von Transformationsprodukten wurden bei den betrachteten Anlagen nicht berücksichtigt. Der spezifische Energieverbrauch der gewählten Konfiguration für die Ozonung in den Modellkläranlagen⁶ von 0,11 kWh_{el}/m³ für 100.000 E bzw. von 0,13 kWh_{el}/m³ für 20.000 E (höherer Verbrauch durch Mitbetrachtung Filtration (als biologische Nachbehandlung) für die weitergehende Reinigungsstufe) bei einer Zugabe von 5 g/m³ Ozon liegt in ähnlichen Bereichen.

Die für die ausgewerteten PAK-Anlagen ermittelten Werte liegen zwischen ca. 0,02 und 0,08 kWh_{el}/m³ behandeltem Abwasser bei Dosiermengen zwischen 5 und 20 g PAK/m³ (auch 40 g PAK/m³ in Wuppertal). Der Primärenergiebedarf entspricht hierbei 0,04 bis 0,18 kWh/m³. Der zusätzliche Energieverbrauch einer **PAK-Adsorptionsstufe** kann im Bereich von 0,025 bis 0,035 kWh_{el}/m³ festgehalten werden. Die abschließende Filtration/PAK-Abtrennung erhöht den Verbrauch um 0,01 bis 0,05 kWh_{el}/m³ (PE: 0,02 bis 0,11 kWh/m³), ist auf einigen Kläranlagen jedoch bereits zur Suspensa-Entnahme in Betrieb.

⁶ Die genaue Konfiguration der Modellkläranlage ist in der Langfassung erörtert und basiert auf mittleren Angaben aus Phase I für die einzelnen Verfahrensschritte.

Eventuell zu überwindende Förderhöhen erhöhen den Strombedarf. Die Werte aus der Modellkläranlage für 10 g/m³ PAK liegen bei 0,05 kWh_{el}/m³ für 100.000 E bzw. bei 0,06 kWh_{el}/m³ für 20.000 E (die Filtration wird hier mit berücksichtigt) und passen sehr gut mit den Auswertungen der Messwerte an den großtechnischen Anlagen zusammen. Bei den Anlagen mit PAK-Dosierung ist von einem leichten Energiegewinn im Falle einer Schlammverbrennung auszugehen; dieser wurde bei den untersuchten Anlagen jedoch nicht quantifiziert. Der zusätzliche Energiebedarf der Schlammbehandlung durch die erhöhte Schlammmenge ist als sehr gering einzuschätzen.

Die sich für die Anlagen mit **GAK-Filtration** ergebenden Werte liegen zwischen ca. 0,02 und 0,06 kWh_{el}/m³ behandeltem Abwasser (PE: 0,04 bis 0,13 kWh/m³). Im Vergleich zu einer konventionellen Filtration wird ein geringer Anstieg durch die Umrüstung festgestellt oder gar ein leicht geringerer Verbrauch als für die konventionelle Filtration notiert.

Der Energieverbrauch auf der Kläranlage ist für die Ozonung deutlich höher als für die adsorptiven Verfahren der Zugabe von PAK und der Filtration über GAK, was hauptsächlich auf die energieintensive Ozonproduktion vor Ort zurückzuführen ist.

Bei allen betrachteten Verfahren muss darauf geachtet werden, ob bereits vor der Umrüstung auf Spurenstoffelimination eine **Filtration** in Betrieb war. Dies ist entscheidend dafür, ob der Strombedarf zum Betrieb der Filtration (biologische Nachbehandlung bei der Ozonung, Kohlerückhalt bei der PAK-Adsorption, Filter für die GAK-Filtration) der Spurenstoffelimination oder der konventionellen Abwasserreinigung zuzuschreiben ist.

Der Bezug auf **Einwohnerwerte** kann nur kläranlagenspezifisch hergestellt werden. Für die Anlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden wird der Bezug über CSB-Frachten in den entsprechenden Kapiteln zum Energiebedarf im Langbericht erläutert. Bei den Modellkläranlagen erfolgt der Bezug auf Einwohnerwerte über den Trockenwetterzufluss, da hier davon ausgegangen wird, dass die Auslegung auf diesen erfolgt.

