



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](http://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](mailto:fiw@fiw.rwth-aachen.de)

ABSCHLUSSBERICHT



Aktenzeichen IV-7-042 600 003 J

# **Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase II**

**ABSCHLUSSBERICHT**

Aachen, im August 2015  
FiW an der RWTH Aachen

ISA der RWTH Aachen

Dr.-Ing. F.-W. Bolle

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

<b>Bietergemeinschaft</b>		
Bietergemeinschaft FiW / RWTH / Pöyry / EG/LV / RV		
<b>Bevollmächtigter Vertreter</b>		<b>Bearbeiter</b>
	<p>Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW) e.V. an der RWTH Aachen</p> <p>Dr.-Ing. F.-W. Bolle</p> <p>Kackertstr. 15-17 52056 Aachen</p> <p>Tel.: 0241 / 80 26825 Fax: 0241 / 80 22825 Email: <a href="mailto:fiw@fiw.rwth-aachen.de">fiw@fiw.rwth-aachen.de</a> <a href="http://www.fiw.rwth-aachen.de">www.fiw.rwth-aachen.de</a></p>	<p>Dipl.-Ing. S. Gredigk-Hoffmann <a href="mailto:gredigk@fiw.rwth-aachen.de">gredigk@fiw.rwth-aachen.de</a></p> <p>Dipl.-Ing. K. Genzowsky <a href="mailto:genzowsky@fiw.rwth-aachen.de">genzowsky@fiw.rwth-aachen.de</a></p> <p>S. Miethig, M. Eng. <a href="mailto:miethig@fiw.rwth-aachen.de">miethig@fiw.rwth-aachen.de</a></p>
<b>Projektleitung</b>		<b>Bearbeiter</b>
	<p>Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen</p> <p>Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp</p> <p>Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen</p> <p>Tel.: 0241 80 25207 Fax: 0241 80 22285 Email: <a href="mailto:isa@isa.rwth-aachen.de">isa@isa.rwth-aachen.de</a> <a href="http://www.isa.rwth-aachen.de">www.isa.rwth-aachen.de</a></p>	<p>Dipl.-Ing. D. Mousel <a href="mailto:mousel@isa.rwth-aachen.de">mousel@isa.rwth-aachen.de</a></p> <p>Dr.-Ing. K. Krebber <a href="mailto:krebber@isa.rwth-aachen.de">krebber@isa.rwth-aachen.de</a></p> <p>Dr.-Ing. L. Palmowski <a href="mailto:palmowski@isa.rwth-aachen.de">palmowski@isa.rwth-aachen.de</a></p>
<b>Projektpartner</b>		
	<p>Pöyry Deutschland GmbH</p> <p>Dipl.-Ing. Gerold Zimmermann</p> <p>Lazarettstr. 15 45127 Essen</p> <p>Tel.: 0201 82054 - 36 Fax: 0201 82054 - 22</p>	<p>Dr.-Ing. M. Krüger <a href="mailto:matthias.krueger@poyry.com">matthias.krueger@poyry.com</a></p> <p>Dipl.-Ing. S. Eckers <a href="mailto:sabrina.eckers@poyry.com">sabrina.eckers@poyry.com</a></p> <p>Dipl.-Ing- C. Simsheuser <a href="mailto:caroline.simsheuser@poyry.com">caroline.simsheuser@poyry.com</a></p>
	<p>Emschergenossenschaft / Lippeverband</p> <p>Kronprinzenstr. 24 45128 Essen</p>	<p>Dr.-Ing. S. Lyko <a href="mailto:lyko.sven@eglv.de">lyko.sven@eglv.de</a></p>
	<p>Ruhrverband</p> <p>Kronprinzenstr. 37 45128 Essen</p>	<p>Dr.-Ing. D. Thöle <a href="mailto:dth@ruhrverband.de">dth@ruhrverband.de</a></p>

Zitierweise:

PINNEKAMP, J., MOUSEL, D., KREBBER, K., PALMOWSKI, L., BOLLE, F.-W., GREDIGK-HOFFMANN, S., GENZOWSKY, K., MIETHIG, S., KRÜGER, M., ECKERS, S., SIMSHEUSER, C., LYKO, S., THÖLE, D. (2015): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Phase II. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse aus Phase I zum Energiebedarf auf der Kläranlage</b> .....	<b>4</b>
2.1	Ozonung.....	4
2.2	Adsorptive Verfahren.....	6
2.2.1	Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken .....	6
2.2.2	Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters .....	8
2.2.3	Filtration über GAK.....	8
<b>3</b>	<b>Untersuchte Kläranlagen</b> .....	<b>10</b>
3.1	Bad Sassendorf.....	11
3.2	Schwerte .....	12
3.3	Duisburg-Vierlinden .....	13
3.4	Wuppertal-Buchenhofen.....	15
3.5	Düren-Merken .....	16
3.6	Obere Lutter .....	19
3.7	Böblingen-Sindelfingen.....	20
3.8	Mannheim .....	22
3.9	Gütersloh-Putzhagen.....	23
3.10	Kressbronn-Langenargen.....	24
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>26</b>
4.1	Stromverbrauch der untersuchten Anlagen .....	26
4.1.1	Kläranlage Bad Sassendorf.....	26
4.1.1.1	Auswertung von Tageswerten .....	26
4.1.1.2	Auswertung von Werten im 15-Minuten-Intervall .....	30
4.1.1.3	Stromverbrauch der Ozonung in Bad Sassendorf.....	31
4.1.2	Kläranlage Schwerte .....	36
4.1.2.1	Förderhöhe.....	36
4.1.2.2	Rezirkulationsbetrieb.....	37
4.1.2.3	Stromverbrauch der PAK-Zugabe auf der KA Schwerte .....	37

4.1.2.4	Stromverbrauch der Ozonung in Schwerte .....	42
4.1.2.5	Kombinierte oxidative und adsorptive Behandlung .....	49
4.1.2.6	Vergleich des Stromverbrauchs der Verfahrenstechniken .....	49
4.1.3	Kläranlage Duisburg-Vierlinden .....	52
4.1.4	Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen .....	56
4.1.5	Kläranlage Düren-Merken .....	60
4.1.6	Kläranlage Obere Lutter .....	62
4.1.7	Kläranlage Böblingen-Sindelfingen.....	65
4.1.8	Kläranlage Mannheim .....	67
4.1.9	Kläranlage Gütersloh-Putzhagen.....	69
4.1.10	Kläranlage Kressbronn-Langenargen .....	71
4.2	Zusammenfassung der Werte und Vergleich mit Literaturwerten.....	72
4.2.1	Ozonung .....	72
4.2.2	Zugabe von PAK .....	76
4.2.3	Filtration über GAK.....	79
<b>5</b>	<b>Ganzheitlicher Energiebedarf.....</b>	<b>82</b>
5.1	Ozonung.....	83
5.1.1	Anlieferung von Reinsauerstoff.....	83
5.1.1.1	Ergebnisse aus Phase I.....	83
5.1.1.2	Neue Erkenntnisse und Vergleich mit den großtechnischen Anlagen .....	85
5.1.2	Herstellung von Reinsauerstoff vor Ort.....	86
5.2	Adsorptive Verfahren.....	88
5.2.1	Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken .....	88
5.2.1.1	Ergebnisse aus Phase I.....	88
5.2.1.2	Neue Erkenntnisse und Vergleich mit den großtechnischen Anlagen .....	90
5.2.2	Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters .....	92
5.2.2.1	Ergebnisse aus Phase I.....	92
5.2.2.2	Neue Erkenntnisse und Vergleich mit den großtechnischen Anlagen .....	94
5.2.3	Filtration über GAK.....	95
5.2.3.1	Ergebnisse aus Phase I.....	95
5.2.3.2	Neue Erkenntnisse und Vergleich mit den großtechnischen Anlagen .....	99
5.3	Diskussion.....	104

<b>6</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Bilanzen</b> .....	<b>105</b>
6.1	CO <sub>2</sub> -Bilanz für eine nachgeschaltete Ozonung .....	105
6.1.1	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der auf der Kläranlage benötigten Energie.....	105
6.1.2	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Herstellung und Transport der Inputstoffe .....	107
6.1.3	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Bau der Infrastruktur .....	107
6.1.4	Summe der CO <sub>2</sub> -Emissionen für eine nachgeschaltete Ozonung.....	108
6.2	CO <sub>2</sub> -Bilanz für eine PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken .....	108
6.2.1	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der auf der Kläranlage benötigten Energie.....	108
6.2.2	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus Herstellung und Transport der Inputstoffe.....	110
6.2.3	CO <sub>2</sub> -Emissionen aus dem Bau der Infrastruktur .....	111
6.2.4	Summe der CO <sub>2</sub> -Emissionen für eine PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken.	111
6.3	Carbon Footprint der Filtration über GAK .....	112
6.4	Diskussion.....	117
<b>7</b>	<b>Modellanlage</b> .....	<b>119</b>
7.1	Datengrundlage.....	119
7.1.1	Statistische Auswertung .....	119
7.1.1.1	Statistische Auswertung – Häufigkeit nach Anschlussgröße.....	120
7.1.1.2	Statistische Auswertung - Abwasserreinigungsleistung .....	121
7.1.2	Auswertung der Verfahrensstufen .....	121
7.1.3	Systemgrenzen für die Energiebilanzierung .....	125
7.2	Modellanlage für 100.000 E.....	126
7.2.1	Grundlagen der Modellanlage für 100.000 E .....	126
7.2.1.1	Wassermengen .....	126
7.2.1.2	Konzentrationen und Frachten .....	127
a.	Struktureller Aufbau der Verfahrensstufen.....	128
b.	Anpassung nach DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013].....	134
7.2.2	Auslegung der Ozonung (Variante A).....	134
7.2.3	Auslegung der PAK (Variante B) .....	136
7.2.4	Berechnung des Energiebedarfs .....	138
7.2.4.1	Hebewerke .....	139
7.2.4.2	Rechen.....	140
7.2.4.3	Sandfang.....	140

7.2.4.4	Vorklärung.....	141
7.2.4.5	Belebung.....	142
7.2.4.6	Nachklärung.....	144
7.2.4.7	Ozonung (Variante A).....	146
7.2.4.8	PAK (Variante B).....	147
7.2.4.9	Flockungsfiltration.....	148
7.2.4.10	Voreindickung.....	149
7.2.4.11	Stabilisierung.....	150
7.2.4.12	Entwässerung.....	151
7.2.4.13	Infrastruktur.....	151
7.2.5	Gesamter Energiebedarf Modellanlage.....	152
7.2.5.1	Ozonung (Variante A).....	152
7.2.5.2	PAK (Variante B).....	154
7.2.6	Energieerzeugung durch das BHKW.....	155
7.3	Modellanlage für 20.000 E.....	157
7.3.1	Grundlagen Modellanlage für 20.000 E.....	157
7.3.1.1	Wassermengen.....	157
7.3.1.2	Konzentrationen und Frachten.....	158
7.3.1.3	Struktureller Aufbau der Verfahrensstufen.....	158
7.3.2	Auslegung der Ozonung (Variante A).....	161
7.3.3	Auslegung der PAK (Variante B).....	162
7.3.4	Berechnung des Energiebedarfs.....	162
7.3.4.1	Belüftung Belebung.....	163
7.3.4.2	Ozonung (Variante A).....	164
7.3.4.3	PAK (Variante B).....	165
7.3.5	Gesamter Energiebedarf Modellanlage mit Ozonung (Variante A).....	166
7.3.6	Gesamter Energiebedarf PAK (Variante B).....	166
7.4	Auswertung der Ergebnisse und Einflussfaktoren.....	169
7.4.1	Einflussfaktoren der Modellanlagen mit Ozonung.....	169
7.4.2	Einflussfaktoren der Modellanlagen mit Pulveraktivkohle.....	170
7.4.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Modellanlage 100.000 E (PAK – Ozon).....	172

7.4.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Modellanlage 20.000 E (PAK – Ozon)	173
7.5	Vergleich der Ergebnisse der Modellanlagen mit den Daten der großtechnischen Anlagen.....	174
7.5.1	Vergleich Ozonung: Versuche - Modell .....	174
7.5.2	Vergleich PAK: Versuche - Modell.....	174
7.5.3	Hinweise für die weitere Verwendung der Modellwerte .....	175
7.6	Wesentliche Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch von Anlagen zur Spurenstoffelimination.....	176
7.6.1	Ozonung .....	176
7.6.2	Aktivkohle.....	177
7.6.2.1	Pulveraktivkohle .....	177
7.6.2.2	Granulierte Aktivkohle .....	178
7.6.3	Sonstige Einflussfaktoren .....	178
<b>8</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination .....</b>	<b>179</b>
8.1	Spurenstoffelimination .....	179
8.2	Energieverbrauch auf der Kläranlage .....	182
8.3	Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage .....	185
8.4	CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	186
8.5	Bewertungstabelle.....	187
8.6	Empfehlungen für Planung und Betrieb von Anlagen zur Spurenstoffelimination...	190
8.6.1	Behandlungswassermenge .....	190
8.6.2	Verfahrensauswahl.....	190
8.6.3	Planung und Betrieb einzelner Verfahren .....	192
8.6.3.1	Ozonung.....	192
8.6.3.2	Adsorption an Pulveraktivkohle .....	193
8.6.3.3	Filtration über granulierte Aktivkohle.....	193
<b>9</b>	<b>Kompensationsmöglichkeiten .....</b>	<b>195</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit.....</b>	<b>202</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>204</b>
	<b>Anhang 211</b>	

---

1.	Auswertung DWA Kläranlagennachbarschaften NRW .....	211
2.	Bemessung Modellanlage für Ausbaugröße 130.000 E .....	232
3.	Tabellen zum Energiebedarf 100.000 E (für Ausbaugröße 130.000 E) .....	243
4.	Bemessung der Modellanlage 26.000 E .....	252
5.	Tabellen zum Energiebedarf 20.000 E (für Ausbaugröße 26.000 E) .....	261

## Verzeichnis der Bilder

Bild 2-1:	Minimaler, mittlerer und maximaler Strombedarf auf der Kläranlage bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis.....	5
Bild 2-2:	Aufteilung des Strombedarfs auf der Kläranlage bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis.....	6
Bild 2-3:	Energiebedarf (thermisch und elektrisch) auf der Kläranlage für Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken .....	7
Bild 2-4:	Energiebedarf (thermisch und elektrisch) auf der Kläranlage für Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters .....	8
Bild 2-5:	Strombedarf auf der Kläranlage für eine nachgeschaltete Filtration über GAK (frisch oder regeneriert) .....	9
Bild 3-1:	Fließschema der Ozonanlage in Bad Sassendorf [ARGE, 2014] .....	11
Bild 3-2:	Weitergehende Behandlung mit Ozon und/oder Pulveraktivkohle auf der Kläranlage Schwerte.....	13
Bild 3-3:	Weitergehende Behandlung mit Ozon auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden [ARGE, 2014].....	15
Bild 3-4:	Zur PAK-Dosierung umgerüstete Filterzelle der KA Buchenhofen [BORNEMANN ET AL., 2012] .....	16
Bild 3-5:	Fließbild KA Düren.....	17
Bild 3-6:	Aufbau Filteranlage KA Düren [nach BORNEMANN ET AL, 2012] .....	18
Bild 3-7:	Fließschema der Kläranlage Böblingen-Sindelfingen [BIEBERSDORF ET AL., 2012] .....	21
Bild 3-8	Umsetzung der Adsorptionsstufe im Klärwerk Mannheim [HOCHSCHULE BIBERACH IN STADTENTWÄSSERUNG MANNHEIM, 2013].....	23
Bild 4-1:	Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ] in Abhängigkeit der Ozondosis an den Probenahmetagen.....	27
Bild 4-2:	Spezifischer, auf Ozon bezogener Stromverbrauch [kWh/kg O <sub>3</sub> ] in Abhängigkeit der Ozondosis an den Probenahmetagen.....	28
Bild 4-3:	Spezifischer, auf Ozon bezogener, Stromverbrauch [kWh/kg O <sub>3</sub> ] in Abhängigkeit des Abwasserzuflusses an den Probenahmetagen.....	29
Bild 4-4:	Spezifischer, auf Ozon bezogener, Stromverbrauch [kWh/kg O <sub>3</sub> ] in Abhängigkeit der produzierten Ozonfracht an den Probenahmetagen.....	29
Bild 4-5:	Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ] in Abhängigkeit der Ozondosis Dezember 2011 (Dosiermenge basiert auf Q) .....	30

Bild 4-6:	Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ] in Abhängigkeit der Ozondosis Januar 2013 (Dosierstrategie basiert auf SAK) .....	31
Bild 4-7:	Abbaurrate der untersuchten Spurenstoffe bei Zugabe von 2 mg O <sub>3</sub> /L (mengenproportional und SAK-basiert) [ARGE, 2011].....	33
Bild 4-8:	Abbaurrate der untersuchten Spurenstoffe bei Zugabe von 5 mg O <sub>3</sub> /L (mengenproportional) [ARGE, 2011] .....	33
Bild 4-9:	Eliminationsgrade für unterschiedliche Spurenstoffe in Abhängigkeit der Ozondosis [ARGE, 2014].....	34
Bild 4-10:	Wasserspiegellagen über NN.....	36
Bild 4-11:	Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate der PAK-Anlage auf der KA Schwerte .....	39
Bild 4-12:	Stromverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ] der einzelnen Aggregate der PAK-Anlage auf der KA Schwerte bei realer Förderhöhe .....	40
Bild 4-13:	Stromverbrauch der einzelnen Aggregate der PAK-Anlage auf der KA Schwerte bei theoretisch erforderlicher Förderhöhe .....	40
Bild 4-14:	Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ] in Abhängigkeit der Ozondosis .....	43
Bild 4-15:	Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate der Ozonung auf der KA Schwerte .....	44
Bild 4-16:	Stromverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ] der einzelnen Aggregate der Ozonung auf der KA Schwerte bei realer Förderhöhe .....	45
Bild 4-17:	Spezifischer, auf Ozon bezogener, Stromverbrauch [kWh/kg O <sub>3</sub> ] in Abhängigkeit der Ozonfracht.....	46
Bild 4-18:	Theoretische Verteilung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate der Ozonung auf der KA Schwerte bei theoretisch erforderlicher Förderhöhe .....	46
Bild 4-19	Durchschnittliche Eliminationsleistung (Säulen) und Ablaufkonzentrationen (Symbole) der Ozonung (Bilanzraum Ozonungszulauf / Ozonungsablauf) bei mengenproportionaler Ozonzugabe von 2 und 5 mg O <sub>3</sub> /L im dynamischen Rezirkulationsbetrieb (* = Mindestelimination) [ARGE, 2014] .....	48
Bild 4-20:	Durchschnittlicher Eliminationsgrad und Ablaufkonzentrationen der Straße 2 (Bilanzraum Zulauf Belebungsbecken/Ablauf Nachklärung 2 bei mengenproportionaler Ozonzugabe von 2 und 5 mg O <sub>3</sub> /L im dynamischen Rezirkulationsbetrieb und durchschnittliche Eliminationsgrade der Referenzstraße 1 (* = Mindestelimination) [ARGE, 2014] .....	49

Bild 4-21	Einwohnerspezifischer Energieverbrauch der KA Schwerte in Abhängigkeit der gewählten Verfahrenskombination und des gewählten Kosten-Szenarios [ARGE, 2014] .....	50
Bild 4-22:	Leistungsbedarf der Ozonung in Duisburg-Vierlinden in Abhängigkeit der Zulaufmengen und der Dosiermenge für die Injektor- und die Diffusorstraße [HERBST ET AL., 2013].....	52
Bild 4-23:	Eliminationsgrade beim Parallelbetrieb der Injektor- und Diffusorstraße, 1 Versuch je Solldosis von 2, 5 und 7 mg O <sub>3</sub> /L bei mengenproportionaler Steuerung O <sub>3</sub> -Dosierung (ARGE, 2014).....	55
Bild 4-24:	Spezifischer Energieverbrauch der Versuchszelle in Abhängigkeit der Leistung des Rührwerks.....	58
Bild 4-25:	Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs der Filteranlage in der Kläranlage Düren (12.10. bis 18.11.2012).....	60
Bild 4-26:	Eliminationsgrade der GA4 und GA5 in Obere Lutter nach 1.400 und 3.500 Bettvolumina [nach BUHRBAUM UND BRUN, 2013].....	64
Bild 4-27:	Normierte Ablaufkonzentration $c/c_0$ des CSB der Adsorber im Vergleich zu den analogen Daten des GA in ersten Projekt [NAHRSTEDT ET AL, 2013B].....	65
Bild 4-28:	Stromverbrauch der Aktivkohleadsorption nach Verbrauchern [nach BIEBERSDORF ET AL., 2012].....	66
Bild 4-29:	Prozentuale Entnahme von Spurenstoffen im System Adsorptionsstufe + Filtration bei unterschiedlichen PAK-Dosiermengen [METZGER ET AL., 2012].....	68
Bild 4-30:	Gesamtentnahme in der adsorptiven Stufe für die 70 nachgewiesenen Stoffe [METZGER ET AL., 2012] .....	69
Bild 4-31:	Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen Ozonanlagen.....	72
Bild 4-32:	Strombedarf einer nachgeschalteten Ozonung auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus den großtechnisch untersuchten Anlagen mit Literaturangaben.....	74
Bild 4-33:	Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen Spurenstoffeliminationsstufen mit Zugabe von PAK.....	76
Bild 4-34:	Strombedarf einer nachgeschalteten Zugabe von PAK auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus den großtechnisch untersuchten Anlagen mit Literaturangaben .....	77
Bild 4-35:	Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen GAK-Filtrationsanlagen.....	79

Bild 4-36:	Strombedarf einer nachgeschalteten GAK-Filtration auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus den großtechnisch untersuchten Anlagen mit Literaturangaben .....	80
Bild 5-1:	Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis .....	84
Bild 5-2:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis.....	85
Bild 5-3:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom .....	86
Bild 5-4:	Minimaler, mittlerer und maximaler Energiebedarf auf der Kläranlage/ ganzheitlicher Energiebedarf bei einer Ozonung mit Bereitstellung des Sauerstoffs vor Ort in Abhängigkeit der Ozondosis .....	87
Bild 5-5:	Minimaler, mittlerer und maximaler Primärenergiebedarf auf der Kläranlage/ ganzheitlicher Energiebedarf bei einer Ozonung mit Bereitstellung des Sauerstoffs vor Ort in Abhängigkeit der Ozondosis .....	88
Bild 5-6:	Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis .....	89
Bild 5-7:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis .....	90
Bild 5-8:	Elektrischer und thermischer Energiebedarf bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken für das minimale bzw. maximale Szenario .....	90
Bild 5-9:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom .....	92
Bild 5-10:	Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters in Abhängigkeit der PAK-Dosis .....	93
Bild 5-11:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters in Abhängigkeit der PAK-Dosis.....	94
Bild 5-12:	Elektrischer und thermischer Energiebedarf bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters für das minimale bzw. maximale Szenario.....	94

Bild 5-13:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in den Flockungsfilter für 20 g/m <sup>3</sup> PAK inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom .....	95
Bild 5-14:	Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf (elektrisch und thermisch) bei Filtration über frische GAK .....	96
Bild 5-15:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Filtration über frische GAK .....	97
Bild 5-16:	Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf (elektrisch und thermisch) bei Filtration über regenerierte GAK.....	97
Bild 5-17:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Filtration über regenerierte GAK .....	98
Bild 5-18:	Elektrischer und thermischer Energiebedarf einer Filtration über frische GAK für das minimale bzw. maximale Szenario .....	99
Bild 5-19:	Elektrischer und thermischer Energiebedarf einer Filtration über regenerierte GAK für das minimale bzw. maximale Szenario .....	99
Bild 5-20:	Primärenergiebedarf und Kohlebedarf eines GAK-Filters in Abhängigkeit der Filterstandzeit, ausgedrückt in Bettvolumina [BVT] [ABEGGLEN UND SIEGRIST, 2012].....	100
Bild 5-21:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Filtration über frische GAK in Abhängigkeit der GAK-Dosis inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom.....	103
Bild 5-22:	Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Filtration über regenerierte GAK in Abhängigkeit der GAK-Dosis inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom .....	103
Bild 6-1:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen durch Stromverbrauch [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ] auf der Kläranlage der untersuchten großtechnischen Ozon-Anlagen.....	106
Bild 6-2:	CO <sub>2</sub> -Emissionen einer nachgeschalteten Ozonung in Abhängigkeit der Ozondosis (sonstige Bedingungen mit Mittelwerten angesetzt).....	108
Bild 6-3:	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen durch Stromverbrauch [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ] auf der Kläranlage der untersuchten großtechnischen PAK-Anlagen .....	109
Bild 6-4:	CO <sub>2</sub> -Emissionen einer Zugabe von PAK in einem Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis (sonstige Bedingungen mit Mittelwerten angesetzt) .....	112
Bild 6-5:	Bilanzraum für einen GAK-Adsorber [NAHRSTEDT ET AL., 2013B].....	113
Bild 6-6:	Spezifischer Carbon Footprint der Herstellung bzw. Reaktivierung des Filtermaterials [nach NAHRSTEDT ET AL., 2013B] .....	116
Bild 7-1:	Verteilung der Kläranlagen NRW nach Anschlussgröße (GK 1 bis 5).....	120

Bild 7-2:	Verteilung der Kläranlagen NRW der GK 4 nach Anschlussgröße .....	121
Bild 7-3:	Verteilung nach Abwasserreinigungsleistung .....	121
Bild 7-4:	Anzahl der Kläranlagen NRW gesamt und mit Sandfilter.....	122
Bild 7-5:	Anteil der Kläranlagen NRW (Modellanlagengrößen) mit Sandfilter .....	123
Bild 7-6:	Beispiel für die Auswertung der Daten der DWA Nachbarschaften .....	124
Bild 7-7:	Modellanlage 100.000 E mit Ozonung.....	129
Bild 7-8:	Schema Ozonung 100.000 E (Ausschnitt aus Bild 7-7) .....	135
Bild 7-9:	Schema Aktivkohle 100.000 E (Ausschnitt aus Bild 7-7) .....	137
Bild 7-10:	Vergleich des Energieverbrauchs zwischen PAK und Ozonung, 100.000 E.....	155
Bild 7-11:	Schema der 20.000 E Anlage mit Ozonung.....	159
Bild 7-12:	Vergleich Energiebedarf Modellanlage 20.000 E mit PAK und Ozonung...	167
Bild 8-1:	Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration $c/c_0$ verschiedener Festbettadsorptionsversuche für den Spurenstoff Carbamazepin [NAHRSTEDT ET AL., 2013B] .....	181
Bild 8-2:	Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration $c/c_0$ verschiedener Festbettadsorptionsversuche für den Spurenstoff Diclofenac [NAHRSTEDT ET AL., 2013B] .....	181
Bild 9-1:	Schematische Darstellung möglicher Kompensationsansätze und deren resultierende Regelgrößen.....	195
Bild 9-2:	Potential der energetischen Optimierungsmaßnahmen nach verfahrenstechnischen Teilbereichen und Realisierungsphasen (sofort, kurzfristig, abhängig) untergliedert aus 91 ausgewerteten Energieanalysen in NRW [KOLISCH ET AL., 2013].....	197
Bild 9-3:	Schematische Darstellung möglicher Energiequellen auf Kläranlage .....	200

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1: Beurteilung einer Aktivkohlefiltration aus regenerierter GAK, einer Zugabe von Pulveraktivkohle in ein Kontaktbecken, Ozonung, Nanofiltration/Umkehrosmose und Advanced Oxidation Processes bezüglich verschiedener Kriterien .....	2
Tabelle 2-1: Zusammenfassung des elektrischen Energiebedarfs auf der Kläranlage.....	4
Tabelle 3-1: Untersuchte Kläranlagen.....	10
Tabelle 3-2: Filtrationszyklen der Referenzfilterzelle (11) und der mit der dritten GAK gefüllten Filterzelle (12) auf der KA Düren .....	19
Tabelle 4-1: Zusammenfassung der mittleren Energieverbrauchswerte [kWh/m <sup>3</sup> ] für die Ozonanlage in Bad Sassendorf .....	31
Tabelle 4-2: Zusammenfassung der mittleren Energieverbrauchswerte [kWh/kg O <sub>3</sub> ] für die Ozonanlage in Bad Sassendorf .....	32
Tabelle 4-3: Spezifische Energieverbräuche der Ablaufozonung mit 2 g/m <sup>3</sup> O <sub>3</sub> auf der KA Bad Sassendorf [nach ARGE, 2014].....	35
Tabelle 4-4: Energetische Auswertung der PAK-Versuche auf der KA Schwerte.....	38
Tabelle 4-5: Stoffspezifische Kategorisierung der frachtbezogenen Elimination der Referenz- und Versuchsstraße bei verschiedenen Dosiermengen [ARGE, 2011].....	42
Tabelle 4-6: Energetische Auswertung der Ozonversuche auf der KA Schwerte .....	42
Tabelle 4-7: Energiebedarf des Zulaufpumpwerks sowie der Ozonerzeugung und des Ozoneintrags bei 3, 5 und 7 mg O <sub>3</sub> /L, getrennt für die Injektor- und Diffusorstraße nach [HERBST ET AL., 2013] .....	53
Tabelle 4-8: Spezifischer berechneter Energieverbrauch bei unterschiedlichen Ozondosierungen für Injektor- und Diffusorstraße bei einem Zufluss von 100 m <sup>3</sup> /h.....	54
Tabelle 4-9: Berechnete spezifische Energieverbräuche der unterschiedlichen GAK-Filter auf dem Klärwerk Obere Lutter [nach NAHRSTEDT ET AL. 2013B].....	63
Tabelle 4-10: Berechnete spezifische Energieverbräuche der GAK-Filter in Gütersloh-Putzhagen .....	70
Tabelle 5-1: Zusammenfassung des ganzheitlichen Energiebedarfs aus Phase I.....	82
Tabelle 5-2: Ausbaukriterien, ausgedrückt in BVT, für die Kläranlagen Obere Lutter und Gütersloh-Putzhagen und spezifische Aktivkohledosierung.....	101

Tabelle 5-3: Spezifischer ganzheitlicher Primärenergiebedarf der unterschiedlichen Verfahren zur Spurenstoffelimination .....	104
Tabelle 6-1: CO <sub>2</sub> -Emissionen einer nachgeschalteten Ozonstufe aus der auf der Kläranlage benötigten Energie .....	106
Tabelle 6-2: Für Herstellung und Transport von Inputstoffen verursachten CO <sub>2</sub> -Emissionen bei einer nachgeschalteten Ozonstufe .....	107
Tabelle 6-3: CO <sub>2</sub> -Emissionen einer PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken aus der auf der Kläranlage benötigten Energie .....	110
Tabelle 6-4: Für Herstellung und Transport von Inputstoffen verursachte CO <sub>2</sub> -Emissionen bei einer nachgeschalteten PAK-Adsorption .....	110
Tabelle 6-5: Parameter für die Bilanzierung des Carbon Footprints auf dem Klärwerk Obere Lutter (ach NAHRSTEDT ET AL., 2013B).....	115
Tabelle 6-6: Absolute und relative CO <sub>2</sub> -Emissionen durch den Adsorberbetrieb [nach NAHRSTEDT ET AL., 2013B].....	116
Tabelle 6-7: Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen der unterschiedlichen Verfahren zur Spurenstoffelimination.....	117
Tabelle 7-1: Auswertung Verfahrensstufen der DWA Nachbarschaften .....	125
Tabelle 7-2: Wassermengen Modellanlage 130.000 E .....	127
Tabelle 7-3: Schmutzfrachten im Zulauf zur Modellanlage.....	128
Tabelle 7-4: Frachten im Zulauf Belebung inkl. Rückbelastung.....	128
Tabelle 7-5: Bemessung der Vorklärung.....	131
Tabelle 7-6: Bemessung des erforderlichen Belebungsvolumens nach HSG für die Modellanlage mit 130.000 E Ausbaugröße.....	132
Tabelle 7-7: Energiebedarf bei Ozondosis 5,0 g/m <sup>3</sup> .....	136
Tabelle 7-8: maßgebliche Wassermengen für die Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs für 100.000 E Modellanlage.....	139
Tabelle 7-9: Energiebedarf Hebewerk, 100.000 E.....	140
Tabelle 7-10: Energiebedarf Rechen, 100.000 E .....	140
Tabelle 7-11: Energiebedarf Sandfang, 100.000 E .....	141
Tabelle 7-12: Energiebedarf Vorklärung, 100.000 E .....	142
Tabelle 7-13: Energiebedarf Belüftung Belebung, 100.000 E .....	143
Tabelle 7-14: Energiebedarf restliche Verbraucher Belebung, 100.000 E.....	144
Tabelle 7-15: Energiebedarf Nachklärung mit PAK, 100.000 E.....	145
Tabelle 7-16: Energiebedarf Nachklärung mit Ozonung, 100.000 E .....	146

Tabelle 7-17: Energiebedarf Ozonung, 100.000 E.....	147
Tabelle 7-18: Energiebedarf Pulveraktivkohle, 100.000 E .....	148
Tabelle 7-19: Energiebedarf Filtration, 100.000 E.....	149
Tabelle 7-20: Energiebedarf Voreindickung mit Ozonung, 100.000 E.....	149
Tabelle 7-21: Energiebedarf Voreindickung PAK, 100.000 E.....	150
Tabelle 7-22: Energiebedarf Faulung 100.000 E mit Ozonung .....	150
Tabelle 7-23: Energiebedarf Faulung 100.000 E mit PAK.....	151
Tabelle 7-24: Energiebedarf Entwässerung 100.000 E mit Ozonung.....	151
Tabelle 7-25: Energiebedarf Entwässerung 100.000 E mit PAK.....	151
Tabelle 7-26: Energiebedarf Infrastruktur 100.000 E .....	152
Tabelle 7-27: Gesamtenergiebedarf Modellanlage 100.000 E mit Ozonung .....	153
Tabelle 7-28: Gesamtverbrauch Modellanlage 100.000 E mit PAK.....	154
Tabelle 7-29: Energieerzeugung durch ein Blockheizkraftwerk.....	156
Tabelle 7-30: Wassermengen Modellanlage 26.000 E.....	157
Tabelle 7-31: Frachten der 20.000 E Anlagen .....	158
Tabelle 7-32: Bemessung des erforderlichen Belebungsvolumens nach HSG für die Anlage mit 26.000 E Ausbaugröße.....	160
Tabelle 7-33: maßgebliche Wassermengen zur Bestimmung des Energiebedarfs für Modellanlage 20.000 E .....	163
Tabelle 7-34: Energiebedarf Belüftung Belebung .....	164
Tabelle 7-35: Energiebedarf Ozonung inkl. Sandfilter.....	165
Tabelle 7-36: Energiebedarf PAK inkl. Sandfilter .....	165
Tabelle 7-37: Gesamtenergiebedarf Modellanlage 20.000 E mit Ozonung .....	166
Tabelle 7-38: Gesamter Verbrauch mit PAK.....	167
Tabelle 7-39: Gegenüberstellung Energiebedarf Modellanlagen mit Ozonung .....	169
Tabelle 7-40: Gegenüberstellung Energiebedarf Modellanlagen mit PAK.....	171
Tabelle 7-41: Gegenüberstellung 100.000 E Modellanlage mit PAK und Ozonung.....	172
Tabelle 7-42: Gegenüberstellung der 20.000 E Modellanlagen mit PAK und Ozonung .....	173
Tabelle 8-1: Dosierstufen nach ARGE (2014) .....	179
Tabelle 8-2: Einwohnerspezifischer Energieverbrauch auf der Kläranlage für die Spurenstoffelimination auf den Kläranlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden (nach ARGE, 2014).....	184

Tabelle 8-3: Zusammenfassende energetische Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination.....	189
Tabelle 9-1: Vorgelagerte Kompensationsmaßnahmen (in Anlehnung an KOLISCH ET AL, 2013; KOLISCH ET AL. 2014).....	196
Tabelle A 1: Begriffe und Abkürzungen, Teil 1 .....	211
Tabelle A 2: Begriffe und Abkürzungen, Teil 2 .....	212
Tabelle A 3: Verfahrensstufen 100.000 bis 150.000 E, Teil 1.....	213
Tabelle A 4: Verfahrensstufen 100.000 bis 150.000 E, Teil 2.....	214
Tabelle A 5: weitergehende Verfahrensstufen 100.000 bis 150.000 E, Teil 1.....	215
Tabelle A 6: Verfahrensstufen 100.000 bis 150.000 E, Teil 2.....	216
Tabelle A 7: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 1.....	217
Tabelle A 8: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 2.....	218
Tabelle A 9: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 3.....	219
Tabelle A 10: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 4.....	220
Tabelle A 11: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 5.....	221
Tabelle A 12: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 6.....	222
Tabelle A 13: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 7.....	223
Tabelle A 14: weitergehende Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 1 .....	224
Tabelle A 15: weitergehende Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 2 .....	225
Tabelle A 16: weitergehende Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 3 .....	226
Tabelle A 17: weitergehende Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 4 .....	227
Tabelle A 18: weitergehende Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 5 .....	228
Tabelle A 19: weitergehende Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 6 .....	229
Tabelle A 20: weitergehende Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 7 .....	230
Tabelle A 21: Grundlagen Modellanlage, 130.000 E.....	232
Tabelle A 22: Bemessung Vorklärung, 130.000 E.....	233
Tabelle A 23: Bemessung Belebung nach HSG, 130.000 E, Teil 1 .....	234
Tabelle A 24: Bemessung Belebung nach HSG, 130.000 E, Teil 2.....	235
Tabelle A 25: Bemessung Belebung nach HSG, 130.000 E, Teil 3.....	236
Tabelle A 26: Bemessung Belebung nach HSG, 130.000 E, Teil 4.....	237
Tabelle A 27: Bemessung Nachklärung, 130.000 E.....	238
Tabelle A 28: Berechnung Luftbedarf für 100.000 E (Ausbaugröße 130.00 E), Teil 1 ...	239

Tabelle A 29: Berechnung Luftbedarf für 100.000 E (Ausbaugröße 130.00 E), Teil 2 ...	240
Tabelle A 30: Berechnung der Schlammengen Ozon, 130.000 E .....	241
Tabelle A 31: Berechnung der Schlammengen PAK, 130.000 E.....	242
Tabelle A 32: Hebewerk, 100.000 E .....	243
Tabelle A 33: Rechen, 100.000 E .....	243
Tabelle A 34: Sandfang, 100.000 E .....	244
Tabelle A 35: Vorklärung, 100.000 E .....	245
Tabelle A 36: Belebung, 100.000 E .....	246
Tabelle A 37: Fällmitteldosierung, 100.000 E.....	247
Tabelle A 38: Nachklärung, 100.000 E mit Ozonung .....	247
Tabelle A 39: Nachklärung 100.000 E mit PAK.....	248
Tabelle A 40: Voreindickung 100.000 E mit Ozonung.....	248
Tabelle A 41: Voreindickung 100.000 E mit PAK .....	249
Tabelle A 42: Stabilisierung 100.000 E mit Ozonung.....	249
Tabelle A 43: Stabilisierung 100.000 E mit PAK .....	249
Tabelle A 44: Entwässerung 100.000 E mit Ozonung.....	249
Tabelle A 45: Entwässerung 100.000 E mit PAK .....	250
Tabelle A 46: Flockungsfilter, 100.000 E .....	250
Tabelle A 47: Ozonung, 100.000 E .....	250
Tabelle A 48: Pulveraktivkohle, 100.000 E.....	250
Tabelle A 49: Infrastruktur, 100.000 E .....	251
Tabelle A 50: Grundlagen, 26.000 E.....	252
Tabelle A 51: Bemessung Belebung nach HSG, 26.000 E, Teil 1 .....	253
Tabelle A 52: Bemessung Belebung nach HSG, 26.000 E, Teil 2.....	254
Tabelle A 53: Bemessung Belebung nach HSG, 26.000 E, Teil 3.....	255
Tabelle A 54: Bemessung Belebung nach HSG, 26.000 E, Teil 4.....	256
Tabelle A 55: Berechnung Luftbedarf für 20.000 E (Ausbaugröße 26.000 E), Teil 1 .....	257
Tabelle A 56: Berechnung Luftbedarf für 20.000 E (Ausbaugröße 26.000 E), Teil 2 ....	258
Tabelle A 57: Bemessung Nachklärung, 26.000 E.....	259
Tabelle A 58: Berechnung der Schlammengen Ozon, 26.000 E (20.000 E Anschluss) .....	260

---

Tabelle A 59: Berechnung der Schlammengen PAK, 26.000 E (20.000 E Anschluss) .....	260
Tabelle A 60: Hebewerk, 20.000 E .....	261
Tabelle A 61: Rechen, 20.000 E .....	261
Tabelle A 62: Sandfang, 20.000 E .....	262
Tabelle A 63: Belebung, 20.000 E .....	263
Tabelle A 64: Fällmitteldosierung, 20.000 E.....	264
Tabelle A 65: Nachklärung, 20.000 E mit Ozonung .....	264
Tabelle A 66: Nachklärung 20.000 E mit PAK.....	265
Tabelle A 67: Ozonung, 20.000 E .....	265
Tabelle A 68: Pulveraktivkohle, 20.000 E.....	265
Tabelle A 69: Infrastruktur, 20.000 E .....	266
Tabelle A 70: Entwässerung, 20.000 E mit Ozonung.....	266
Tabelle A 71: Entwässerung, 20.000 E mit PAK .....	266

## Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AFS	abfiltrierbare Stoffe	mg/L
AHTN	Tonalid	
AOL	Abwasserverband Obere Lutter	
AöR	Anstalt öffentlichen Rechts	
BB	Belebungsbecken	
BG	Bestimmungsgrenze	
BHKW	Blockheizkraftwerk	
BSB <sub>5</sub>	biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen	mg/L
BVT	Bettvolumina	m <sup>3</sup> Wasser/ m <sup>3</sup> GAK
C	Kohlenstoff	
CF	Carbon Footprint	
CFD	Computational fluid dynamics	
CH <sub>4</sub>	Methan	
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	
CO <sub>2e</sub>	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf	mg/L
Dif.	Diffusor	
DN	Denitrifikation	
DOC	Dissolved Organic Carbon, gelöster organischer Kohlenstoff	mg/L
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	
E	Einwohner	
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz	
EBCT	Empty Bed Contact Time	
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure (Komplexbildner)	
EG/LV	Emschergenossenschaft / Lippeverband	
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	
EW	Einwohnerwert	
FM	Fällmittel	
FHM	Flockungshilfsmittel	
FZ	Filterzellen	
GA	großtechnischer Adsorber	

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
GAK	granulierte Aktivkohle	
GF	größtechnischer biologischer Filter	
HCCP	Moschusduftstoff	
HHCB	Galaxolid	
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Wasserstoffperoxid	
IDM	induktiver Durchflussmesser	
i.d.R.	in der Regel	
Inj.	Injektor	
ISA	Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen	
KA	Kläranlage	
k. A.	keine Angaben	
KEV	Kumulierter Energieverbrauch	
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	
LCA	Life Cycle Analysis	
LKW	Lastkraftwagen	
MKULNV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	
NN	Normalnull	
NO <sub>2</sub> -N	Nitritstickstoff	mg/L
NRW	Nordrhein Westfalen	
o.J.	ohne Jahresangabe	
O <sub>2</sub>	Sauerstoff	
O <sub>3</sub>	Ozon	
P	Phosphor	
PAK	Pulveraktivkohle	
PE	Primärenergie	
PFOA	Perfluorooctansäure	
PFOS	Perfluorooctansulfonat	
PFT	Perfluorierte Tenside	
PLS	Prozessleitsystem	
PS	Primärschlamm	
PSA	Pressure Swing Adsorption	
PV	Photovoltaik	

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
PW	Pumpwerk	
Q	Volumenstrom	L/s;m <sup>3</sup> /h
Q <sub>T,max</sub>	Spitzenabfluss bei Trockenwetter	L/s;m <sup>3</sup> /h
Q <sub>T,h,max</sub>	maximaler stündliche Trockenwetterabfluss	L/s;m <sup>3</sup> /h
Rezi	Rezirkulation	
RLS	Rücklaufschlamm	
SAK	Spektraler Absorptions-Koeffizient	
TCPP	Tris(2-chlorisopropyl)phosphat	
TKN	Kjeldahl-Stickstoff	
TMDD	2,4,7,9-Tetramethyl-5-decin-4,7-diol (Tensid)	
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff	mg/L
TS	Trockensubstanzgehalt	mg/L
u.a.	unter anderem , unter anderen	
UV	Ultraviolett	
ÜSS	Überschussschlamm	
VE	Versuchseinstellung	
z.B.	zum Beispiel	
z.T.	zum Teil	
η	frachtbezogene Elimination	%



# 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 Nutzungsphase gelangen diese Produkte ins Abwasser und somit in die kommunale Kläranlage. Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften werden diese Stoffe jedoch oft nur unzureichend abgebaut und sind deshalb – wenn auch nur in sehr geringen Konzentrationen – in den Oberflächengewässern zu finden. Vor dem Hintergrund verbesserter Methoden zur Analytik geraten diese sogenannten organischen Spurenstoffe zusehends in das Blickfeld der allgemeinen Wahrnehmung [BODE ET AL., 2010]. Besondere Aufmerksamkeit gilt hierbei den möglichen oder nachgewiesenen öko- und humantoxikologischen Wirkungen dieser Mikroverunreinigungen, die durch Aufbereitung von Oberflächenwasser wieder in das Trinkwasser gelangen können.