Eine verallgemeinerte Aussage zum relativen Anstieg des Energieverbrauchs der Kläranlage aufgrund einer vierten Reinigungsstufe ist nicht möglich, da immer der jeweilige Energieverbrauch der bestehenden Kläranlage zu berücksichtigen ist. So kann ein prozentual höherer Anstieg bei Kläranlagen mit einem verhältnismäßig niedrigen Energieverbrauch zu immer noch niedrigeren Gesamtverbräuchen führen als auf, aus energetischem Aspekt, schlechter abschneidenden Kläranlagen.

6.3 Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage

Zur ganzheitlichen energetischen Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination muss neben dem Verbrauch auf der Kläranlage auch der Verbrauch außerhalb der Kläranlage berücksichtigt werden. Die Summierung beider Bedarfsmengen wurde in Kapitel 3 erörtert, an dieser Stelle wird nur der Verbrauch außerhalb der Kläranlage betrachtet. Der Hauptanteil des Energiebedarfs außerhalb der Kläranlage für die **Ozonung** ist auf die Herstellung von Flüssigsauerstoff zurückzuführen. Umgerechnet auf den nicht regenerativen Anteil an Primärenergie, beträgt der mittlere Energiebedarf für die Sauerstoffbereitstellung zwischen

0,03 und 0,09 kWh/m³ behandeltem Abwasser für Dosiermengen zwischen 2,5 und 7,5 g O₃/m³. Dem Sauerstofftransport kommt nur eine untergeordnete Rolle zu.

Der Hauptanteil am Energiebedarf für die Zugabe von **PAK** ist auf die Aktivierung der Kohle zurückzuführen. Hierfür wird überwiegend thermische Energie genutzt, die an dieser Stelle als primäre Energie betrachtet wird. Der primäre Energiebedarf für die Bereitstellung der PAK liegt beim mittleren Szenario für Dosiermengen zwischen 10 und 20 g PAK/m³ zwischen 0,36 und 0,72 kWh/m³. Dem Aktivkohletransport kommt, wie dem Sauerstofftransport bei der Ozonung, nur eine untergeordnete Rolle zu. Diese Aussagen treffen gleichermaßen für die Zugabe in ein Kontaktbecken sowie in den Flockungsraum eines Filters zu.

Für die Filtration über **GAK** ist ebenfalls die (vorwiegend) thermische Energie für die Herstellung der Kohle maßgeblich für den Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage. Es muss hierbei zwischen dem Energieaufwand für die Bereitstellung von Frischkohle und für die Bereitstellung von Regenerat/Reaktivat unterschieden werden. Bei der Bereitstellung von frischer GAK beläuft sich der Energieverbrauch bei mittleren Annahmen auf 0,36 (bei einer Annahme von 10 g GAK/m³, also sehr hohen Bettvolumina) bis 2,15 kWh/m³ (bei 60 g GAK/m³). Bei der Verwendung von Aktivkohle-Regenerat/Reaktivat können durch die Einsparung von Frischkohle bei mittleren Annahmen Werte zwischen 0,17 (bei 10 g GAK/m³) bis 1,01 kWh/m³ (bei 60 g GAK/m³) angesetzt werden. Durch die Verwendung von Regenerat/Reaktivat kann demnach mit diesen Annahmen etwa die Hälfte an Energie eingespart werden.

Der Energiebedarf außerhalb der Kläranlage erhöht den gesamten Energiebedarf der Verfahren, insbesondere für die Herstellung und Regeneration von Aktivkohle. Die Werte für die Bereitstellungsenergie der Kohle sind mit großen Unsicherheiten verbunden. Die dem hier betrachteten mittleren Szenario zu Grunde liegenden Bandbreiten für den minimalen und maximalen Ansatz divergieren sehr stark (siehe hierzu PINNEKAMP ET AL., 2011).

Der Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage kann für die Sauerstoffherstellung durch energieeffiziente Herstellung gering gehalten werden. Durch eine effiziente Bereitstellung von Energie und Rohstoffen für die Herstellung/Regeneration der Aktivkohle kann der Energieaufwand reduziert werden. Diese Aspekte sind jedoch durch den Kläranlagenbetreiber schwer zu kontrollieren, spiegeln sich aber ggf. im Preis der Betriebsmittel wider.

6.4 CO₂-Emissionen

Die ermittelten spezifischen CO₂-Emissionen sind in Tabelle 4-1 aufgeführt (Berechnung für Ozonung und Adsorption an PAK, Fallbeispiel für GAK) und erläutert. Es wurde eine deutliche Erhöhung im Vergleich zur konventionellen Abwasserreinigung durch alle Verfahren festgestellt. Die Werte sind mit großen Spannweiten verbunden und liegen für die adsorptiven Verfahren im Allgemeinen höher als für die Ozonung.

Transport und Infrastruktur spielen für alle Verfahren nur eine untergeordnete Rolle. Die CO₂-Emissionen können sich in Abhängigkeit der zu überwindenden Förderhöhen auf der Kläranlage erhöhen. Bei der Ozonung wird nahezu die gesamte CO₂-Emission durch den Stromverbrauch zur Herstellung von Sauerstoff und Ozon bedingt. Bei den adsorptiven

Verfahren resultiert der Großteil aus der Herstellung der Aktivkohle. Die Werte für die Herstellung und Regeneration der Aktivkohle sind jedoch mit Unsicherheiten verbunden und es besteht weiterer Bedarf an Forschung und CO₂-Bilanzen.

Durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger kann der Anteil an nicht erneuerbarer Energie für den Strombedarf der Sauerstoff- und Ozonherstellung verringert werden. Für die Herstellung (Aktivierung/Regeneration) der Aktivkohle können durch das Zurückgreifen auf sekundäre Brennstoffe für die Bereitstellung der notwendigen hohen Temperaturen CO₂-Emissionen vermieden werden. Die Verwendung von Aktivkohle aus nachwachsbaren Rohstoffen kann ebenfalls zu Einsparungen der CO₂-Emissionen führen. Dies ist jedoch erst machbar, wenn Ergebnisse zur Praktikabilität und Effizienz der Anwendung solcher Kohlen zur Spurenstoffelimination vorliegen.

6.5 Bewertungstabelle

Die Ergebnisse aus den zehn ausgewerteten großtechnischen Anlagen ermöglichen eine Aktualisierung der Bewertung aus der ersten Projektphase, wie in Tabelle 6-2 für die drei untersuchten Verfahren Ozonung, PAK-Adsorption und GAK-Filtration tabellarisch dargestellt ist. Bei der Filtration über GAK wird zusätzlich zwischen Verwendung von Frischkohle und Regenerat/Reaktivat unterschieden.

Für die nachgeschaltete Ozonung werden die Dosiermengen aus Phase I auf 2 bis 7 g O₃/m³ (2,5 bis 7,5 g O₃/m³ für die Berechnungen für Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage und CO₂-Emissionen)⁷ und für die nachgeschaltete PAK-Adsorption auf 10 bis 20 g PAK/m³ eingegrenzt. Bei der GAK-Filtration kann keine Eingrenzung erfolgen, so dass weiterhin äquivalente Dosiermengen von 10 bis 60 g GAK/m³ betrachtet werden.

Für die drei Kategorien Energieverbrauch auf der Kläranlage, Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage und CO₂-Emissionen sind die Haupteckdaten aus der zweiten Projektphase aufgeführt. Für den Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage und die CO₂-Emissionen ist an dieser Stelle lediglich das mittlere Szenario aufgeführt. Der Energiebedarf für die Filtration zum Rückhalt der PAK ist gesondert aufgeführt, da Kläranlagen zum Teil schon über eine solche Stufe verfügen und deren Energiebedarf dann nicht zwangsläufig der weitergehenden Reinigungsstufe zuzuordnen ist. Zudem wird für die PAK beim Energiebedarf auf der Kläranlage zwischen einer nachgeschalteten Zugabe und dem Rezirkulationsbetrieb unterschieden. Für das Verfahren der Ozonung wird beim Energieverbrauch auf der Kläranlage zusätzlich zu den Werten der großtechnischen Anlagen die biologische Nachbehandlung aufgeführt.