Zur Elimination von Spurenstoffen aus Abwasserströmen stehen nach dem derzeitigen Stand der Technik verschiedene oxidative, adsorptive und membranbasierte Verfahren zur Verfügung. Dabei können diese Verfahren entweder in den Abwasserreinigungsprozess integriert oder in nachgeschalteten Stufen einer konventionellen Abwasserreinigungsanlage eingesetzt werden. In einer umfangreichen Studie zur Relevanz von Spurenstoffen in der Ruhr aus dem Jahre 2008 wurde bereits deutlich, dass der Betrieb dieser Verfahren einen großen Energieaufwand erfordert [PINNEKAMP UND MERKEL, 2008].

Genauere Daten zum Energieverbrauch der Verfahren zur Spurenstoffelimination standen vor Beginn dieses Projekts jedoch nicht zur Verfügung. Der Schwerpunkt der bislang durchgeführten Versuche lag auf der Effektivität der Verfahren. Dabei blieb der spezifische Energieverbrauch weitgehend unberücksichtigt. Wurde der Energiebedarf 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 [PINNEKAMP UND MERKEL, 2008]. Lediglich bei der Ozonung liegen großtechnische Erfahrungen hinsichtlich ihres Energiebedarfs vor, die allerdings je nach Abwasserzusammensetzung und Aufbereitungsziel, um mehrere Zehnerpotenzen variieren können.

Ein direkter Vergleich der Verfahrenstechniken wird weiterhin dadurch erschwert, dass es eine Vielzahl von Spurenstoffen gibt, die in den bisherigen Untersuchungen nur zum Teil betrachtet wurde. Wird die Eliminierbarkeit eines speziellen Stoffes durch ein bestimmtes Verfahren festgestellt, so ist dieses Ergebnis nicht unbedingt auf weitere Stoffe derselben oder anderer Gruppen zu übertragen.

Hauptziel dieses Projekts ist es, eine Zusammenfassung der 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.

In der ersten Phase des Projekts wurden die Verfahren zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser betrachtet (siehe PINNEKAMP ET AL., 2011). Die untersuchten Hauptaspekte stellten hierbei die Elimination von Leitsubstanzen, den Energieverbrauch der entsprechenden Anlage und der Herstellung der benötigten Inputstoffe, die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Zusammenstellung der publizierten Kosten dar. Tabelle 1-1 fasst die im Rahmen dieser ersten Phase erhobenen Daten 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, der Reinigungsziele und anderer Randbedingungen sehr unterschiedlich bewertet werden kann, wurden in Tabelle 1-1 teilweise Bandbreiten angegeben.

**Tabelle 1-1: Beurteilung einer Aktivkohlefiltration aus regenerierter GAK, einer Zugabe von Pulveraktivkohle in ein Kontaktbecken, Ozonung, Nanofiltration/Umkehrosmose und Advanced Oxidation Processes bezüglich verschiedener Kriterien**

Verfahren	GAK-Filtration regeneriert	PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken	Ozonung	Nanofiltration/Umkehrosmose	Advanced Oxidation Processes
<b>Kriterium</b>					
<b>Eliminationsleistung</b>	0 bis +	+ bis ++	+	++	+
<b>Energieverbrauch auf der Kläranlage</b>	+	+	0	-	- bis 0
<b>Ganzheitlicher Energieverbrauch</b>	- bis 0	- bis +	+	k. A.	k. A.
<b>CO<sub>2</sub>-Emission</b>	0	- bis +	- bis +	k. A.	k. A.
<b>Kosten</b>	0	0	+	-	0

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse der ersten Phase konnte keine eindeutige Empfehlung für ein Verfahren ausgesprochen werden. Hierzu sind weitere Forschungsarbeiten zur Ermittlung des Energieverbrauchs auf der Kläranlage, des ganzheitlichen Energieverbrauchs und des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes notwendig, die Bestandteil der zweiten Projektphase sind.

In der vorliegenden, zweiten Projektphase werden Daten aus großtechnischen Anlagen mit Spurenstoffelimination ausgewertet. Aus den Betriebsdaten wird eine Eingrenzung der zielführenden Dosierungen möglich, so dass die in Phase I angegebene Bandbreite des Energieverbrauchs auf der Kläranlage, des ganzheitlichen Energieverbrauchs und CO<sub>2</sub>-Emissionen überprüft bzw. begrenzt werden kann. Die Bewertungsmatrix kann somit aktualisiert und angepasst werden. Da die Verfahren der Nanofiltration/Umkehrosmose

und die Advanced Oxidation Processes noch nicht großtechnisch zur Spurenstoffelimination eingesetzt werden und dadurch keine großtechnischen Energieverbrauchsdaten vorliegen, werden in der zweiten Phase ausschließlich die Verfahren der Ozonung und der Adsorption an Aktivkohle (Pulveraktivkohle (PAK) und granuliert Aktivkohle (GAK)) betrachtet.

Die erfassten Daten werden im Hinblick auf folgende Aspekte ausgewertet:

- Betrachtung der verschiedenen Versuchseinstellungen (u.a. Variation der Dosierungen und der Zulaufmengen)
- Ermittlung der spezifischen Energieverbräuche mit Bezug auf das behandelte Abwasservolumen (in m<sup>3</sup>), die angeschlossenen Einwohnerwerte (in E-a) sowie auch auf die die konventionelle Abwasserreinigung verlassende Restbelastung (z. B. in mg DOC)
- Daten zur Eliminationsleistung werden aus den anderen Projekten aus dem Themenschwerpunkt „Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen“ ([www.micropollutants.net](http://www.micropollutants.net)) herangezogen.

Weiterhin werden in der 2. Phase tabellarische Modellanlagen zur Bemessung und Ermittlung von Idealwerten gemäß DWA-A216 für zwei Kläranlagen mit vierter Reinigungsstufe und mit für Nordrhein-Westfalen (NRW) üblichen Größenordnungen vorgestellt. Dabei werden geeignete Verfahrenskonzepte ausgewählt und der entsprechende Energiebedarf untersucht. Mit diesen Modellanlagen kann insbesondere die Beurteilung der Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch auf Basis realer Daten erfolgen. Dies ist relevant, da verschiedene Untersuchungen zeigen, dass reale Energieverbräuche auf kommunalen Kläranlagen häufig über den Idealwerten der Modellanlagen liegen.

Außerdem werden generelle Maßnahmen zur Energieoptimierung bei der Spurenstoffelimination identifiziert und CO<sub>2</sub>-neutrale Kompensationsmöglichkeiten zur Energiebereitstellung für die Deckung des zusätzlichen Energieverbrauchs aufgezeigt.

Ziel dieser Auswertung ist es, die in Phase I aus Literaturdaten ermittelten Bandbreiten für die verschiedenen Kriterien zur Beurteilung der Verfahren zur Spurenstoffelimination einzugrenzen und somit eine bessere Bewertung der Verfahren vorzunehmen. Die Erkenntnisse aus Phase I hinsichtlich

- der Energieverbräuche auf der Kläranlage,
- des ganzheitlichen Energieverbrauchs der Verfahren zur Spurenstoffelimination,
- der Modellkläranlage,
- und der CO<sub>2</sub>-Bilanzen

sollen mit den großtechnischen Daten aktualisiert werden.

## 2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Phase I zum Energiebedarf auf der Kläranlage

Es werden zunächst die Ergebnisse aus Phase I zum Energiebedarf auf der Kläranlage (KA) wiedergegeben, um im Folgenden die ermittelten Daten der großtechnischen Anlagen einordnen zu können. In Phase I wurden ein minimales, mittleres und maximales Szenario für unterschiedliche Dosiermengen betrachtet und Bandbreiten für den Energieverbrauch aufgestellt. Für die ausführlichen Herleitungen wird auf [PINNEKAMP ET AL, 2011] verwiesen. In Tabelle 2-1 findet sich eine Zusammenfassung der Werte für den elektrischen Energiebedarf (in kWh je m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser) auf der Kläranlage.

**Tabelle 2-1: Zusammenfassung des elektrischen Energiebedarfs auf der Kläranlage**

		<b>Mittelwert [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Spannweite [kWh/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Ozon</b>	Bei Anlieferung von Reinsauerstoff	0,16	0,02 – 0,41
	Bei Herstellung von Reinsauerstoff *	0,26	0,05 – 0,63
<b>PAK</b>	Kontaktbecken	0,075	0,02 – 0,13
	Flockungsraum eines Filters	0,07	0,05 – 0,09
<b>GAK</b>	Frisch und regeneriert	0,11	0,06 – 0,17

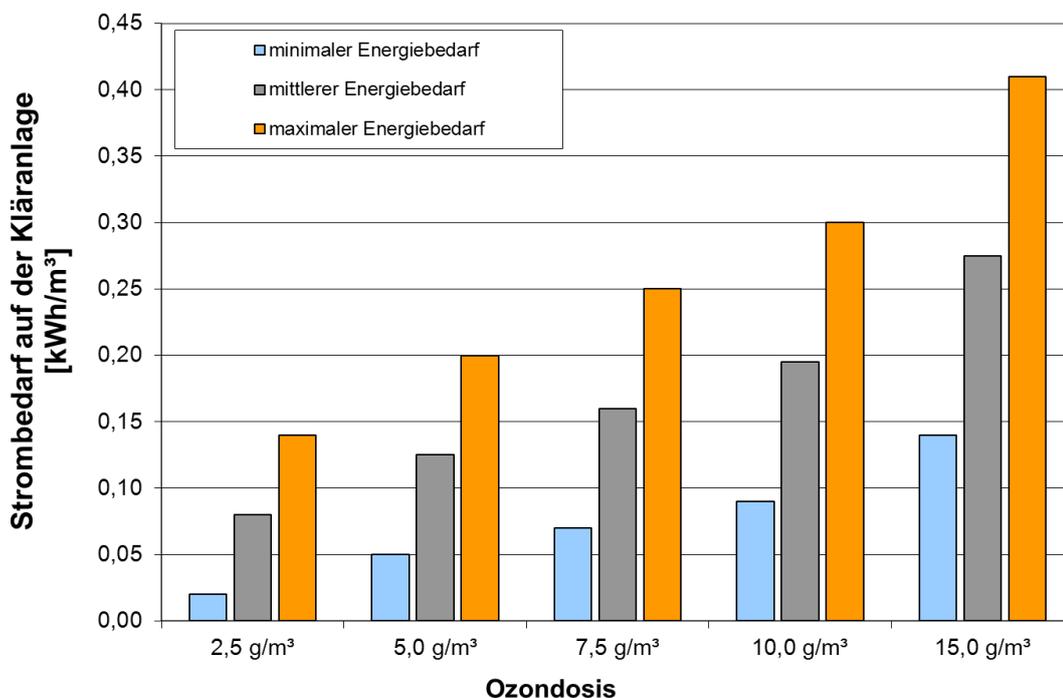
\* die Herleitung dieser Werte findet sich in Kapitel 5.1.2, da der Energieverbrauch auf der Kläranlage dem ganzheitlichen entspricht. Diese Variante wird bei den in Phase II untersuchten großtechnischen Anlagen nicht angewendet.

### 2.1 Ozonung

Für eine Ozonung wird auf der Kläranlage als Energiequelle nur elektrische Energie verwendet. Zur Berechnung des Strombedarfs auf der Kläranlage aus Literaturdaten wurden in Phase I zunächst die einzelnen Teilschritte betrachtet. Anschließend wurde ein Gesamtstrombedarf angegeben, der sich aus den möglichen Kombinationen ergibt. Es wird zunächst von einer Anlieferung von Flüssigsauerstoff ausgegangen, da die im Folgenden betrachteten großtechnischen Anlagen ebenfalls mit Flüssigsauerstoff beliefert werden. Die Berechnung wurde in Abhängigkeit der Ozondosis durchgeführt, um den Einfluss dieses Parameters zu verdeutlichen. Die fünf gewählten Ozondosierungen lagen zwischen 2,5 g/m<sup>3</sup> und 15 g/m<sup>3</sup> (g Ozon je m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser). Unter Berücksichtigung der großen Anzahl an variablen Parametern wurde für jede Ozondosis ein minimales, mittleres und maximales Szenario zusammengestellt (vgl. Bild 2-1), wobei das mittlere Szenario jeweils dem Mittelwert des minimalen und des maximalen Szenarios entspricht.

Aus den zusammengestellten Daten ergab sich, dass eine Ozonung bei Anlieferung von Flüssigsauerstoff im Mittel 0,16 kWh/m<sup>3</sup> auf der Kläranlage benötigt. In Abhängigkeit der gewählten Betriebsparameter und Gegebenheiten schwankt dieser Strombedarf zwischen

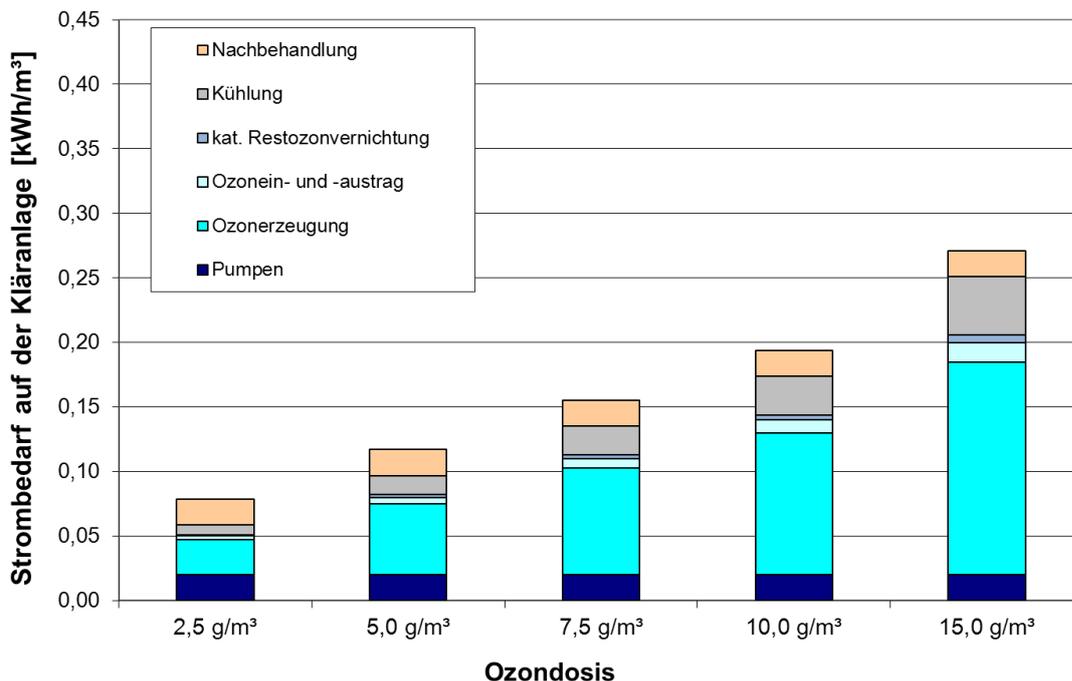
- 0,02 kWh/m<sup>3</sup> bei niedriger Ozondosis (2,5 g/m<sup>3</sup>) und günstigen Randbedingungen (kein extra Hebewerk zur Beschickung der Ozonstufe nötig, Kühlung mit Abwasser, Nachbehandlung im Schönungsteich) und
- 0,41 kWh/m<sup>3</sup> bei höchster Ozondosis (15 g/m<sup>3</sup>) und ungünstigen Randbedingungen (10 m Förderhöhe, Kühlung mit Kühlaggregat, Nachbehandlung im Sandfilter).



**Bild 2-1: Minimaler, mittlerer und maximaler Strombedarf auf der Kläranlage bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis**

Für das minimale Szenario wurde davon ausgegangen, dass kein Hebewerk benötigt wird. Für das maximale Szenario wurde von 10 m Förderhöhe ausgegangen, für das mittlere Szenario entsprechend 5 m. Der Strombedarf des Ozongenerators wurde für das minimale Szenario mit 8 kWh/kg O<sub>3</sub> und für das maximale Szenario mit 14 kWh/kg O<sub>3</sub> angenommen [z.B. MIELCKE, 2010 in BEIER, 2010; OZONIA, 2011]. Der Ein- und Austrag von Ozon wurde mit 1 kWh/kg O<sub>3</sub> berücksichtigt [BAHR ET AL., 2007]. Zudem wurde eine katalytische Restozonvernichtung betrachtet, die 0,4 kWh/kg O<sub>3</sub> benötigt [HERBST UND ANTE, 2010]. Ein großer Einfluss kommt der Kühlung des Ozongenerators zu. Bei einer Verwendung von gereinigtem Abwasser wurde hier der Strombedarf der Pumpen vernachlässigt. Für ein Kühlaggregat wurden 6 kWh/kg O<sub>3</sub> berücksichtigt [HERBST UND ANTE, 2010]. Die Nachbehandlung wurde für das minimale Szenario in einem Schönungsteich ohne Strombedarf angenommen. Für einen Sandfilter wurde ein Strombedarf von 0,05 kWh/m<sup>3</sup> angesetzt (maximales Szenario) [ABEGGLEN ET AL., 2009B].

Die Aufteilung des Strombedarfs ist in Bild 2-2 für das mittlere Szenario dargestellt, wobei nur die Ozondosis variiert wird. Hauptstromverbraucher sind die Ozonerzeugung und die Kühlung des Ozongenerators. Ozoneintrag und Restozonvernichtung spielen nur eine untergeordnete Rolle.