Die Ergebnisse bestätigen die Hauptaussage aus Phase I, dass die Ozonung zwar den höchsten Mehrbedarf an Energie auf der Kläranlage mit sich bringt, jedoch der Energiebedarf außerhalb der Kläranlage (auch auf Primärenergie bezogen) grundsätzlich unterhalb dem der adsorptiven Verfahren liegt. Der ermittelte ganzheitliche Energiebedarf der Ozonung ist weiterhin geringer als der der adsorptiven Verfahren. Bei der Ozonung fällt der

⁷ Zur Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus Phase I werden weiterhin die Dosiermengen 2,5, 5 und 7,5 g O₃/m³ betrachtet, die in Phase I als Grundlage für die unterschiedlichen Szenarien dienen.

ganzheitliche Energiebedarf im Wesentlichen nur in Form von elektrischer Energie an. Bei den adsorptiven Verfahren muss hingegen, zusätzlich zu dem auf der Kläranlage anfallenden Bedarf an elektrischer Energie, bei der ganzheitlichen Betrachtung die thermische Energie in Form von Wärme zur Herstellung/Reaktivierung der Kohle berücksichtigt werden. Die Belastbarkeit der verfügbaren Werte für die Aktivkohleherstellung/-Regeneration ist jedoch auch weiterhin zu hinterfragen. Sollte sich die Verwendung regenerierter/reaktiver GAK als geeignet für zukünftige Zielelimination/-konzentrationen erweisen (ausreichende Filterstandzeiten), ist die Verwendung von Regeneraten/Reaktivaten gegenüber dem Einsatz von Frischkohle deutlich vorteilhafter. Die Zugabe von PAK in eine Adsorptionsstufe (oder in den Flockungsraum eines Filters) stellt aufgrund der flexiblen Dosiermöglichkeiten auch bei einem hohen Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage eine verfahrenstechnisch interessante Variante dar. Für die Ozonung wird der Energieverbrauch auf der Kläranlage noch ggf. durch die, bei den hier untersuchten großtechnischen Anlagen nicht mit ausgewertete, biologische Nachbehandlung erhöht. Je nachdem welche Zielwerte für welche Stoffe in Zukunft festgelegt werden, können sich die hier getroffenen Aussagen jedoch ändern.

Tabelle 6-2: Zusammenfassende energetische Bewertung der Verfahren zur Spurenstoff-elimination

Verfahren	Kriterium	
Ozonung 2 – 7 g O ₃ /m ³	Energiebedarf auf der Kläranlage	
	Ozonung: Messwerte: 0,04 – 0,17 kWh _{el} /m ³ (PE: 0,09 – 0,37 kWh/m ³) Energieintensive Ozonerzeugung ; zum Teil hoher Anteil an Pumpenergie	
	Nachbehandlung zum Rückhalt/Abbau entstehender Transformationsprodukte erhöht je nach Verfahren den Strombedarf um 0 – 0,05 kWh _{el} /m ³ (PE: 0 – 0,11 kWh/m ³) (Literaturwerte)	
	Energiebedarf außerhalb der Kläranlage*	
	Strombedarf Sauerstoffbereitstellung : PE: 0,03 – 0,09 kWh/m ³ (Berechnungen basierend auf mittleren Annahmen für 2,5 – 7,5 g O ₃ /m ³)	
	CO₂-Emissionen	
	Größtenteils durch Strombedarf bedingt: 0,06 – 0,13 kg CO ₂ /m ³ (Berechnungen basierend auf mittleren Annahmen für 2,5 – 7,5 g O ₃ /m ³) Einsparpotential durch Nutzung regenerativer Energien zur Stromerzeugung	
Adsorption an PAK 10 – 20 g PAK/m ³	Energiebedarf auf der Kläranlage	
	Variante „nachgeschaltete Zugabe“: Adsorption : 0,025 – 0,035 kWh _{el} /m ³ (PE: 0,05 – 0,08 kWh/m ³) (Messwerte) Filtration zum Kohlerückhalt (ggf. bereits vorhanden): 0,01 – 0,05 kWh _{el} /m ³ (PE: 0,02 – 0,11 kWh/m ³) (Messwert, Literaturangaben)	
	Variante „Rezirkulationsbetrieb“: Messwerte: 0,08 kWh _{el} /m ³ (PE: 0,18 kWh/m ³), hoher Anteil an Pumpenergie	
	Leichter Energiegewinn bei Schlammverbrennung möglich	
	Energiebedarf außerhalb der Kläranlage*	
	Hoher Input an thermischer Energie zur Aktivierung der Kohle: PE: 0,36 – 0,72 kWh/m ³ (Berechnungen, mittlere Annahmen) Werte mit hohen Unsicherheiten verbunden	
	Fehlende Möglichkeit der Regeneration/Reaktivierung der PAK	
	CO₂-Emissionen	
	Hoch da vorwiegend Nutzung thermischer Energie aus fossilen Energieträgern zur Aktivierung der Kohle: 0,15 – 0,24 kg CO ₂ /m ³ (Berechnungen basierend auf mittleren Annahmen) Möglichkeit der Einbindung sekundärer Roh- und Brennstoffe	
Filtration über GAK 10 – 60 g GAK/m ³ , abhängig von BVT	Energiebedarf auf der Kläranlage	
	Geringe Erhöhung des Strombedarfs (Filtration ggf. bereits vorhanden): 0,02 – 0,06 kWh _{el} /m ³ inkl. Filtration (PE: 0,04 – 0,13 kWh/m ³) (Messwerte)	
	Frischkohle	Regenerat/Reaktiv
	Energiebedarf außerhalb der Kläranlage*	
	PE: 0,36 – 2,15 kWh/m ³ (Berechnungen mit mittleren Annahmen)	PE: 0,17 – 1,01 kWh/m ³ (Berechnungen mit mittleren Annahmen) Deutliche Einsparungen durch Nutzung von Regenerat/Reaktiv
	CO₂-Emissionen	
	0,26 kg CO _{2e} /m ³ (Fallbeispiel)	0,19 kg CO _{2e} /m ³ (Fallbeispiel)
	Hoher Input an thermischer Energie aus fossilen Brennstoffen Werte mit großen Unsicherheiten verbunden Möglichkeit der Einbindung sekundärer Roh- und Brennstoffe	