**Bild 2-2:** Aufteilung des Strombedarfs auf der Kläranlage bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis

## 2.2 Adsorptive Verfahren

### 2.2.1 Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken

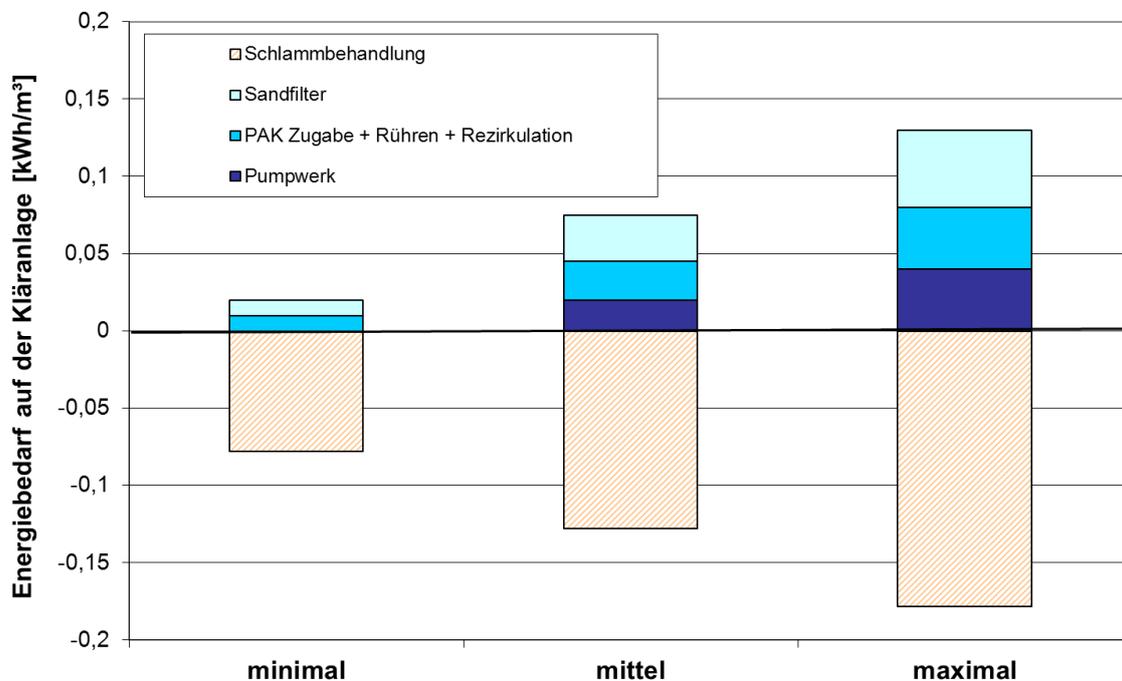
Bei der Ermittlung des Energiebedarfs auf der Kläranlage bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken aus Literaturdaten wurde in Phase I analog zur Ozonung vorgegangen. Die Berechnung erfolgte unabhängig der PAK-Dosis, da diese kaum Einfluss auf den elektrischen Energiebedarf auf der Kläranlage hat. Lediglich die Werte für die Schlammbehandlung variieren je nach PAK-Dosis, hauptsächlich im thermischen Energiegewinn, der elektrische Mehrbedarf an Energie ist äußerst gering. Diese Unterschiede flossen in die Betrachtung des minimalen, mittleren und maximalen Szenarios ein, indem beim minimalen Szenario 5 g/m³ und beim maximalen 20 g/m³ angesetzt wurden. Insgesamt ergab sich, dass eine PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken im Mittel 0,075 kWh/m³ auf der Kläranlage benötigt. In Abhängigkeit der gewählten Betriebsparameter und Gegebenheiten schwankt dieser Strombedarf zwischen

- 0,02 kWh/m³ bei günstigen Randbedingungen (kein extra Hebewerk zur Beschickung der PAK-Adsorptionsstufe nötig, Annahme eines niedrigen Strombedarfs für PAK-Zugabe, Rühren, Rezirkulation und Sandfilter) und
- 0,13 kWh/m³ bei ungünstigen Randbedingungen (10 m Förderhöhe, Annahme eines hohen Strombedarfs für PAK-Zugabe, Rühren, Rezirkulation und Sandfilter).

Demgegenüber stehen thermische Energiegewinne von 0,081 bis 0,184 kWh/m³.

Für das minimale Szenario wurde wiederum davon ausgegangen, dass kein Hebwerk benötigt wird. Für das maximale Szenario wurde von 10 m Förderhöhe ausgegangen. Die Adsorptionsstufe erfordert Strom für die Zugabe von PAK, Rührwerke im Kontaktbecken und die Rezirkulation sowie den Schlammabzug im Absatzbecken. Der Energieeintrag in das Kontaktbecken liegt bei 8 bis 20 W pro  $\text{m}^3$  Beckenvolumen [RÖLLE UND SCHIRMEISTER, 2010; ALT UND MAURITZ, 2009]. In Anlehnung an Literaturquellen wurden für die gesamte Adsorptionsstufe im günstigsten Fall  $0,01 \text{ kWh/m}^3$  [ABEGGLEN ET AL., 2009B], im ungünstigsten Fall  $0,04 \text{ kWh/m}^3$  [HERBST UND ANTE, 2010] und dazwischen  $0,025 \text{ kWh/m}^3$  [HERBST UND ANTE, 2010] angenommen. Die Abtrennung der PAK erfolgt mit einem Sandfilter. Hierfür wurde ein Strombedarf zwischen  $0,01 \text{ kWh/m}^3$  [FAHLENKAMP ET AL., 2008] und  $0,05 \text{ kWh/m}^3$  angesetzt [ABEGGLEN ET AL., 2009]. Der energetische Mehrbedarf für die Schlammbehandlung durch den zusätzlichen Schlammanteil lag je nach Dosiermenge zwischen  $0,003$  bis  $0,006 \text{ kWh/m}^3$ . Auf den thermischen Energiebedarf der Kläranlage wirkt sich der PAK-Anteil im Schlamm durch den hohen Heizwert günstig aus, da von einer Verbrennung vor Ort ausgegangen wird. Hier liegt der Energiegewinn zwischen  $0,081 \text{ kWh/m}^3$  und  $0,184 \text{ kWh/m}^3$ . In die Berechnungen sind u.a. Daten von METZGER (2010), STEIDEL (2006) und HILLER (2010) eingeflossen und sind in PINNEKAMP ET AL. (2011) nachzuvollziehen.

In Bild 2-3 sind die Szenarien dargestellt, wobei die Aufteilung auf die einzelnen Verbraucher ebenfalls zu sehen ist. In der Schlammbehandlung ist der elektrische und thermische Energiebedarf zusammengefasst.



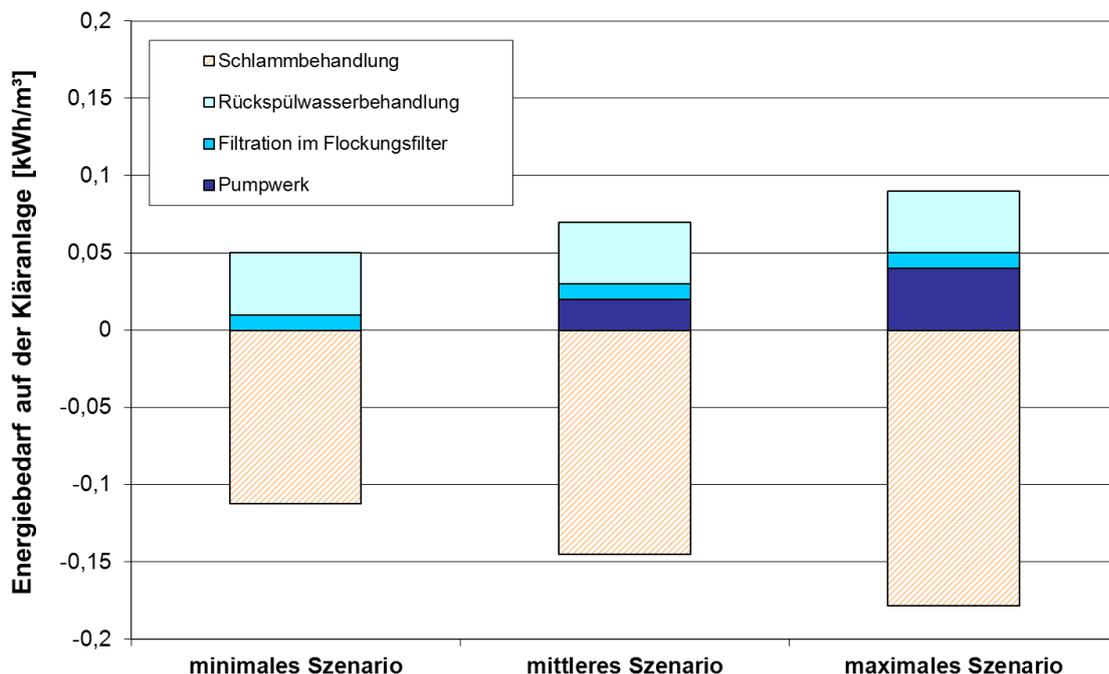
**Bild 2-3: Energiebedarf (thermisch und elektrisch) auf der Kläranlage für Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken**

### 2.2.2 Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters

Der Energiebedarf einer Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters konnte in Phase I nur abgeschätzt werden, da kaum Angaben zusammengetragen werden konnten.

Für das Hebewerk wurden wie bei den anderen Betrachtungen Förderhöhen von 0 m, 5 m und 10 m angesetzt. Für den Betrieb des Filters wurde mit  $7,4 \text{ Wh/m}^3$  [BARJENBRUCH, o.J.] ein Wert für konventionelle Filteranlagen übernommen. Für die Rückspülwasserbehandlung wurden  $0,04 \text{ kWh/m}^3$  berücksichtigt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Zahl ist in PINNEKAMP ET AL. (2011) dargestellt und beruht auf Angaben von BARJENBRUCH (o.J.) und HABERKERN ET AL. (2008). Der energetische Mehrbedarf bzw. Energiegewinn durch die Schlammbehandlung ist analog zur Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken angesetzt worden. Die betrachteten Dosiermengen sind hierbei höher als bei Zugabe in ein Kontaktbecken und betragen  $10 \text{ g/m}^3$ ,  $15 \text{ g/m}^3$  und  $20 \text{ g/m}^3$ .

Es ergibt sich ein Strombedarf von  $0,05$  bis  $0,09 \text{ kWh/m}^3$ , im Mittel von  $0,07 \text{ kWh/m}^3$ . Der thermische Energiegewinn liegt bei  $0,115$  bis  $0,184 \text{ kWh/m}^3$ . In Bild 2-4 sind die Szenarien dargestellt, wobei die Aufteilung auf die einzelnen Verbraucher ebenfalls zu sehen ist. In der Schlammbehandlung ist der elektrische und thermische Energiebedarf zusammengefasst.



**Bild 2-4: Energiebedarf (thermisch und elektrisch) auf der Kläranlage für Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters**

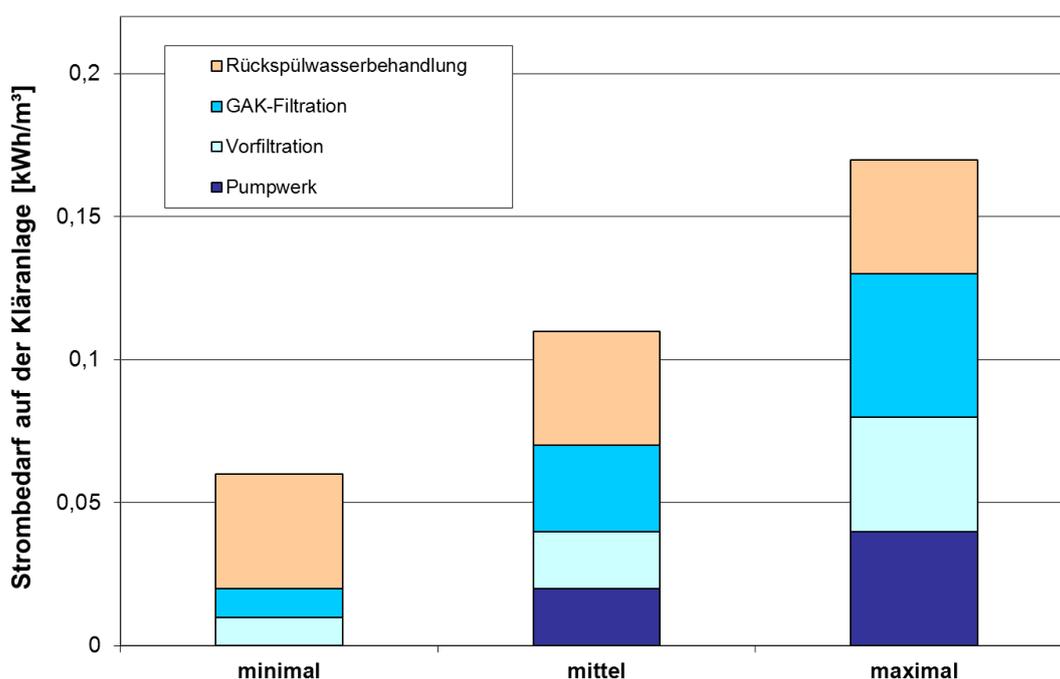
### 2.2.3 Filtration über GAK

Nach gleicher Vorgehensweise erfolgte in Phase I die Ermittlung des Strombedarfs auf der Kläranlage bei Filtration über GAK aus Literaturdaten. Wieder wurden ein minimales, mittleres und maximales Szenario zusammengestellt. Diese sind zusammen mit der Aufteilung auf die einzelnen Verbraucher in Bild 2-5 zu sehen.

Für die Filtration über GAK wird auf der KA nur elektrische Energie benötigt und auch keine thermische Energie erzeugt. Es ergab sich kein Unterschied zwischen frischer oder regenerierter Aktivkohle.

Aus den zusammengestellten Daten ergab sich, dass die Filtration über GAK im Mittel  $0,11 \text{ kWh/m}^3$  auf der Kläranlage benötigt. In Abhängigkeit der gewählten Betriebsparameter und Gegebenheiten schwankt dieser Strombedarf zwischen

- $0,06 \text{ kWh/m}^3$  bei günstigen Randbedingungen (kein Hebewerk nötig, Annahme eines niedrigen Strombedarfs für die Vorfiltration und GAK-Filtration) und
- $0,17 \text{ kWh/m}^3$  bei ungünstigen Randbedingungen (10 m Förderhöhe, Annahme eines hohen Strombedarfs für Vorfiltration und GAK-Filtration).



**Bild 2-5: Strombedarf auf der Kläranlage für eine nachgeschaltete Filtration über GAK (frisch oder regeneriert)**

Für das minimale Szenario wurde wiederum davon ausgegangen, dass kein Hebewerk benötigt wird. Für das maximale Szenario wurde von 10 m Förderhöhe ausgegangen.

Es wird eine Vorbehandlung des Abwassers zur Entfernung von Feststoffen berücksichtigt. Als Sandfiltration wurden hierfür  $0,01 \text{ kWh/m}^3$  für einen kontinuierlich gespülten Sandfilter [FAHLENKAMP ET AL., 2008] oder  $0,04 \text{ kWh/m}^3$  [PINNEKAMP UND MERKEL, 2008] angesetzt. Alternativ wurde ein Mikrosieb mit  $0,02 \text{ kWh/m}^3$  [PINNEKAMP UND MERKEL, 2008] veranschlagt. Für die GAK-Filtration wurde für das niedrige Szenario  $0,01 \text{ kWh/m}^3$  in Anlehnung an FAHLENKAMP ET AL. (2008) angenommen. In Anlehnung an IVASHECHKIN (2006) wurde für das maximale Szenario  $0,05 \text{ kWh/m}^3$  gewählt. Zusätzlich wurde für ein mittleres Szenario  $0,03 \text{ kWh/m}^3$  gewählt. Für die Rückspülwasserbehandlung wurden wie bei der Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters  $0,04 \text{ kWh/m}^3$  berücksichtigt.

### 3 Untersuchte Kläranlagen

Schwerpunktmäßig werden in dieser zweiten Projektphase die Daten der Kläranlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden ausgewertet. Die Verfahren der Ozonung sowie der PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken im Rezirkulationsbetrieb sind somit berücksichtigt. Die Erkenntnisse der ersten Projektphase zeigen, dass keine Verfahrenskonfiguration für alle Bewertungskriterien (Spurenstoffelimination, Energieverbrauch vor Ort, ganzheitlicher Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Bilanz und Kosten) den anderen Verfahren überlegen ist. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, neben den schwerpunktmäßig berücksichtigten drei Anlagen, weitere großtechnische Anlagen im Rahmen der Möglichkeiten zu betrachten.

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Datenlage werden zum einen Energiedaten aus dem Projekt „Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle“ (AZ IV-7-042 600 001 E) [BORNEMANN ET AL., 2012] aus dem Themenschwerpunkt „Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen“ zur Ergänzung dieses Projekts ausgewertet. Dies sind die Anlagen Wuppertal-Buchenhofen, bei der PAK in den Flockungsraum eines Filters dosiert wird und die KA Düren, bei der eine Filterzelle mit GAK umgerüstet wurde. Zum anderen werden als weitere Anlagen mit Filtration über GAK Erkenntnisse der Anlagen Obere Lutter und Gütersloh-Putzhagen betrachtet. Hinsichtlich der Adsorption an Pulveraktivkohle werden zusätzlich Informationen der Adsorptionsstufen in Mannheim und Kressbronn-Langenargen betrachtet. Tabelle 3-1 gibt eine Übersicht über die näher betrachteten KA.

**Tabelle 3-1: Untersuchte Kläranlagen**

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

Detaillierte Angaben zu den erfassten Daten sind der Anlage zu diesem Bericht zu entnehmen.

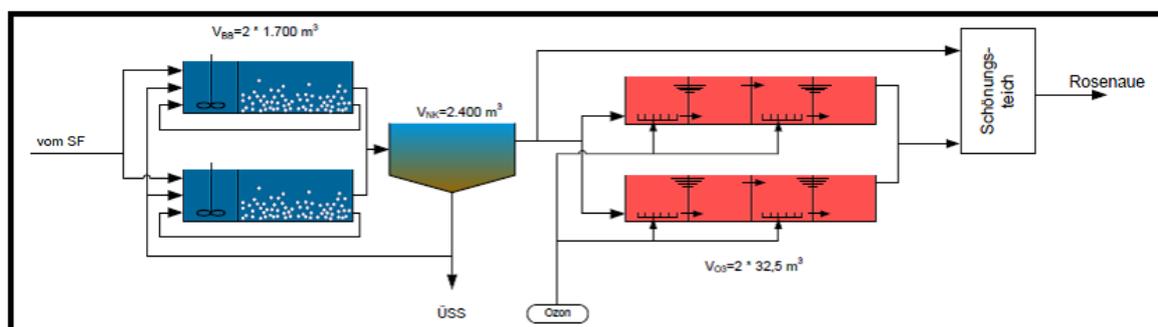
### 3.1 Bad Sassendorf

Die Kläranlage Bad Sassendorf behandelt das Abwasser von etwa 12.000 E, davon 2.950 E aus Krankenhäusern und Kliniken. Die geforderten Ablaufwerte werden sicher eingehalten, ein Ausbau der biologischen Stufe ist derzeit nicht geplant. Folgende Randbedingungen führten zur Entscheidung am Standort Bad Sassendorf eine Ablaufozonung zu errichten:

- Die Gemeinde hat bei ca. 12.000 E und 1.200 Betten in sechs Kliniken einen sehr hohen Anteil an Klinikabwasser.
- Die Gemeinde hat eine Altersstruktur, wie sie aufgrund des demografischen Wandels im übrigen NRW erst in 30 bis 40 Jahren erwartet wird. Die aktuelle Altersstruktur führt damit ebenfalls zu überdurchschnittlichen Arzneimittelkonzentrationen im Abwasser.
- Das Abwasser im Zulauf der Kläranlage Bad Sassendorf ist kommunal geprägt und weitgehend frei von industriellen Einflüssen.

Der Einsatz der Ozonung in Bad Sassendorf ergibt sich als weiterer Schritt zur Untersuchung innovativer Abwasserbehandlungsverfahren aus den Ergebnissen der halbtechnischen Versuche am Standort Bottrop, wo im Rahmen eines Forschungsvorhabens verschiedene Verfahrenstechniken auf ihre Eignung zur Elimination organischer Spurenstoffe bei der Emschergenossenschaft / Lippeverband geprüft wurden.

Das Fließschema der Ozonanlage in Bad Sassendorf ist in Bild 3-1 dargestellt. Die Ozonung wurde auf eine Wassermenge von 300 m<sup>3</sup>/h (Trockenwetterzufluss) ausgelegt. Eine Auslegung auf den Spitzenzufluss der Kläranlage erschien im Hinblick auf den Pilotstatus der Anlage nicht sinnvoll. Zudem kann der Nachweis der Leistungsfähigkeit durch die bei niederschlagsbedingter Verdünnung sehr niedrigen Spurenstoffkonzentrationen analytisch nicht erbracht werden.



**Bild 3-1: Fließschema der Ozonanlage in Bad Sassendorf [ARGE, 2014]**

Das zu behandelnde Abwasser wird zunächst in einen abgedeckten Mischbehälter geleitet, in dem sich durch entsprechende Gestaltung des Reaktors eine Pfropfenströmung ausbildet. Das Becken ist zweistraßig konstruiert und besitzt ein Gesamtvolumen von 65 m<sup>3</sup>. Die Aufenthaltszeit des Abwassers im Mischbecken beträgt etwa 13 Minuten bei der Auslegungswassermenge von 300 m<sup>3</sup>/h. Die Wassermenge wird durch einen induktiven Durchflussmesser (IDM) erfasst und durch einen Schieber

automatisch geregelt. Die überschüssige Wassermenge wird über eine Wehrschwelle direkt zum Kläranlagenablauf geleitet. Durch Sollwertvorgaben für die Wassermenge sowie durch Umfahren einer der beiden Straßen kann die Reaktionszeit im Becken in weiten Grenzen variiert werden. Eine hydraulische Beaufschlagung des Beckens mit bis zu  $650 \text{ m}^3/\text{h}$  ist möglich. Aufgrund der günstigen Verhältnisse vor Ort muss das Wasser nicht gepumpt werden, da die gesamte Anlage im freien Gefälle durchflossen wird. [ARGE, 2011]

Ozon wird aus angeliefertem Reinsauerstoff hergestellt und durch Keramik-Diffusoren an der Beckensohle eingetragen. Die Gasmengen der einzelnen Stränge des Eintragungssystems können weitgehend unabhängig voneinander eingestellt werden. Der Ozongenerator wurde für Dosierungen zwischen  $5$  und  $20 \text{ g/m}^3$  ausgelegt; im Versuchszeitraum wurden jedoch auch geringere Dosierungen appliziert ( $2 \text{ g/m}^3$ ). Die Ozonanlage kann zudem in Abhängigkeit der UV-Absorption (SAK bei  $254 \text{ nm}$ ) gesteuert bzw. überwacht werden. [ARGE, 2014]

Nach der Ozonbehandlung wird das Abwasser dem vorhandenen Nachbehandlungsteich mit einer mittleren Aufenthaltszeit von  $1,35$  Tagen zugeführt. Hier können ggf. im Ablauf der Ozonung enthaltene Restprodukte weiter biologisch abgebaut werden, bevor das behandelte Abwasser in den Vorfluter Rosenau eingeleitet wird.