*keine Betrachtung des Transports der Inputstoffe

6.6 Empfehlungen für Planung und Betrieb von Anlagen zur Spurenstoffelimination

Ein Aspekt, der bei der Planung einer Anlage zur Spurenstoffelimination zu berücksichtigen ist, ist die zu behandelnde Abwassermenge. Oft ist eine Teilstrombehandlung ausreichend (vgl. auch ARGE (2014)).

Durch ein sorgfältiges Screening unterschiedlicher Spurenstoffe und Standardparameter kann die Verfahrensauswahl erleichtert werden. Als nützlich sind auch Voruntersuchungen und Machbarkeitsstudien anzusehen. Weiterhin ist die Nutzung bestehender Bauwerke und Anlagenteile zu überprüfen und der Platzbedarf der jeweiligen Verfahren zu berücksichtigen.

Die Ozonmenge sollte in Abhängigkeit des DOC und der aktuellen Abwassermenge gesteuert werden, um den zusätzlichen Energieverbrauch einer Ozonung auf der Kläranlage so gering wie möglich zu halten. Die Anlage ist auf eine ausreichende Kontaktzeit zwischen Wasser und Gas auszulegen und ein Austrag des Ozons mit der Gasphase ist zu vermeiden. Für weitere planerische Hinweise wird auf ARGE (2014) verwiesen. Grundsätzlich sollte der Generator im Bereich seiner Auslegungsgröße genutzt werden, um energetisch optimal betrieben zu werden.

Der Energieverbrauch der PAK-Adsorption auf der Kläranlage ist gering und unabhängig von der Dosiermenge. Allerdings spiegelt sich eine erhöhte Dosis im ganzheitlichen Energieverbrauch wider. Deswegen soll eine gute Vorreinigung stattfinden, um Konkurrenz bei der Adsorption zu verringern und so die PAK-Dosierung möglichst gering zu halten. Restadsorptionskapazitäten der Kohle sollten durch eine Rückführung der Kohle bestmöglich ausgenutzt werden.

Für die GAK-Filtration können durch eine ausreichende Feststoffentfernung vor dem Filter vermehrte, den Energieverbrauch erhöhende Filterbett-Rückspülungen vermieden werden. Um den ganzheitlichen Energiebedarf möglichst niedrig zu halten, ist die Verwendung von reaktiver Kohle zu prüfen. Eventuell kürzere Standzeiten gegenüber Frischkohle sollten der energetischen Bilanzierung gegenübergestellt werden.

Bei der Auslegung der weitergehenden Reinigungsstufe sollten die zu überwindenden Förderhöhen minimal gehalten werden.