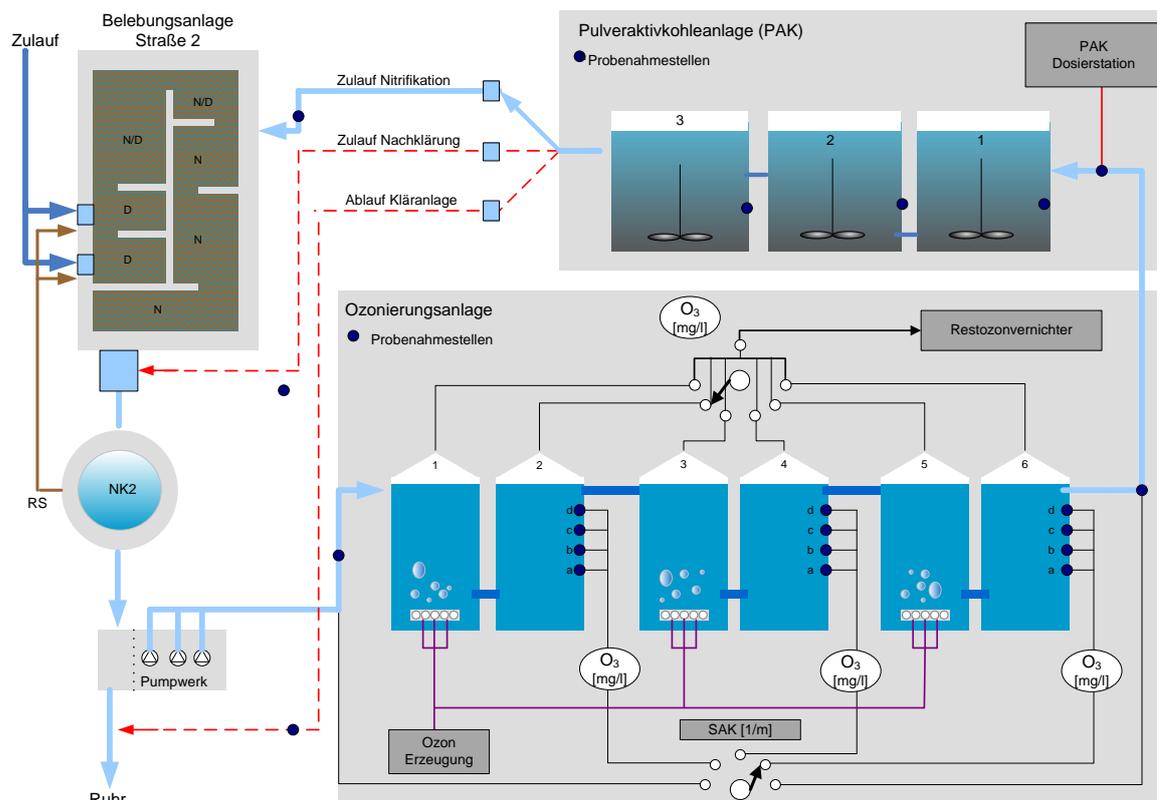
### 3.2 Schwerte

Die Ausbaugröße der Kläranlage Schwerte beträgt  $50.000 \text{ E}$ . Im Einzugsgebiet befinden sich zwei Krankenhäuser, eine Klinik und drei große Industriebetriebe. Die mechanische Vorbehandlung besteht aus einem Filterstufenrechen mit einer Spaltweite von  $6 \text{ mm}$ , einem 2-straßigen Langsandfang sowie einer 1-straßigen Vorklärung mit einem Volumen von  $450 \text{ m}^3$ . Die biologische Reinigung findet in zwei parallelen, verfahrenstechnisch völlig trennbaren Belebungsstraßen mit einem Volumen von jeweils  $7.800 \text{ m}^3$  statt. Hier findet eine vorgeschaltete Denitrifikation statt, die Stickstoffelimination ist im Weiteren kaskadiert. Es schließt sich an jede Belebungsstraße ein rundes, horizontal durchströmtes Nachklärbecken mit einem Volumen von  $963 \text{ m}^3$  an. [ARGE, 2011]

Die Kläranlage ist auf einen Mischwasserzufluss von maximal  $640 \text{ L/s}$ , pro Straße also  $320 \text{ L/s}$  ausgelegt. Die Differenz zwischen dem aktuellen Zufluss zur Belebungsstraße 2 und der maximalen hydraulischen Leistungsfähigkeit der Nachklärung 2 ( $320 \text{ L/s}$ ) wird entnommen und einer weitergehenden Reinigung zugeführt, sodass die Nachklärung immer mit maximalem Volumenstrom beaufschlagt wird. Mit diesem Volumenstrom von  $90$  bis  $1.150 \text{ m}^3/\text{h}$  wird zunächst ein 6-teiliger, kaskadierter Reaktionsbehälter (je  $32 \text{ m}^3$ ) beschickt. In Reaktor 1, 3 und 5 können über feinblasige Keramikteller bis zu  $8 \text{ kg}$  Ozon pro Stunde eingeblasen werden. Das Ozon wird in einem mit Abwasser gekühlten Ozongenerator aus angeliefertem Reinsauerstoff hergestellt. Die Ozondosierung ist in Abhängigkeit verschiedener Parameter im Bereich bis  $10 \text{ g/m}^3$  regelbar (Zulaufmenge, Ozon-Konzentration im Reaktor und der Abluft, Rest-DOC im Ablauf der Nachklärung).

Nach der Ozonung kann fakultativ eine Pulveraktivkohledosierung in drei nachgeschalteten Reaktionsbehältern mit einem Gesamtvolumen von 450 m<sup>3</sup> (Aufenthalt zwischen 23 min und 3 h) erfolgen. Versuchseinstellungen für die PAK-Dosis betragen 5, 10, 15 und 20 g/m<sup>3</sup>. Für die Versuche wurde die Kohle SAE Super von Norit gewählt. Für die Auswahl wird auf ARGE (2011) verwiesen.

Der Ablauf der PAK-Anlage wird entweder in die Nitrifikationsstufe oder in die Nachklärung rückgeführt. Wenn keine PAK-Dosierung erfolgt, ist auch eine direkte Einleitung in den Vorfluter Ruhr möglich. Im Rahmen der Versuche wurde der behandelte Teilstrom in die biologische Reinigungsstufe zurückgeführt und somit ein Rezirkulationsbetrieb umgesetzt. In Bild 3-2 ist das Fließschema der KA Schwerte abgebildet.



**Bild 3-2: Weitergehende Behandlung mit Ozon und/oder Pulveraktivkohle auf der Kläranlage Schwerte**

Der aus der Anlage entnommene Schlamm wird einem Eindicker, einer Faulung mit angeschlossenen Blockheizkraftwerk (BHKW) sowie einer Entwässerung zugeführt.

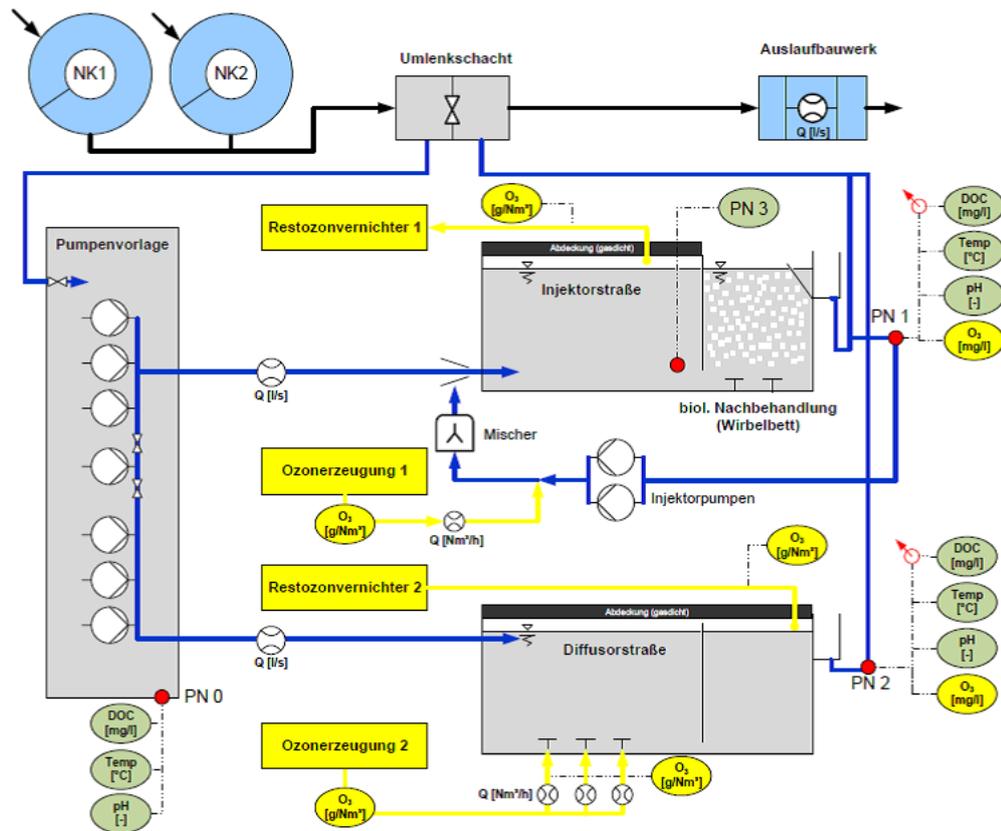
### 3.3 Duisburg-Vierlinden

Die Kläranlage in Duisburg-Vierlinden mit einer Ausbaugröße von 30.000 E wird von den Wirtschaftsbetrieben Duisburg AöR betrieben. Mit Ausnahme einer Suchtklinik werden dort hauptsächlich häusliche Abwässer behandelt. Nach einer mechanischen Reinigung, bestehend aus einer Rechenanlage, einem Fett- und Sandfang und einer Vorklärung wird das Abwasser in einer Denitrifikationsstufe (zweistufig) und einer Nitrifikationsstufe (4 Umlaufbecken) biologisch behandelt.

Der Ablauf der Nachklärung wird der zweistraßigen Ozonanlage zugeführt. Diese ist so ausgelegt, dass bei Trockenwetterzufluss  $Q_T = 400 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $200 \text{ m}^3/\text{h}$  je Straße) eine Aufenthaltszeit von 0,5 h realisiert werden kann. Bei Regenwetter umfließt ein Teil des Ablaufs die Ozonanlage und gelangt direkt in das Auslaufbauwerk (s. Bild 3-3). [ARGE, 2011]

Die Ozonanlage besteht aus zwei parallelen Straßen, die jeweils von einem eigenen Ozongenerator versorgt werden. Ozon wird aus angeliefertem Reinsauerstoff hergestellt. Die Steuerung der Ozonmengen kann über die Zuflusswassermenge in die jeweilige Straße oder alternativ über den DOC-Wert des Abwassers im Zulauf zur Anlage erfolgen. Beide Straßen unterscheiden sich dadurch, dass in der einen Straße Ozon über Diffusoren und in der anderen über ein Pumpen-Injektor-System eingebracht wird. Über mehrere Probenahmestellen entlang der Ozonreaktionsbecken kann der Einfluss der Ozonung auf die Abwasserbestandteile verfolgt werden.

Der Ablauf der ersten Straße wird in einem Wirbelbettreaktor biologisch nachbehandelt, um die in der Ozonung entstehenden Transformationsprodukte zu reduzieren. Aus dem Auslaufbauwerk wird der Ablauf in der Rhein eingeleitet.



**Bild 3-3: Weitergehende Behandlung mit Ozon auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden [ARGE, 2014]**

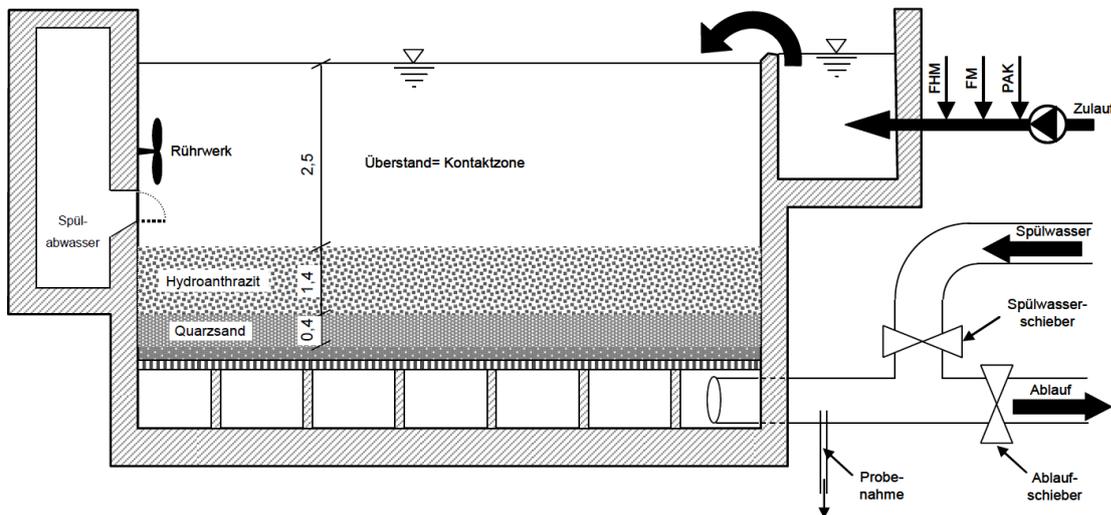
### 3.4 Wuppertal-Buchenhofen

Die Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen hat eine Ausbaugröße von 600.000 E. Es werden die Abwässer aus großen Teilen des Wuppertaler Stadtgebiets, die zu 94 % im Trennsystem entwässern und angrenzender Ortschaften behandelt. Zudem enthält der Zulauf industrielle und gewerbliche Anteile. [WUPPERVERBAND, o.J.]

Das Abwasser durchläuft einen Rechen, einen Sand- und Fettfang sowie zwei Vorklärbecken mit einem Volumen von 9.450 m<sup>3</sup>. Die biologische Behandlung erfolgt mit vorgeschalteter Denitrifikation. Die zwölf Becken weisen ein Volumen von 49.000 m<sup>3</sup> auf. Die Nitrifikation besteht aus 6 Straßen mit 18 Einzelkammern und einem Gesamtvolumen von 54.000 m<sup>3</sup>. Es schließen sich 10 Nachklärbecken mit einem Gesamtvolumen von 63.000 m<sup>3</sup> an. Der Klärschlamm wird gefault, entwässert und auf dem Klärwerk verbrannt. [WUPPERVERBAND, o.J.]

Vom Nachklärbecken fließt das gereinigte Abwasser im freien Gefälle der Flockungsfiltration zu. Diese besteht aus 28 offenen, abwärts durchströmten Mehrschichtfiltern (1,4m Hydroanthrazit, 0,4 m Quarzfiltersand). Jeder Mehrschichtfilter hat eine Filterfläche von 60 m<sup>2</sup>, so dass insgesamt eine Filterfläche von 1.680 m<sup>2</sup> zur Verfügung steht. Der Filterüberstand beläuft sich auf 2,5 m so dass das Volumen 150 m<sup>3</sup> entspricht. [WUPPERVERBAND, o.J.]

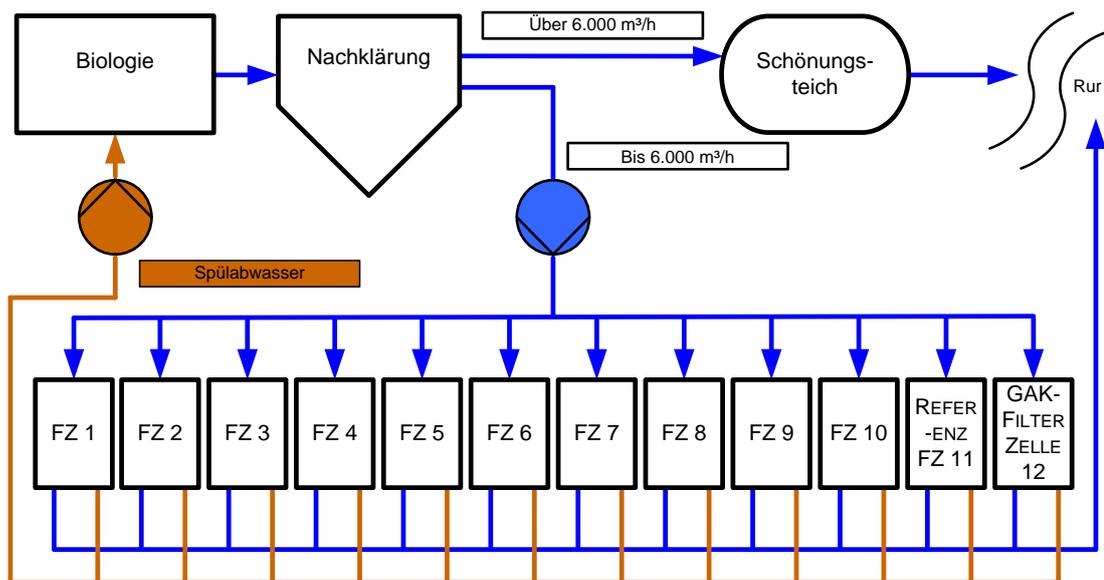
Zunächst ist eine der 28 Filterzellen für den Versuchsbetrieb mit Pulveraktivkohle (PAK) umgerüstet worden, in der bis zu 200 L/s behandelt werden. Hierzu wurde der Zulauf vom Freispiegelzufluss abgekoppelt und wird nun über zwei Tauchmotorpumpen realisiert. Somit lassen sich definierte hydraulische Bedingungen einstellen. Die Beschickung erfolgte für erste Versuche konstant, für weitere dann dynamisch mit Bezug zur Anlagenhydraulik. Die PAK sowie Fällmittel (Eisensalz) werden in den Zulaufstrom zum Filter dosiert. Der Überstauraum wird mit einem Rührwerk umgewälzt, um die PAK in Schwebelage zu halten. Die Kontaktzeit beträgt bei Trockenwetter rund 50 min und bei Mischwasserzufluss 12,5 min. Die im Raumfilter abgeschiedene PAK wird dort weiter beladen. Mit der Filtrerrückspülung wird die PAK entnommen. Über den Spülwasserspeicher wird sie dem Zulauf der Kläranlage zugegeben und mit dem Primärschlamm entsorgt. [BORNEMANN ET AL., 2012] Ein Schema der umgerüsteten Filterzelle ist Bild 3-4 zu entnehmen.



**Bild 3-4:** Zur PAK-Dosierung umgerüstete Filterzelle der KA Buchenhofen [BORNEMANN ET AL., 2012]

### 3.5 Düren-Merken

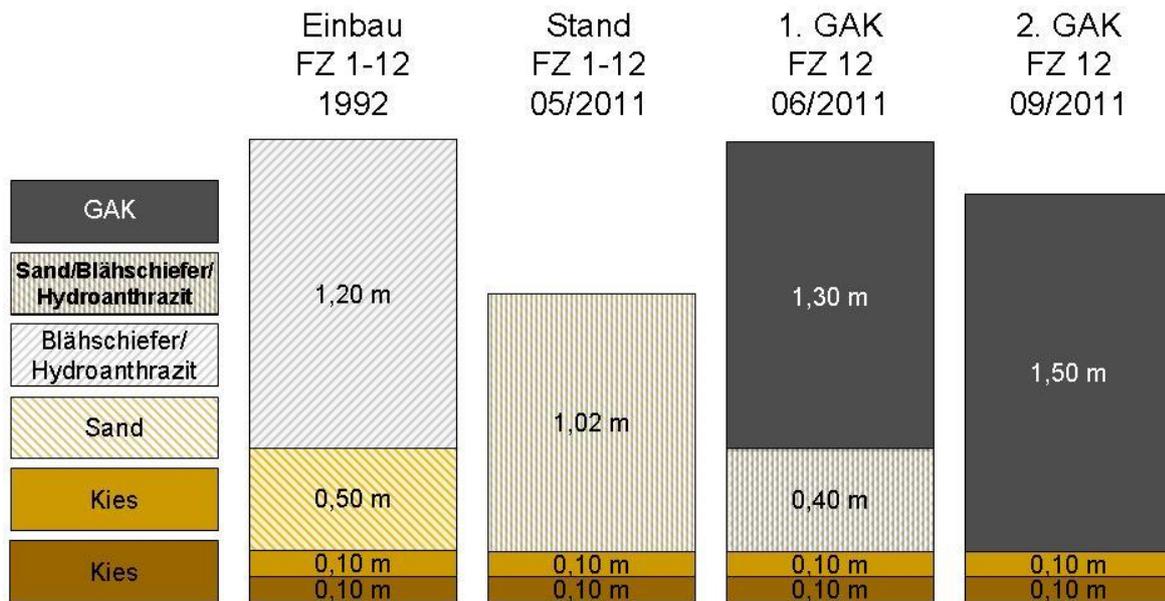
Die Kläranlage Düren-Merken (KA Düren) ist für 310.000 E ausgelegt. Der Zufluss ist mit seinem hohen organischen Anteil stark industriell geprägt (z.T. Papierindustrie). An Biologie und Nachklärung schließt sich ein 12-straßiger Mehrschicht-Flockungsfilter an [BORNEMANN ET AL., 2012]. In Bild 3-5 ist das Fließbild der Anlage zu sehen.



**Bild 3-5: Fließbild KA Düren**

In diesem Flockungsfilter können bis zu  $6.000 \text{ m}^3/\text{h}$  behandelt werden, das Filtrat wird unmittelbar in die Rur eingeleitet. Der Ablauf der Nachklärung wird zu einem Zulaufgerinne gepumpt, von wo aus alle Filter, die sich in Betrieb befinden, gleichmäßig beschickt werden. Das zu filtrierende Abwasser durchströmt die Filter abwärts bei einer Überstauhöhe von  $2,4 \text{ m}$ . Jede Filterzelle hat eine Oberfläche von  $37,5 \text{ m}^2$ . Die Beschickung der Filterzellen sowie die Abführung des Spülabwassers nach der Rückspülung erfolgen über eine einseitig angeordnete Spülrinne. [BORNEMANN ET AL., 2012]

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle – MIKROFlock“ des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrheinwestfalen (MKULNV) [BORNEMANN ET AL., 2012] wurde der bestehende, 12-straßige Flockungsfilter der KA Düren in einer Straße mit granulierter Aktivkohle (GAK) umgerüstet. Von den restlichen 11 Filterzellen (FZ) dient eine als Referenzfilterzelle (FZ 11). Bild 3-6 zeigt den Schichtaufbau der Filter.



**Bild 3-6: Aufbau Filteranlage KA Düren [nach BORNEMANN ET AL, 2012]**

Der Aufbau der Filterzellen bestand ursprünglich von unten gesehen aus 2 x 0,1 m Kies (Körnung: 5,60 – 8,00 mm und 3,15 – 5,60 mm), 0,5 m Sand (0,71 – 1,25 mm) und 1,2 m Blähschiefer/Hydroanthrazit (1,4 bis 2,5 mm). Nach 20 Jahren Betrieb veränderte sich die Stützschiicht aus Kies nicht, während darüber sich eine 1,02 m starke Schicht aus Sand, Blähschiefer und Hydroanthrazit mit einer Körnung von 0,7 bis 2,5 mm ausbildete.

Beim Umbau im Rahmen des Forschungsvorhabens „MIKROFlock“ wurde in der Filterzelle 12 das Gemisch aus Sand, Blähschiefer und Hydroanthrazit bis auf eine Schicht von ca. 0,4 m entnommen und zunächst eine 1,3 m starke GAK-Schicht der Körnung 1,4 bis 2,5 mm eingebaut. Mit dieser 1. GAK wurde der Filter vom 14.06. bis 19.09.2011 betrieben. Danach erfolgte die Entnahme dieser GAK und des verbliebenen Gemischs und der Einbau einer 2. GAK (Körnung 0,5 bis 2,5 mm), welche vom 26.09.2011 bis 20.02.2012 in Betrieb blieb. Bei allen GAK handelt es sich um Steinkohlereaktivante. [BORNEMANN ET AL., 2012] Am 8.10.2012 wurde schließlich eine dritte GAK eingebaut, die mit einer Körnung von 1,0 bis 2,4 mm zwischen der ersten und der zweiten GAK liegt. Der Schichtaufbau entspricht dem Aufbau der zweiten GAK (vgl. ROLFS ET AL. (2013)). Zudem wurde das Filtermaterial in der Referenzfilterzelle erneuert.

Die notwendigen Spülungen werden vom Prozessleitsystem automatisch ausgelöst. Hierzu gibt es drei Kriterien: nach dem Zeitkriterium wird nach 24 Stunden rückgespült, nach dem Mengenkriterium werden alle Filterzellen nach einer Durchlaufmenge von jeweils 6.200 m<sup>3</sup> rückgespült und nach dem Druckkriterium wird bei Überschreiten von 0,5 mbar/(m<sup>3</sup>/h) rückgespült, wobei dies am 04.10.2012 bei der zweiten, feineren GAK auf 0,7 mbar/(m<sup>3</sup>/h) angehoben werden musste, da sie sich zu schnell zusetzte und ein praktikabler Betrieb anders nicht möglich war. [BORNEMANN ET AL., 2012] Dieses veränderte Druckkriterium wird auch bei der dritten GAK angewendet. Die Spülprogramme der Referenz- und GAK-Filterzelle unterscheiden sich hinsichtlich Länge und Geschwindigkeit der Luft- und Wasserspülung. In Düren findet keine Vorfiltration statt

und das Abwasser hat einen hohen AFS-Gehalt, weswegen verhältnismäßig häufig rückgespült werden muss.

Die Auswertung des Messprogramms ergab die in Tabelle 3-2 dargestellten Kennwerte der Filtrationszyklen im Zeitraum vom 12. Oktober 2012 bis 18. November 2012. Aus technischen Gründen konnte die Ermittlung des Stromverbrauchs erst während dieses Zeitraums stattfinden. Auf die erste und zweite GAK kann somit nicht zurückgeschlossen werden. Die Filtrationszyklen waren im Betrachtungszeitraum für die GAK-Filterzelle mit der dritten GAK kürzer als für die Referenzfilterzelle, d.h. es wurde öfter rückgespült.

**Tabelle 3-2: Filtrationszyklen der Referenzfilterzelle (11) und der mit der dritten GAK gefüllten Filterzelle (12) auf der KA Düren**

		<b>Filterzelle 11</b>	<b>Filterzelle 12</b>
		<b>(Referenz)</b>	<b>3. GAK</b>
<b>Spülkriterium Druck</b>	[mbar/(m <sup>3</sup> /h)]	0,5	0,7
<b>Anzahl Filtrationszyklen/Rückspülungen</b>	[-]	58	137
<b>Filtrationsdauer</b>	[h]	14,6	5,8
<b>Filtrat / Zyklus</b>	[m <sup>3</sup> ]	3.805	1.344
<b>Filtrat gesamt</b>	[m <sup>3</sup> ]	220.674	184.101

### 3.6 Obere Lutter

Das Verbandsklärwerk „Obere Lutter“ hat eine Ausbaugröße von 380.000 E, mit einer aktuellen Anschlussgröße von etwa 185.000 E. Bei Trockenwetter fließen der KA 18.000 m<sup>3</sup>/d und im Maximum etwa 60.000 m<sup>3</sup>/d zu. Mit etwa 65 % ist der industrielle Anteil sehr hoch. Das Abwasser durchläuft eine Siebrechenanlage (Stufenrechen), einen belüfteten Sand-/ Fettfang und eine Vorklärung mit einem Volumen von 3.000 m<sup>3</sup>. Anschließend gelangt es in die erste biologische Stufe mit einem Volumen von 5.000 m<sup>3</sup> und eine Zwischenklärung mit einem Volumen von 5.880 m<sup>3</sup>. Die zweite biologische Stufe hat ein Volumen von 9.200 m<sup>3</sup>, die Nachklärung 12.480 m<sup>3</sup>. Die dritte biologische Stufe ist eine Festbettdenitrifikation, die aus 8 Kammern mit einer Oberfläche von je 37,5 m<sup>2</sup> besteht. Es schließt sich eine Flockungsfiltration an, die mit Biolith gefüllt ist und aus 10 Kammern mit einer Oberfläche von je 40 m<sup>2</sup> besteht. Des Weiteren sind Schönungsteiche mit einem Volumen von 42.640 m<sup>3</sup> der Einleitung in die Lutter vorgeschaltet. [NAHRSTEDT ET AL., 2011]

In einem ersten Forschungsprojekt im Jahr 2011 wurde eine Kammer des aufwärts durchströmten Filters mit GAK umgerüstet. Die untere Stüttschicht ist 0,5 m hoch und besteht aus grob granulierter Aktivkohle (Jacobi Carbons, AquaSorb, 2 bis 4,75 mm). Das Festbett ist 2 m hoch und besteht aus dem gleichen Aktivkohletyp mit feinerer Körnung (0,63 bis 2,36 mm). [NAHRSTEDT ET AL., 2011]

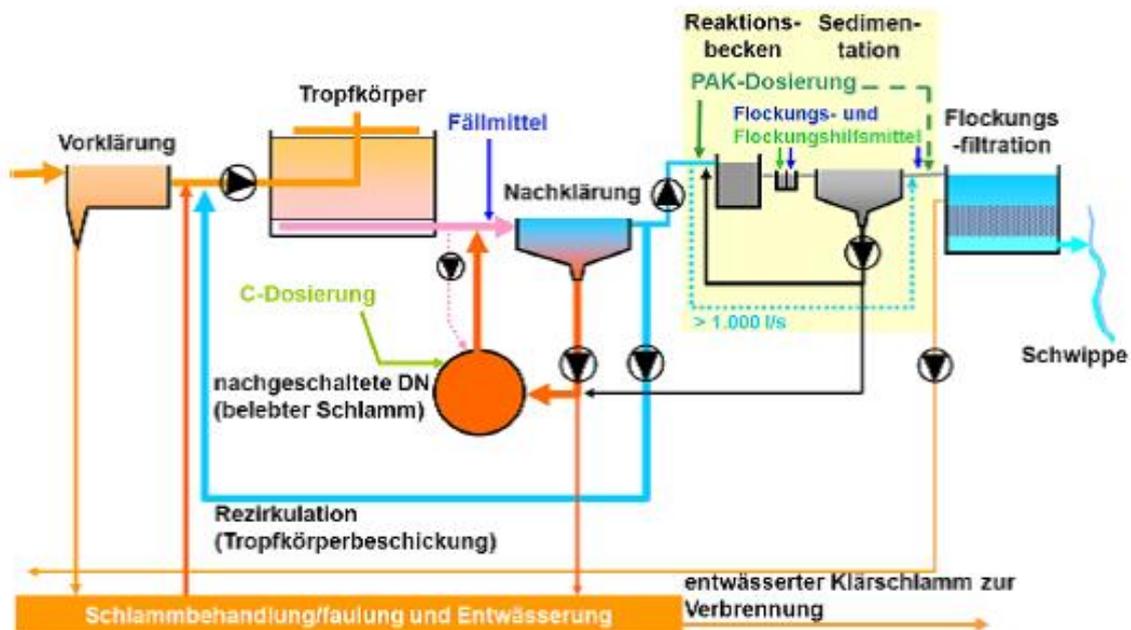
Die Zulaufbelastung ist für die Parameter CSB und Spurenstoffe durch die industriellen Anteile einem starken Tagesgang unterworfen, so dass sich die adsorptive Behandlung

auch intermittierend an 5 von 7 Tagen anbietet. Parallel zu dem Großadsorber (GA) wurde auch ein Kleinadsorber betrieben, der zum Teil während der Versuche auch an 5 von 7 Tagen, mit einer Filtergeschwindigkeit von 10 m/h, betrieben wurde. Die positiven Ergebnisse dieser Fahrweise führten dazu, dass bei der Auslegung einer Adsorptionsstufe beim Abwasserverband Obere Lutter (AOL) diese intermittierende Fahrweise berücksichtigt wurde. Der Betrieb beider Adsorber ist sehr detailliert in NAHRSTEDT ET AL. (2011) beschrieben.

Nach Abschluss des ersten Forschungsprojekts, wurden auf der Kläranlage Obere Lutter drei Kammern auf GAK umgerüstet. Die Kohle aus dem ersten Forschungsprojekt wurde ausgebaut, regeneriert und wieder eingebaut [OBERE LUTTER, 2013]. In einem zweiten Forschungsprojekt wurden zwei Kohlen mit einer Filtergeschwindigkeit von 2 m/h verglichen, zum einen ein Reaktivat (GA5), um frische Make-up Kohle ergänzt, und zum anderen eine Frischkohle (GA4) der Kohle Jacobi Carbons, AquaSorb. Ein weiterer Filter wurde mit derselben Frischkohle und einer dynamischen Filtergeschwindigkeit mit dem Mittel von 3,6 m/h betrieben (GA3). Alle Filter wurden an 5 von 7 Tagen betrieben und zweimal die Woche rückgespült. Als Vergleich wurde ein Referenzfilter betrieben; dieser wurde kontinuierlich an 7 Tagen mit einer mittleren Filtergeschwindigkeit von 3,5 m/h die Woche beschickt und fünfmal pro Woche rückgespült. [NAHRSTEDT ET AL. 2013B]

### 3.7 Böblingen-Sindelfingen

Die Kläranlage Böblingen-Sindelfingen hat eine Ausbaugröße von 250.000 E, welche sich aus Haushalten sowie Gewerbe und Industrie zusammensetzt. Die mittlere Belastung liegt bei rund 140.000 E. Der maximale Mischwasserzufluss beträgt 2.000 L/s, wobei der maximale Trockenwetterzufluss bei unter 800 L/s liegt. Die Jahresabwassermenge beträgt 13,5 Mio. m<sup>3</sup>. Das Fließschema ist in Bild 3-7 dargestellt.



**Bild 3-7: Fließschema der Kläranlage Böblingen-Sindelfingen [BIEBERSDORF ET AL., 2012]**

Das Abwasser durchläuft zunächst einen Feinrechen, einen Sandfang und eine Vorklärung mit einem Volumen von 6.800 m<sup>3</sup>. Die biologische Behandlung besteht aus einer Tropfkörperanlage (7 Tropfkörper mit 30.000 m<sup>3</sup>), einer nachgeschalteten Denitrifikation (DN) (2.400 m<sup>3</sup>) und einer Nachklärung (4 Becken, 19.000 m<sup>3</sup>, 6.660 m<sup>2</sup>). Phosphor wird gefällt, indem eisenhaltige Fällmittel in den Zulauf der Nachklärung und in den Zulauf der Flockungsfiltration gegeben werden. [BIEBERSDORF ET AL., 2011]

Ein Pumpwerk befördert das Abwasser von der Nachklärung zur Aktivkohleadsorptionsstufe bzw. zur Flockungsfiltration. Bis zu 1.000 L/s können über die Aktivkohleadsorptionsstufe geführt werden, darüber hinausgehende Mengen werden per Bypass direkt zur Flockungsfiltration gefördert. Somit werden 90 % der jährlich behandelten Abwassermenge in der Aktivkohleadsorptionsstufe behandelt. [BIEBERSDORF ET AL., 2011]

Die Aktivkohleadsorptionsstufe besteht aus einem Reaktionsbecken, das als Umlaufbecken mit einem Volumen von 1.800 m<sup>3</sup> ausgebildet ist. In dieses wird frische PAK dosiert. Ein Einmisch- und Aggregationsbecken zwischen Reaktionsbecken und Sedimentation dient der definierten Einmischung von Flockungs- und Flockungshilfsmitteln. Im innen liegenden Sedimentationsbecken mit 7.200 m<sup>3</sup> Volumen und 1.800 m<sup>2</sup> Oberfläche soll die PAK größtenteils zurückgehalten werden, um die Filtration zu entlasten. Die abgesetzte PAK wird mit einem Schneckenpumpwerk abgezogen und ebenfalls dem Reaktionsbecken zur weiteren Beladung wieder zugegeben. Bei einem Rücklaufstrom von 500 L/s und einer maximalen Beschickung von 1.000 L/s beträgt die Aufenthaltszeit im Reaktionsbecken mindestens 20 Minuten. Überschüssige PAK wird mit einer Tauchmotorpumpe (nicht im Bild) aus dem Reaktionsbecken in das Denitrifikationsbecken gefördert, so dass die Entsorgung der gebrauchten Kohle mit dem Überschussschlamm der Belebungsanlage erfolgt. [BIEBERSDORF ET AL., 2011]

Aufgrund der schlechten Absetzeigenschaften der PAK ist eine anschließende Filtration vorgesehen, die bereits vorhanden war. Sie besteht aus 16 Kammern mit jeweils 37,5 m<sup>2</sup> Oberfläche. Die gesamte Filterfläche beträgt somit 600 m<sup>2</sup>. Der Filterbettaufrbau ist mehrschichtig (1,4 m Anthrazit, 0,4 m Quarzsand, 0,2 m Basalt). Aus dem Sedimentationsbecken fließt das Abwasser im freien Gefälle zur Filtration. Im Zulauf zur Filterstufe erfolgte eine weitere Zugabe von Flockungsmitteln um die Reinigungsleistung des Filters zu steigern. [BIEBERSDORF ET AL., 2011]

Nach Inbetriebnahme der Aktivkohleanlage mit 10 g PAK/m<sup>3</sup> hat sich der Betrieb der Filtration kaum geändert. Die abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf der Sedimentation sind nun i.d.R. geringer als sie es vorher im Ablauf der Nachklärung waren. Somit konnten die Standzeiten auf derzeit 46 h verlängert werden. [BIEBERSDORF ET AL., 2012]

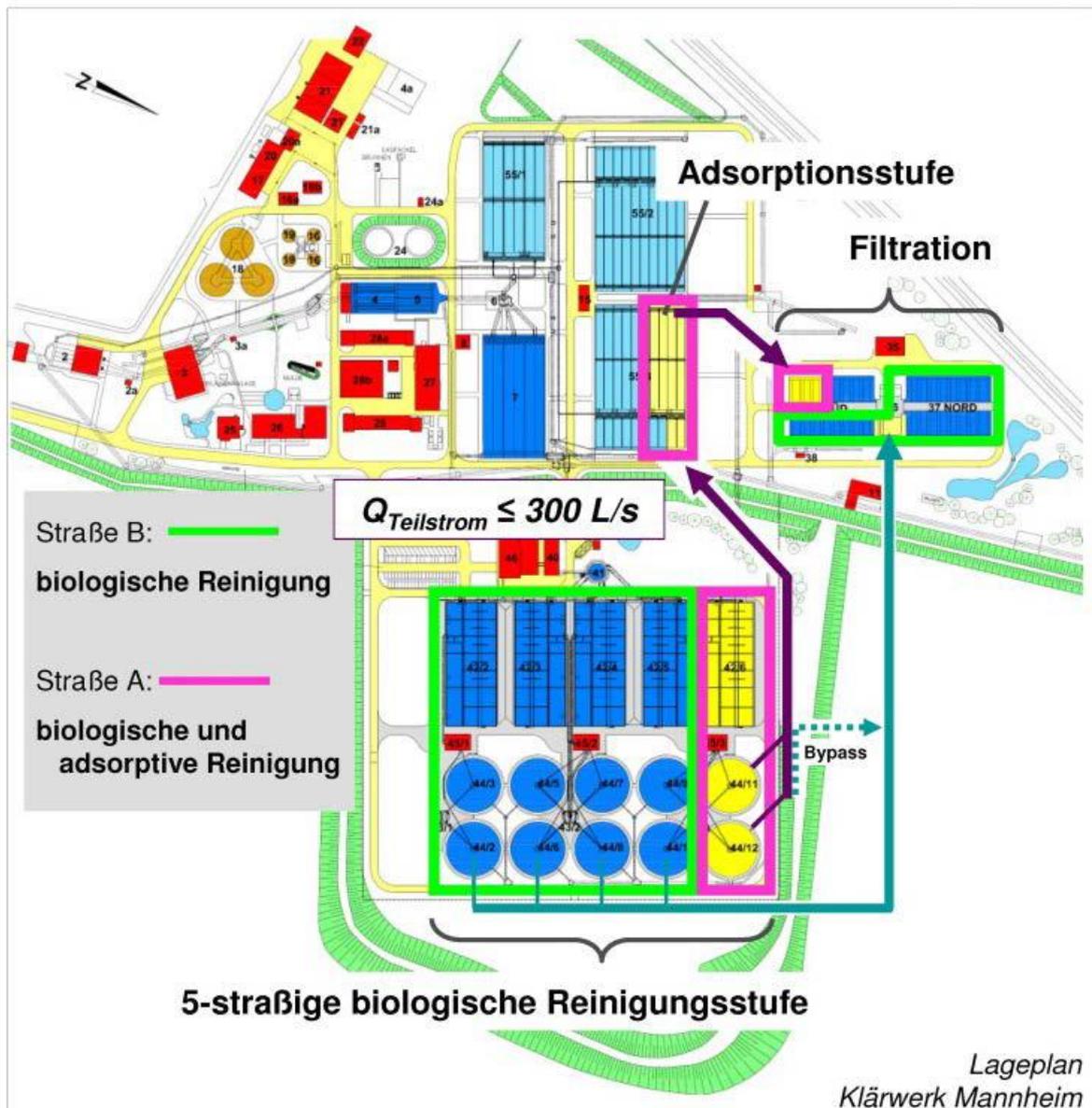
Der Primärschlamm wird in Voreindickern statisch eingedickt, der Überschussschlamm maschinell vorentwässert. Zusammen werden die Schlämme einer Faulung zugeführt. Der ausgefaule Schlamm wird in Kammerfilterpressen entwässert und anschließend in Braunkohlekraftwerken mit verbrannt. [BIEBERSDORF ET AL., 2011]

Auch in der Schlammfäulung und –entwässerung haben sich keine betrieblich relevanten Änderungen ergeben. Der Schlammanfall ist um ca. 600 kg TR/d angestiegen, was mit einem TR-Gehalt von 32 % im entwässerten Schlamm einer zusätzlich zu entsorgenden Schlammmasse von 680 m<sup>3</sup>/a entspricht. [BIEBERSDORF ET AL., 2012]

### 3.8 Mannheim

Das Klärwerk des Eigenbetriebs der Stadtentwässerung Mannheim wurde 1973 gegründet und in den Jahren 1986 und 1999 ausgebaut. Es hat eine Klärleistung von 725.000 EW, wobei 400.000 EW davon aus der Industrie stammen. Der maximale Mischwasserzufluss beträgt 4000 L/s, wobei der Trockenwetterzufluss bei 83.000 m<sup>3</sup>/d und der Regenwetterzufluss bei 250.000 m<sup>3</sup>/d angegeben wird. [STADTENTWÄSSERUNG MANNHEIM, 2013]

In Mannheim ist die biologische Stufe fünfsträßig aufgebaut und besteht jeweils aus einem Belebungsbecken und einer Nachklärung. Es schließt sich eine im Überstau betriebene Flockungsfiltration an. Zur weiteren Spurenstoffelimination und Reduzierung des TOC ist seit Juni 2010 eine Teilstrombehandlung von max. 300 L/s mit Pulveraktivkohle vorgesehen. Die zusätzliche Verfahrenstechnik hinter der Nachklärung einer der fünf biologischen Straßen besteht aus einer Aktivkohlestufe (Kontaktzone und Sedimentationsbecken), die in einen Teil der nicht mehr genutzten Regenwasserbehandlung eingebracht werden konnte. Der Ablauf des Sedimentationsbeckens wird über die existierende Flockungsfiltrationsanlage geführt, um einen Rückhalt der mit Spurenstoffen beladenen Kohle sicherzustellen. [STADTENTWÄSSERUNG MANNHEIM 2013, METZGER ET AL. 2012] Eine Übersicht der Kläranlage mit der um eine Adsorptionsstufe erweiterten biologischen Stufe ist in Bild 3-8 dargestellt.