Grundsätzlich kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass für alle Verfahren eine gute mechanisch-biologische Vorbehandlung zu niedrigeren spezifischen Dosiermengen und einem damit niedrigeren Energieverbrauch (vor Ort und/oder ganzheitlich) führt. Optimierte Auslegungen der Reaktoren und geringe Förderhöhen können weiter dazu beitragen, den Energiebedarf möglichst gering zu halten.

7 Kompensationsmaßnahmen

Grundsätzlich ist eine weitergehende Abwasserreinigung gegenüber dem aktuellen Status quo immer mit einem monetären bzw. energetischen Mehraufwand verbunden. Dieser Sachverhalt ist auch vor dem Hintergrund der politischen Debatte um den Klimawandel und steigende Energiebezugpreise zu betrachten. Es ergibt sich eine Situation, bei der das Ziel

einer höheren Ablaufqualität mit einem höheren Energiebezug und Treibhausgasemissionen verknüpft ist und somit das Klima belasten kann. Diese Belastung kann minimiert werden, wenn entsprechende Kompensationsmöglichkeiten ausgeschöpft werden. Eine schematische Darstellung der Kompensationsmöglichkeiten ist in Bild 7-1 dargestellt.

Bei den im Projekt diskutierten Modellanlagen liegt der spezifische Energieverbrauch je nach Art der Spurenstoffelimination und Anschlussgröße zwischen 2,87 und 8,7 kWh_{el}/(E·a).

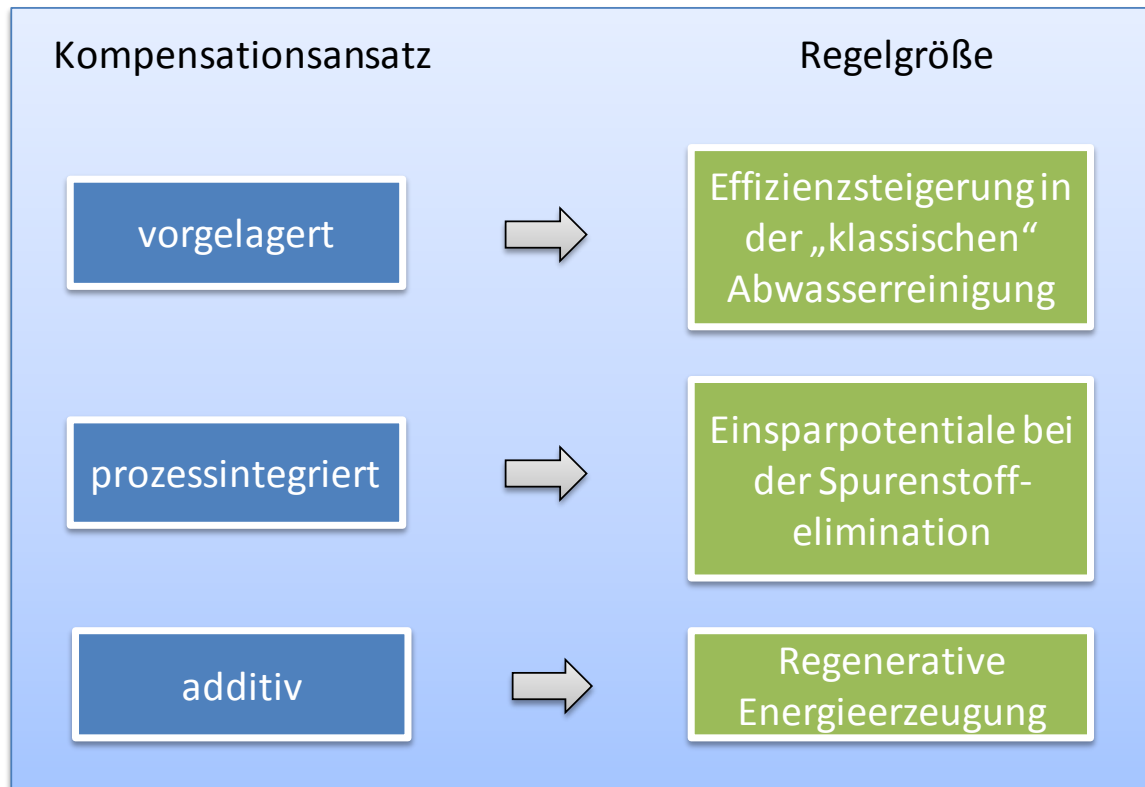


Bild 7-1: Schematische Darstellung möglicher Kompensationsansätze und deren resultierende Regelgrößen