**Bild 3-8:** Umsetzung der Adsorptionsstufe im Klärwerk Mannheim [HOCHSCHULE BIBERACH IN STADTENTWÄSSERUNG MANNHEIM, 2013]

### 3.9 Gütersloh-Putzhagen

Die Kläranlage Gütersloh-Putzhagen besitzt eine Ausbaugröße von 150.600 EW und eine Anschlussgröße von 145.000 EW (80.000 Einwohner und 65.000 Einwohnerequivalente). Auf der Kläranlage werden jährlich im Mittel 5,93 Mio. m<sup>3</sup>/a. Abwasser behandelt und anschließend in einen Nebenfluss der Ems, der „Dalke“, eingeleitet. [MERTEN, 2011]

Die Kläranlage in Gütersloh-Putzhagen besteht aus folgenden Reinigungsstufen [MERTEN, 2011]:

- 2 parallele Feinrechen (6 mm)
- 2 parallele Feinrechen (3 mm)
- 2-straßiger Sand- und Fettfang ( $V_{\text{ges}} = 600 \text{ m}^3$ )
- 1 Vorklärbecken ( $V_{\text{ges}} = 2.500 \text{ m}^3$ )

- 1 Ausgleichsbecken (ehem. Vorklärbecken,  $V_{\text{ges}} = 2.500 \text{ m}^3$ )
- Belebungsbecken:  $V_{\text{ges}} = 27.700 \text{ m}^3$
- 4-straßige vorgeschaltete Denitrifikation als 2er-Kaskade
- 16 Nachklärbecken ( $V_{\text{ges}} = 11.600 \text{ m}^3$ )
- Flockungsfiltration vom Typ „Biofor“ (9 Filterzellen, Filterfläche  $A_{\text{ges}} = \text{ca. } 370 \text{ m}^2$ )

Im Jahr 2011 wurden im Rahmen der Konzeptstudie „Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle im Ablauf des Klärwerks Gütersloh-Putzhagen“ und durch anstehende Sanierungsmaßnahmen (Austausch des Filtermaterials, Austausch der Steuerung) die Aufbereitungsmöglichkeiten mittels GAK in der bestehenden Filteranlage geprüft. [MERTEN, 2011]. Von den 9 BIOFOR-Filterzellen, die 1992 in Betrieb genommen wurden, wurden 2 Zellen mit je  $113 \text{ m}^3$  Volumen im Januar 2013 mit GAK befüllt und parallel zu den konventionellen Filtern als aufwärtsdurchströmte Filter betrieben und untersucht. Der maximale Wasservolumenstrom der durch die zwei Filteranlagen behandelt werden kann ist auf  $7,36 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  ( $v=10\text{m/h}$ ) begrenzt. Da vor dieser Filterbehandlung keine weitere vorgeschaltet ist, soll insbesondere der Einfluss des Feststoffeintrags auf die Adsorption und die betrieblichen Eigenschaften untersucht werden. [KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE NRW, 2013]

Die zwei mit Aktivkohle umgerüsteten großtechnischen Adsorber in Gütersloh-Putzhagen wurden zwischen Januar und Juni 2013 über einen Zeitraum von insgesamt 183 Tagen betrieben. Im Adsorber GA1 wurde die Kohle AquaSorb 5000 eingebaut, welche auch in Obere Lutter untersucht wurde (vgl. 3.6). Im Adsorber GA2 wurde die Kohle Hydriffin AR aufgrund ihres günstigen Angebotspreises ausgewählt und eingebaut. Die Filtergeschwindigkeit betrug für beide Filter  $5 \text{ m/h}$ . Pro Filter wurden  $113 \text{ m}^3$  Aktivkohle eingebaut, was einer Betthöhe von  $2,7 \text{ m}$  entspricht. Durch anfängliche Probleme bei der Luftspülung wurde in GA1 Aktivkohle aus dem Filter ausgetragen, was die Betthöhe auf  $2,3 \text{ m}$  verringerte. Diese neue Höhe wurde dann auch folglich für die Auswertung der Bettvolumina angesetzt. Parallel zu den beiden Großadsorbern wurde ein Kleinadsorber mit unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten betrieben. [NAHRSTEDT ET AL., 2013A]

### 3.10 Kressbronn-Langenargen

Die Kläranlage Kressbronn-Langenargen wurde 1967 mit einer Ausbaugröße von ca. 30 000 Einwohnerwerten in Betrieb genommen. Seit 1995 besitzt sie zusätzlich zu der biologischen Behandlung einen Zweischichtsandfilter [RÖLLE UND KUCH, 2011]. Der Trockenwetterzufluss wird mit  $136 \text{ l/s}$  und der Mischwasserzufluss mit  $252 \text{ l/s}$  angegeben [GÖTZELMANN UND PARTNER, 2011].

Da die Kläranlage einstraßig ausgeführt ist wurde ein Sedimentationsbecken geplant, um eine Sanierung des bestehenden Nachklärbeckens zu ermöglichen. Im Rahmen von Sanierungsarbeiten und der Verbesserung der Gewässersituation wurde sich für eine 4. Reinigungsstufe entschieden. Seit 2011 ist eine PAK-Stufe mit einer Vollstrombehandlung (aufgrund der anfänglichen Verwendung als Sedimentationsbeckens) im Einsatz, die aus einem Kontakt- und Absetzbecken besteht und die hydraulisch zwischen der Nachklärung

und einer Sandfilteranlage eingegliedert ist. [RÖLLE UND KUCH, 2011] Die Verweilzeit im Kontaktreaktor liegt bei Mischwasserzufluss bei ca. 30 Minuten und im anschließenden Sedimentationsbecken bei über 2 Stunden [GÖTZELMANN UND PARTNER, 2011].

Die Dosierung der PAK erfolgt gravimetrisch mit 10 g/m<sup>3</sup>. Im Anschluss an das Kontaktbecken werden Fäll- und Flockungshilfsmittel zugegeben, nach dem Sedimentationsbecken erfolgt eine weitere Zugabe von Flockungshilfsmitteln [RÖLLE UND KUCH, 2011].

## 4 Ergebnisse und Diskussion

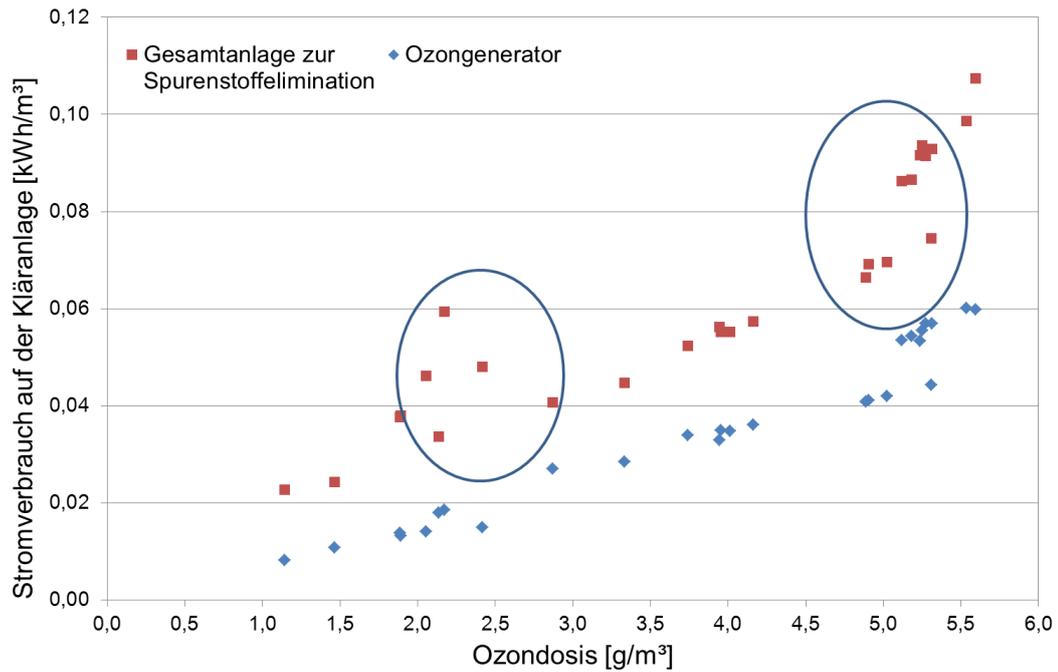
### 4.1 Stromverbrauch der untersuchten Anlagen

#### 4.1.1 Kläranlage Bad Sassendorf

Für die KA Bad Sassendorf wurden drei verschiedene Zeiträume ausgewertet. Zunächst wurden nur die Probenahmetage im Zeitraum 18.10. bis 7.12.2010 und 13.3. bis 10.05.2012 ausgewertet. Für diese insgesamt 27 Tage lag jeweils ein Tageswert für die relevanten Parameter vor. Anschließend wurden zwei Zeiträume ausgewertet, in denen kontinuierlicher Betrieb bei verschiedenen Dosierstrategien vorlag. Im Dezember 2011 wurde die Dosiermenge mengenproportional über den Durchfluss gesteuert, im Januar 2013 über den SAK. Für diese beiden Monate liegen Daten im 15 min-Intervall vor.

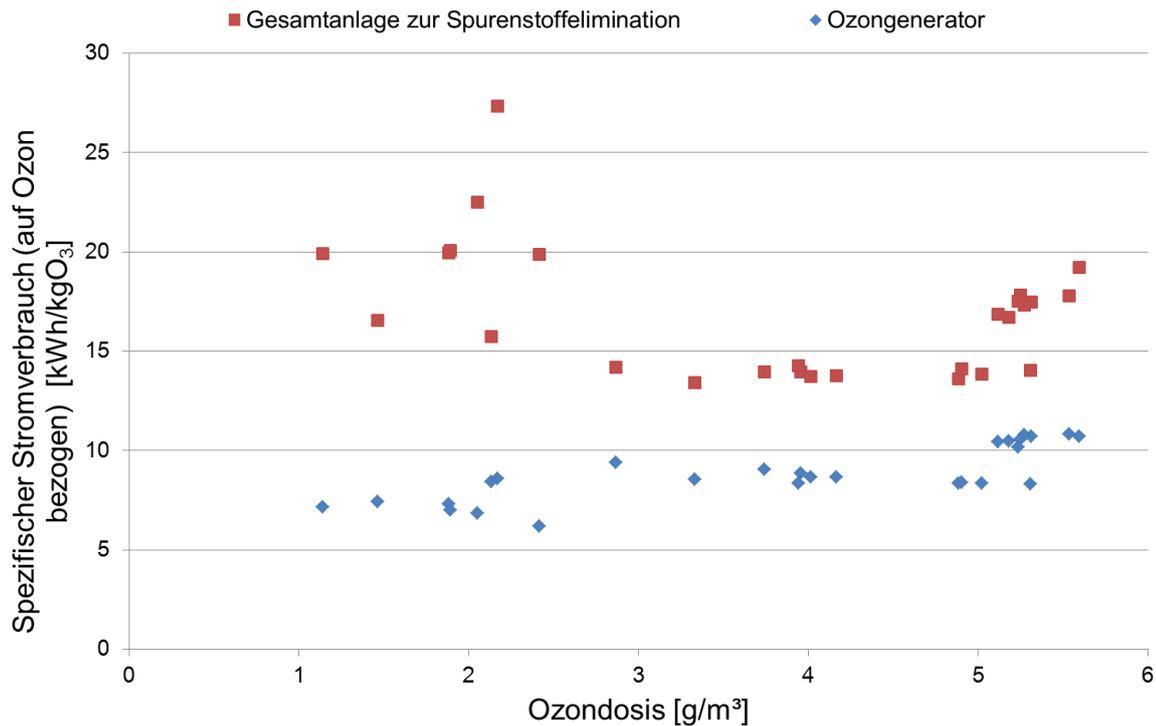
##### 4.1.1.1 Auswertung von Tageswerten

Im Folgenden werden zunächst die Stromverbräuche der Probenahmetage ausgewertet. Bild 4-1 stellt den spezifischen Stromverbrauch der Spurenstoffelimination je m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser in Abhängigkeit der Ozondosis dar. Die steigende Tendenz des Stromverbrauchs mit zunehmender Ozondosis ist erwartungsgemäß. Bei einer Ozondosis um 2,5 mg/L (entspricht 2,5 g/m<sup>3</sup>) werden etwa **0,046 kWh/m<sup>3</sup>** benötigt, bei einer Ozondosis um 5 mg/L (entspricht 5 g/m<sup>3</sup>) etwa **0,082 kWh/m<sup>3</sup>** (jeweils eingekreist). Der Ozongenerator benötigt bei den entsprechenden Dosiermengen 0,019 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 0,050 kWh/m<sup>3</sup>. Durchschnittlich verursacht der Ozongenerator über alle Dosiermengen 54 % des Stromverbrauchs der Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination (43 % bei Dosiermengen um 2,5 mg/L und 61 % bei Dosiermengen um 5 mg/L).



**Bild 4-1: Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m³] in Abhängigkeit der Ozondosis an den Probenahmetagen**

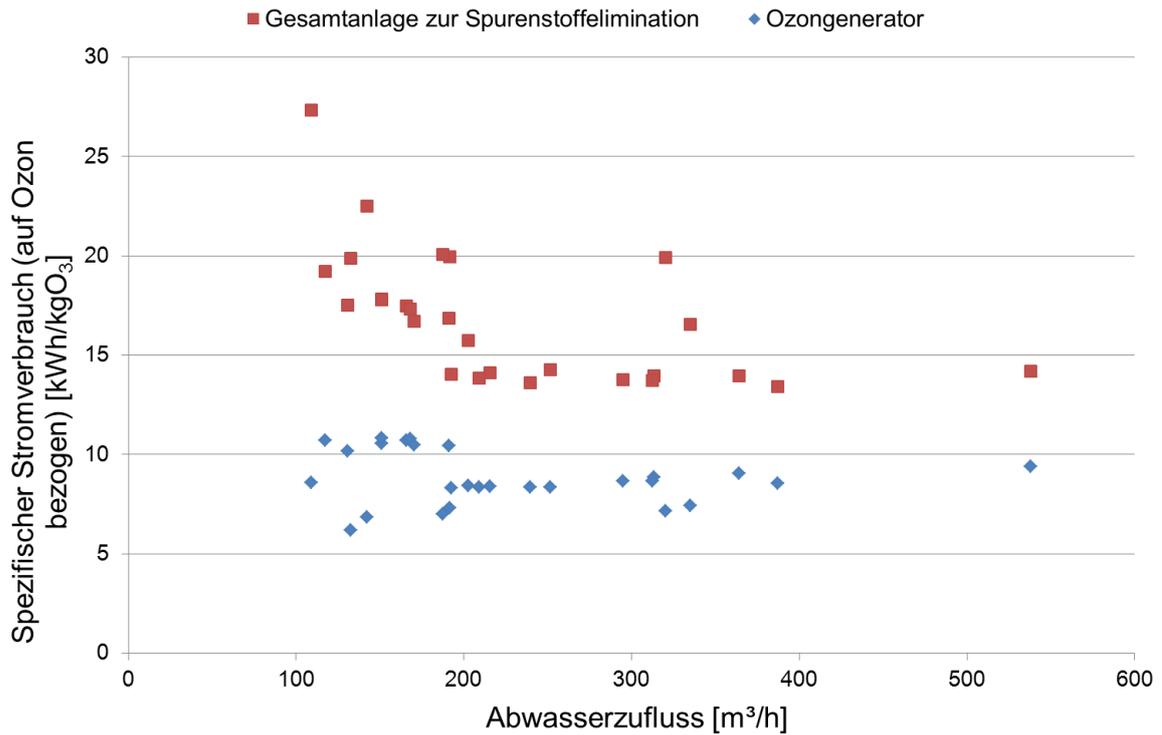
In Bild 4-2 ist der spezifische Stromverbrauch in kWh/kg O<sub>3</sub> in Abhängigkeit der Ozondosis dargestellt. Bei Ozondosen um 2,5 mg/L schwankt der spezifische Stromverbrauch des Ozongenerators um 8 kWh/kg O<sub>3</sub>, der spezifische Stromverbrauch der Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination um 20 kWh/kg O<sub>3</sub>. Bei Ozondosen um 5 mg/L liegt der Stromverbrauch des Ozongenerators bei 9,7 kWh/kg O<sub>3</sub>, für den spezifischen Stromverbrauch der Gesamtanlage liegt der Wert hier im Mittel bei etwa 16 kWh/kg O<sub>3</sub>.



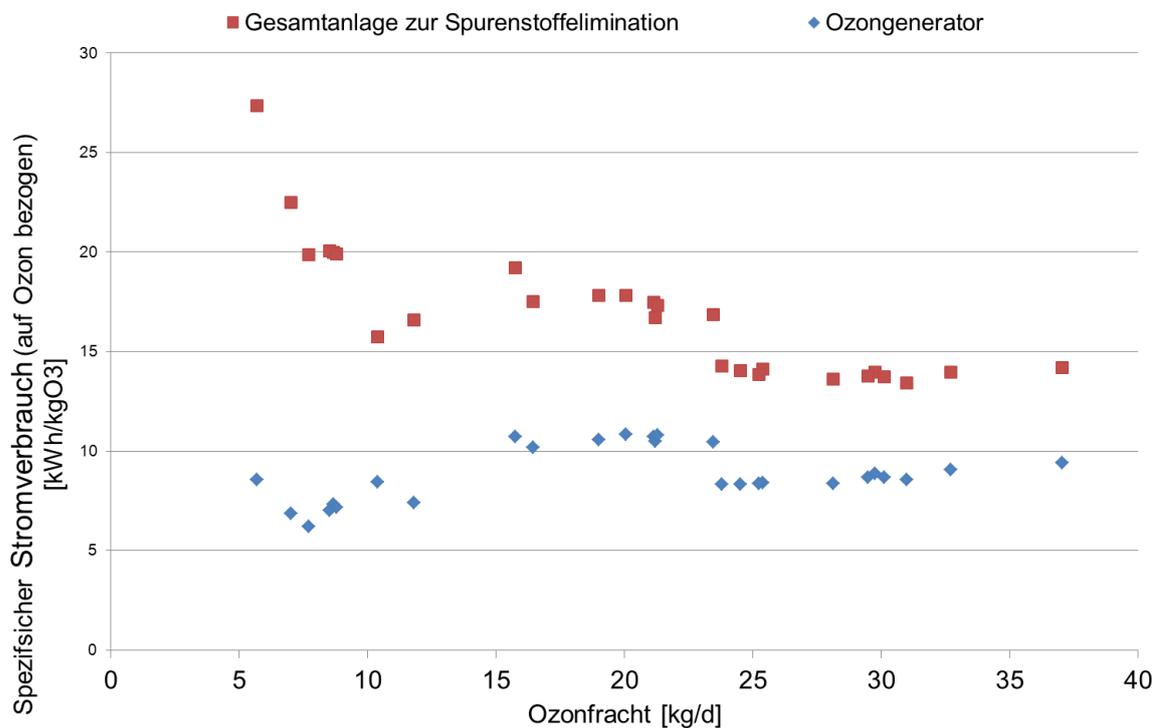
**Bild 4-2: Spezifischer, auf Ozon bezogener Stromverbrauch [kWh/kg O<sub>3</sub>] in Abhängigkeit der Ozondosis an den Probenahmetagen**

In Bild 4-3 ist der spezifische, auf Ozon bezogene, Stromverbrauch in kWh/kg O<sub>3</sub> in Abhängigkeit der behandelten Abwassermenge dargestellt. Hiervon ist der spezifische Stromverbrauch des Ozongenerators unabhängig. Der spezifische Energieverbrauch der Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination zeigt jedoch mit zunehmendem Abwasserzufluss eine fallende Tendenz, die ab einer Zuflussmenge von 200 m<sup>3</sup>/h ein nahezu konstantes Verhalten aufweist.

Es kann festgehalten werden, dass die Ozonproduktion mit zunehmender Annäherung an die Auslegungsgröße des Generators (4,6 kg/h) (durch höhere Dosiermengen bzw. höherer Abwasserzufluss) effizienter wird. Der spezifische Verbrauch der Ozonanlage sinkt mit steigender Ozonfracht und steigt auch für den Generator mit höherer Ozonfracht nicht weiter an, wie in Bild 4-4 verdeutlicht.