In der deutschen Wasserwirtschaft ist der Wille für eine Optimierung des Energieverbrauchs bzw. der Energieerzeugung auf Kläranlagen traditionell verankert. Eine Auflistung von umgesetzten Optimierungsmaßnahmen mit ausführlicher Beschreibung bietet die DWA-Studie „Energiepotentiale in der Deutschen Wasserwirtschaft“ [DWA, 2010]. Im Wesentlichen können identifizierte Einsparpotentiale durch Energieanalysen den vorgelagerten und additiven Kompensationsansätzen zugeschrieben werden. In Zukunft werden Erfahrungen mit dem Betrieb der Spurenstoffelimination prozessintegrierte Kompensationsmaßnahmen hervorrufen und die Energie- bzw. Klimabilanz verbessern.

Als positives Beispiel ist die Kläranlage Bad Oeynhausen anzusehen, die durch eine Reihe verfahrenstechnischer Energieeffizienzmaßnahmen den Energiebedarf deutlich senken konnte und mittels Kraft-Wärme-Kopplung einen Eigenenergieversorgungsgrad von über 100 % erreicht. Zukünftig wird an dieser Kläranlage eine GAK-Anlage betrieben, deren zusätzlicher Energiebedarf auf etwa 2,7 bis 3,4 kWh_{el}/(E·a) prognostiziert wurde [HYDRO-INGENIEURE, 2012]. Dieser Bedarf kann durch die Energieerzeugung gedeckt werden.

8 Zusammenfassung und Fazit

Zehn großtechnische Versuchsanlagen mit den Verfahren der Ozonung, der Adsorption an Pulveraktivkohle und der Filtration über granulierte Aktivkohle wurden hinsichtlich ihres Energiebedarfs ausgewertet. Zudem wurden zwei Modellkläranlagen für die Anschlussgrößen 20.000 E und 100.000 E aufgestellt und für die Verfahren der nachgeschalteten Ozonung und der Adsorption an PAK bezüglich ihres Energiebedarfs durchgerechnet. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Validierung und Eingrenzung der Ergebnisse aus der ersten Projektphase und die energetische und ökologische Bewertung der betrachteten Verfahren.

Der Versuchsbetrieb auf den zehn untersuchten Anlagen zeigt die Machbarkeit der großtechnischen Umsetzung der betrachteten Verfahren. Je nach Auslegung der Kläranlage können bestehende Bauwerke (Filter, ungenutzte Becken) für die zusätzliche Reinigungsstufe genutzt werden. Zu überwindende Förderhöhen können zu einem relevanten Anteil an zusätzlichem Energieverbrauch beitragen.

Der Hauptanteil des ganzheitlichen Energiebedarfs bei der **Ozonung** wird durch die Bereitstellung des angelieferten Sauerstoffs und die Herstellung des Ozons vor Ort (Strombedarf) bedingt. Der zusätzliche Strombedarf auf der Kläranlage ist hierdurch deutlich höher als derjenige der adsorptiven Verfahren. Als geeignet für die Spurenstoffelimination können Dosiermengen zwischen 2 und 7 g O₃/m³ in Abhängigkeit der organischen Hintergrundbelastung des Abwassers festgehalten werden.

Die Zugabe von **PAK** oder die Filtration über **GAK** sind mit einem geringeren Energiebedarf (Strombedarf) vor Ort als die Ozonung verbunden. Der Energiebedarf der Herstellung/Reaktivierung der Aktivkohle (thermische Energie) ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Die Herstellung/Reaktivierung geht mit einem deutlich höheren Energieaufwand (thermische Energie) einher als der Betrieb der Adsorptionsstufe (elektrische Energie) auf der Kläranlage. Bei der Filtration über GAK ist die Verwendung von Regenerat/Reaktivat aus energetischer Sicht gegenüber Frischkohle zu bevorzugen. Für die nachgeschaltete Zugabe von PAK können Dosiermengen zwischen 10 und 20 g PAK/m³ als zielführend für die Spurenstoffelimination betrachtet werden. Bei der Filtration über GAK ist die Laufzeit des Filters maßgeblich (durchgesetzte Bettvolumina); rechnerische Dosierungen zwischen 10 und 60 g GAK/m³ können als Orientierungswerte festgehalten werden.

Der ganzheitliche Primärenergiebedarf der Ozonung ist niedriger als der der adsorptiven Verfahren. Durch die Anwendung von Regenerat kann ein deutliches Maß an Energie bei der Filtration über GAK eingespart werden. Dies spiegelt sich auch in den CO₂-Emissionen wider. Die weitergehenden Verfahren gehen mit einem CO₂-Ausstoß einher, der aufgrund der ganzheitlichen Betrachtung, den CO₂-Ausstoß der herkömmlichen Kläranlagen deutlich erhöht.

9 Literaturverzeichnis

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

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., SIEGRIST H. (2012). Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Wissen Nr. 1214: 210 S.

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.:

ARGE (2014). Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen. Schlussbericht Phase II der „Arbeitsgemeinschaft Spurenstoffe NRW, Teilprojekt 6“ (Arge), gerichtet an das das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (<http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/abwasser.htm>).

ATV-DVWK-A 131 (2000). Bemessung von einsufigen Belebungsanlagen. Arbeitsblatt des ATV-DVWK Regelwerkes, ISBN 3-933707-41-2.

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.

BODE, H., GRÜNEBAUM, T., & KLOPP, R. (2010). Anthropogene Spurenstoffe aus Kläranlagen Teil 1: Herausforderungen für die Wasserwirtschaft in Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen. Korrespondenz Abwasser, Abfall , 57 (2), S. 138-144.

DWA (2010). „Energiepotentiale in der deutschen Wasserwirtschaft - Schwerpunkt Abwasser,“ Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V, Anhang 4, S. 77ff; Hennef, 2010.

DWA (2013). Nachbarschaften im DWA-Landesverband Nordrhein-Westfalen 2013. Landesverband Nordrhein-Westfalen DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e-V., Essen.

DWA-A 216 (2013). Gelbdruck Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, ISBN 978-3-942964-87-6.

EAWAG: ABEGGLEN, C., ESCHER, B., HOLLENDER, J., KOEPKE, S., ORT, C., PETER, A., ET AL. (2009). Ozonung von gereinigtem Abwasser. Schlussbericht Pilotversuch Regensburg, Dübendorf.

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.

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.

HYDRO-INGENIEURE (2012). „Kläranlage Bad Oeynhausen Einsatz von Aktivkohle/alternative Verfahrenstechniken Vorplanung“, Düsseldorf 2012.

IINAS (2013): Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch des deutschen Strommix im Jahr 2012.

IVASHECHKIN, P. (2006). Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Aachen.

KAPP, H.. (2012). Beispiele für den Einsatz von Aktivkohle bei der kommunalen Abwasserbehandlung in Baden-Württemberg. In J. Pinnekamp (Hrsg.), 45. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 14.3 - 16.3.2012 in Essen (S. 52/1-52/15). Aachen: Gesellschaft zu Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V.

LANUV (2013). LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NRW Tabellarische Datenbank der Kläranlagen in NRW. zur Verfügung gestellt von Dr. Gerta Mentfewitz, 20.02.2013 und 07.06.2013.

MURL (1999). Energie in Kläranlagen – Handbuch, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen.

NAHRSTEDT, A., ROHN, A., , ALT, K., MAUER, C., BURBAUM, H. (2013). Abschlussbericht des Abwasserverbandes *Obere Lutter* auf Förderung des Forschungsvorhabens: Einsatz von granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk *Obere Lutter* - Teil 2. Dezember 2013.

PINNEKAMP, J., BOLLE, F.-W., PALMOWSKI, L., VELTMANN, K., MOUSEL, D.; MAUER, C., ECKERS, S. (2011). Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV), [http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/ Abschlussbericht_ENVELOSO.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht_ENVELOSO.pdf) am 28.9.2012.

PINNEKAMP, J., UND 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.

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.

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

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

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. (2013). 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, <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/abwasser.htm>.

UMWELTBUNDESAMT (2010). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009. Abgerufen am 15. März 2011 von <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>.

UMWELTBUNDESAMT (2013). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012.

Weitere Quellen wurden im Rahmen dieses Projekts und der Erstellung dieses Berichts verwendet und sind in der Langfassung aufgeführt.