**Bild 4-3:** Spezifischer, auf Ozon bezogener, Stromverbrauch [kWh/kg O<sub>3</sub>] in Abhängigkeit des Abwasserzuflusses an den Probenahmetagen

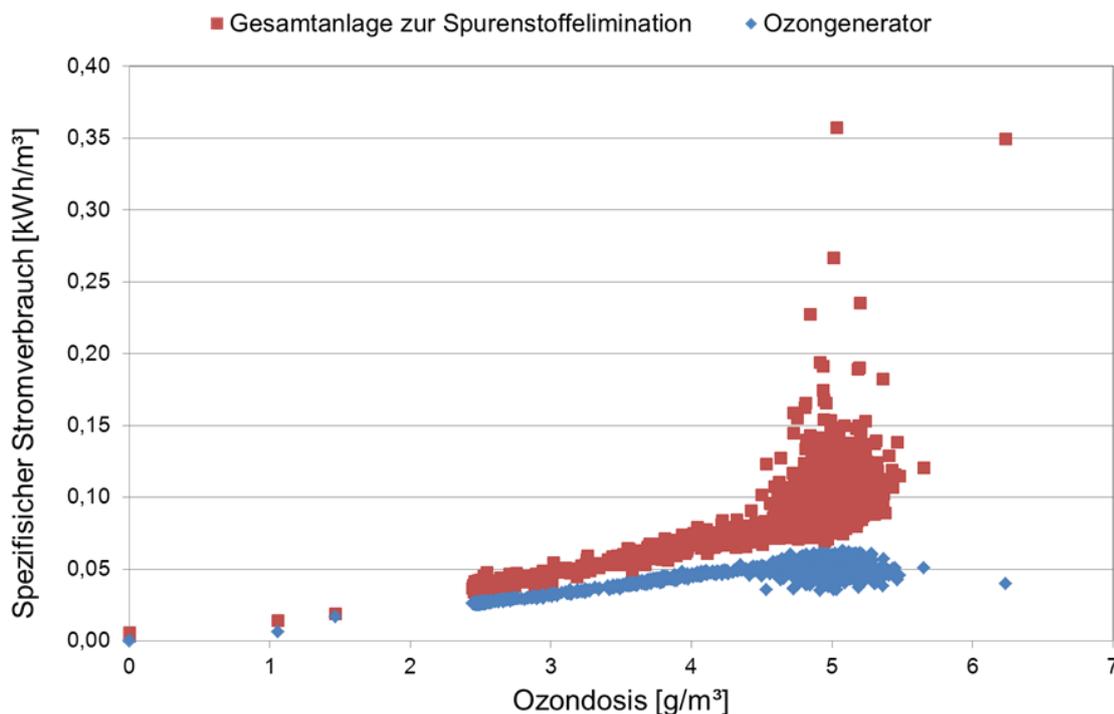


**Bild 4-4:** Spezifischer, auf Ozon bezogener, Stromverbrauch [kWh/kg O<sub>3</sub>] in Abhängigkeit der produzierten Ozonfracht an den Probenahmetagen

#### 4.1.1.2 Auswertung von Werten im 15-Minuten-Intervall

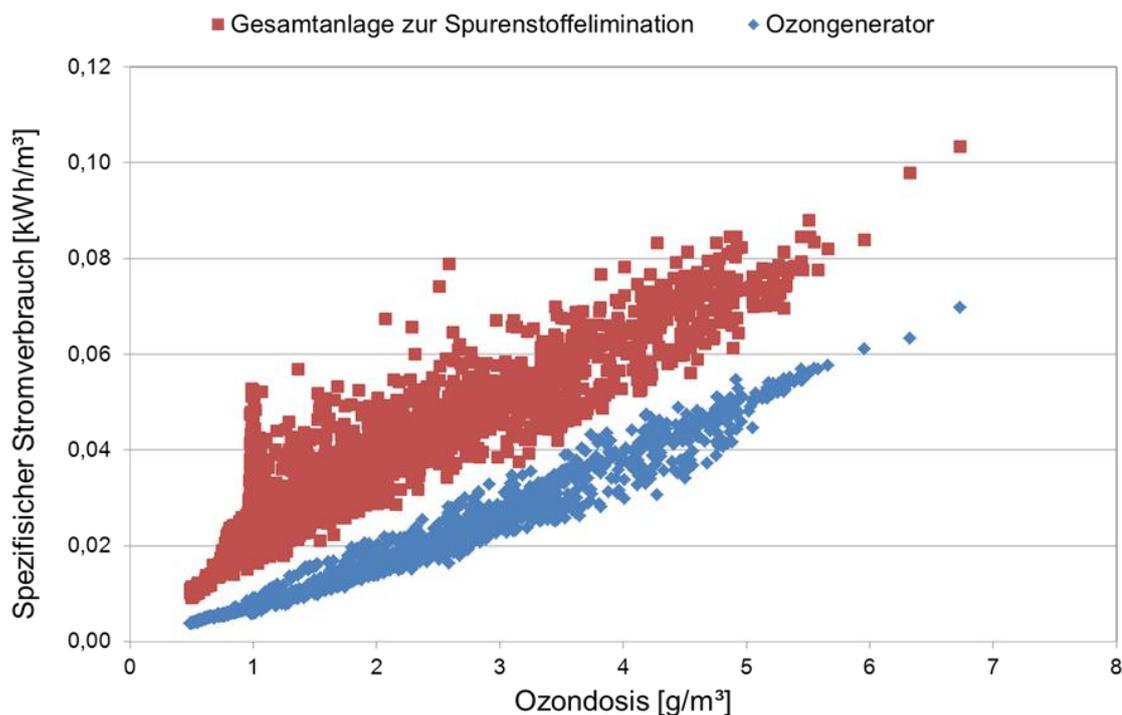
Im Folgenden werden Daten ausgewertet, die im 15 min-Intervall für konstanten Betrieb vorliegen. Es handelt sich hierbei zum einen um den Dezember 2011, wobei die Dosierstrategie mengenproportional über den Durchfluss gesteuert wurde. Zum anderen handelt es sich um Januar 2013, wobei die Dosiermenge SAK-gesteuert wurde. Beide Datensätze enthalten Trockenwetter- und Regenwetterverhältnisse.

Bild 4-5 stellt den spezifischen Stromverbrauch in Abhängigkeit der Ozondosis für Dezember 2011 dar. Die meisten Daten liegen bei Dosiermengen um 5 mg/L vor. Hier liegt der Stromverbrauch der Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination bei **0,094 kWh/m<sup>3</sup>**, der Stromverbrauch des Ozongenerators liegt bei 0,052 kWh/m<sup>3</sup>. Hierbei verursacht der Ozongenerator etwa 57 % des Stromverbrauchs der Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination. Bei Ozondosen um 5 mg/L war der Prozesswasserfluss viel niedriger (144 m<sup>3</sup>/h) als bei Ozondosen um 2,5 mg/L (600 m<sup>3</sup>/h). Die Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination war also bei der höheren Ozondosis schlechter ausgelastet. Daher nimmt der spezifische Energieverbrauch der Gesamtanlage zu.



**Bild 4-5: Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m<sup>3</sup>] in Abhängigkeit der Ozondosis Dezember 2011 (Dosiermenge basiert auf Q)**

Bild 4-6 stellt den spezifischen Stromverbrauch in Abhängigkeit der Ozondosis für Januar 2013 dar. Da hierbei die Dosierstrategie SAK-basiert (größere Schwankungen bei der Ozondosis im Vergleich zu der mengenproportionalen Zugabe, vgl. ARGE, 2014) war, schwankte die Ozondosis recht stark. Bei Dosiermengen um 2,5 mg/L liegt der Stromverbrauch der Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination bei **0,044 kWh/m<sup>3</sup>**, der Stromverbrauch des Ozongenerators liegt bei 0,020 kWh/m<sup>3</sup>. Hierbei verursacht der Ozongenerator rund 47 % des Stromverbrauchs der Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination.



**Bild 4-6: Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m<sup>3</sup>] in Abhängigkeit der Ozondosis Januar 2013 (Dosierstrategie basiert auf SAK)**

#### 4.1.1.3 Stromverbrauch der Ozonung in Bad Sassendorf

In Tabelle 4-1 sind die zusammengefassten Energieverbrauchswerte (Mittelwerte) in kWh/m<sup>3</sup> für die Ozonanlage in Bad Sassendorf aufgeführt.

**Tabelle 4-1: Zusammenfassung der mittleren Energieverbrauchswerte [kWh/m<sup>3</sup>] für die Ozonanlage in Bad Sassendorf**

Ozondosis	2,5 ± 0,5 mg/L		5 ± 0,5 mg/L	
	Ozon-generator	Gesamt-anlage zur Spuren-stoff-elimination	Ozon-generator	Gesamt-anlage zur Spuren-stoff-elimination
	kWh/m <sup>3</sup>			
<b>Probenahmetage 27 Tageswerte</b>	0,019	0,046	0,050	0,082
<b>Dezember 2011 Dosiermenge basiert auf Q, 15-min-Werte</b>	0,027	0,039	0,052	0,094
<b>Januar 2013 Dosiermenge basiert auf SAK, 15-min-Werte</b>	0,020	0,044	0,047	0,073

In Tabelle 4-2 sind Energieverbrauchswerte (Mittelwerte) in kWh/kg O<sub>3</sub> zusammengefasst.

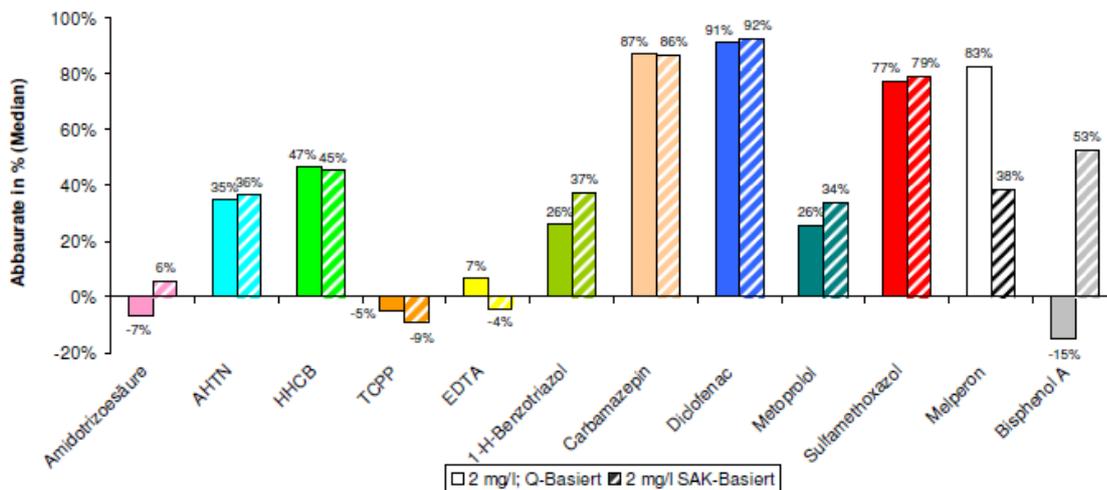
Tabelle 4-2: Zusammenfassung der mittleren Energieverbrauchswerte [kWh/kg O<sub>3</sub>] für die Ozonanlage in Bad Sassendorf

Ozondosis	2,5 ± 0,5 mg/L		5 ± 0,5 mg/L	
	Ozon-generator	Gesamt-anlage zur Spurenstoff-elimination	Ozon-generator	Gesamt-anlage zur Spurenstoff-elimination
kWh/kg O <sub>3</sub>				
Probenahmetage 27 Tageswerte	7,9	19,9	9,7	15,9
Dezember 2011 Dosiermenge basiert auf Q 15-min-Werte	10,6	15,2	10,5	18,8
Januar 2013 Dosiermenge basiert auf SAK 15-min-Werte	8,3	18,1	9,7	14,9

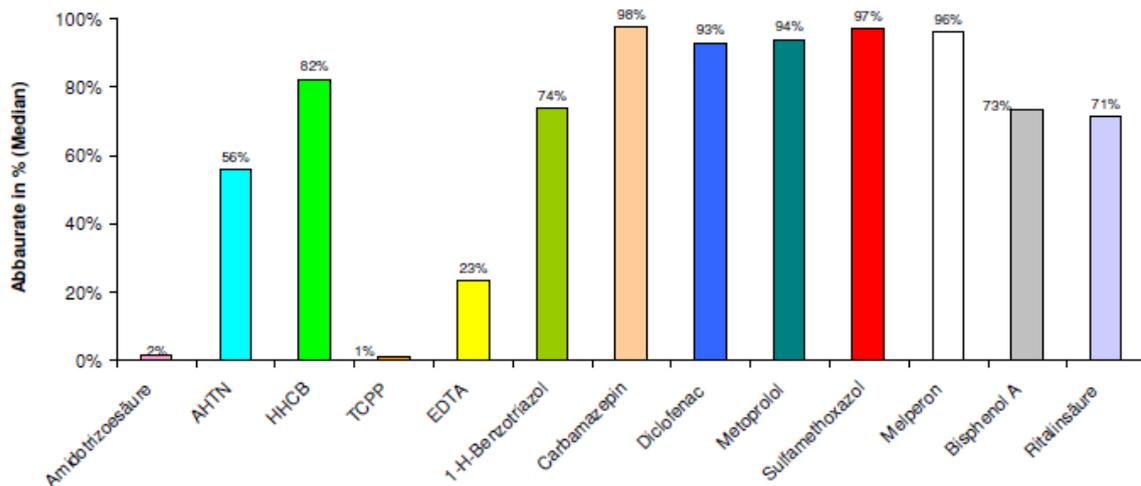
Entscheidend für den Stromverbrauch ist die tatsächlich zugegebene Ozonmenge und nicht die Dosierstrategie. Je besser die Anlage ausgelastet ist, desto effizienter die Ozonproduktion.

Um die Stromverbräuche in Bezug zur Eliminationsleistung zu bringen, werden im Folgenden einige Ergebnisse aus ARGE (2011) wiedergegeben. Generell wurde hier herausgefunden, dass die Dosiermenge signifikanten Einfluss auf die Eliminationsleistung einiger Stoffe hat, jedoch stark stoffabhängig ist.

In Bild 4-7 und Bild 4-8 sind die Abbauraten der untersuchten Spurenstoffe bei Zugabe von 2 mg O<sub>3</sub>/L und 5 mg O<sub>3</sub>/L dargestellt.



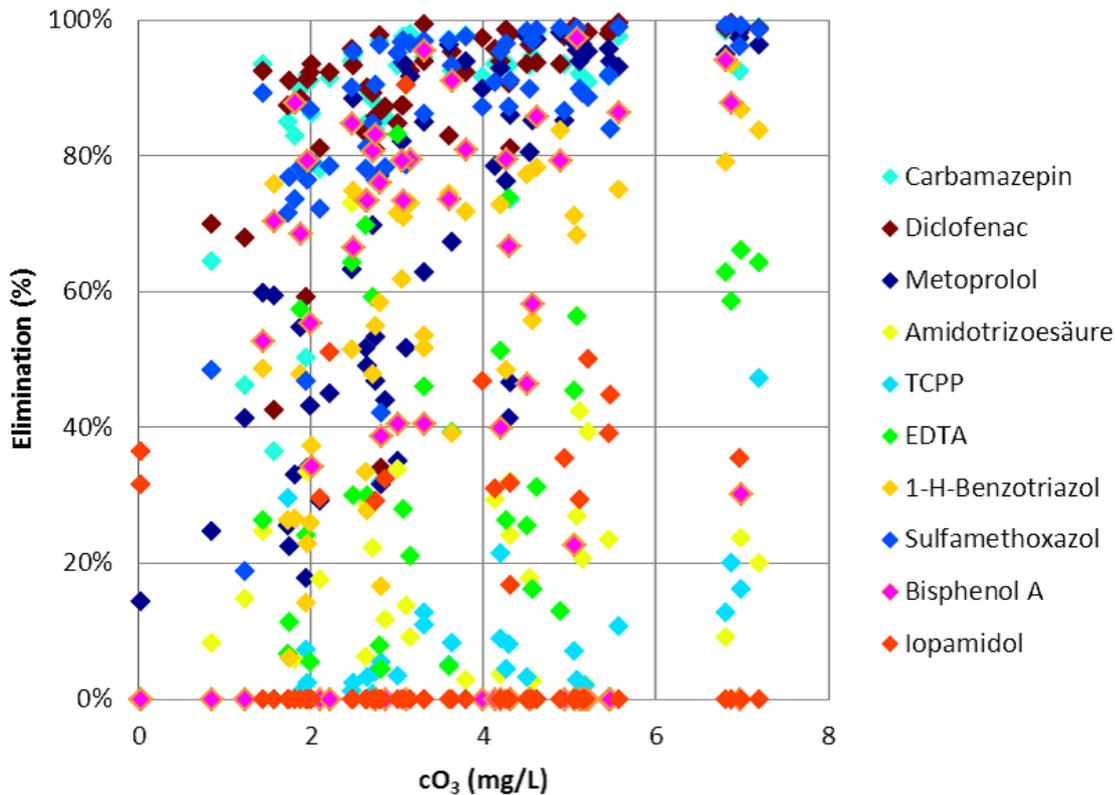
**Bild 4-7: Abbauraten der untersuchten Spurenstoffe bei Zugabe von 2 mg O<sub>3</sub>/L (mengenproportional und SAK-basiert) [ARGE, 2011]**



**Bild 4-8: Abbauraten der untersuchten Spurenstoffe bei Zugabe von 5 mg O<sub>3</sub>/L (mengenproportional) [ARGE, 2011]**

Im Folgenden werden die mengenproportionalen Dosierungen verglichen. Für die Stoffe Amidotrizoesäure, TCP und EDTA ist mit der höheren Dosierung zwar eine höhere Elimination zu erzielen, sie bleibt aber in allen Fällen unterhalb von 30 %. Für die Stoffe Carbamazepin und Diclofenac ist der Eliminationsgrad bereits bei 2 mg O<sub>3</sub>/L hoch, sie kann durch eine höhere Dosierung daher nur noch geringfügig gesteigert werden. Die größten Steigerungen in der Abbauraten bei höherer Dosiermenge verzeichnen Bisphenol A, Metoprolol und 1-H-Benzotriazol.

Weitere Untersuchungen in ARGE (2014) zeigen ähnliche Ergebnisse, vgl. Bild 4-9. Bei geringen Ozondosen kleiner 2 mg/L O<sub>3</sub> lassen sich lediglich Diclofenac, Carbamazepin und Sulfamethoxazol zu über 80 % oxidieren. Für Metoprolol, 1-H-Benzotriazol, und Bisphenol A lässt sich mit höheren Ozondosen größer 5 mg/L eine Oxidation von etwa 80 % erreichen. Amidotrizoesäure, Iopamidol, EDTA, und TCP lassen sich auch mit höheren Ozondosen nur geringfügig oxidieren. In ARGE (2014) wurde die mengenproportionale Ozondosis in mg/L mit der spezifischen Ozondosis  $Z_{spez.}$  in mg O<sub>3</sub>/mg DOC verglichen und es wurde festgestellt, dass für die Ozonung in Bad Sassendorf beide Dosisangaben gleichwertig eingesetzt werden können. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass mengenproportionale und spezifische Ozondosierung bei näherungsweise gleichförmigem Abwasser, also mit ähnlichen DOC-Werten) gut korrelieren. Dies war für die überwiegende Anzahl der Proben der Fall, da diese bei Trockenwetter entnommen wurden.



**Bild 4-9: Eliminationsgrade für unterschiedliche Spurenstoffe in Abhängigkeit der Ozondosis [ARGE, 2014]**

In Bad Sassendorf wurde zudem zum ersten Mal eine großtechnische Anlage zur Ozonung kommunalen Abwassers anhand Online-SAK<sub>254</sub>-Messung gesteuert bzw. geregelt. Für die drei ausgewählten Substanzen Diclofenac, Metoprolol und Amidotrizoesäure konnte kein signifikanter Einfluss im Vergleich zur mengenproportionalen Dosierung festgestellt werden. Auch ist der Betrieb von SAK<sub>254</sub>-Onlinemesssonden mit einem hohen Aufwand verbunden. Jedoch könnte der Betrieb von solchen Sonden eine praktikable Überwachung des Betriebs als Summenparameter für Spurenstoffe liefern [ARGE, 2014].

In ARGE (2014) wurden Kostenbetrachtungen für den Betrieb in Bad Sassendorf durchgeführt, die auch den Energieverbrauch berücksichtigen. Als Auslegungsmenge wird hier eine Dosiermenge von **2 mg O<sub>3</sub>/L** angesetzt. Als Energieverbrauch werden für den Dauerbetrieb an sieben Tagen folgende spezifische Energieverbräuche pro m<sup>3</sup> ozoniertem Abwasser angesetzt:

- Ozongenerator: 0,019 kWh/m<sup>3</sup>
- Ozonanlage gesamt: 0,046 kWh/m<sup>3</sup> (vgl. auch Tabelle 4-1, Probenahmetage).

Die mit diesen Werten ermittelten spezifischen Energieverbräuche und einwohnerspezifische Energieverbräuche sind in Tabelle 4-3 aufgeführt und auf die Abwassermengen bzw. die CSB-spezifischen Einwohnerwerte bezogen. Der Energieverbrauch der konventionellen Anlage wird hierbei um ca. 14 % erhöht.

**Tabelle 4-3: Spezifische Energieverbräuche der Ablaufozonung mit 2 g/m<sup>3</sup> O<sub>3</sub> auf der KA Bad Sassendorf [nach ARGE, 2014]**

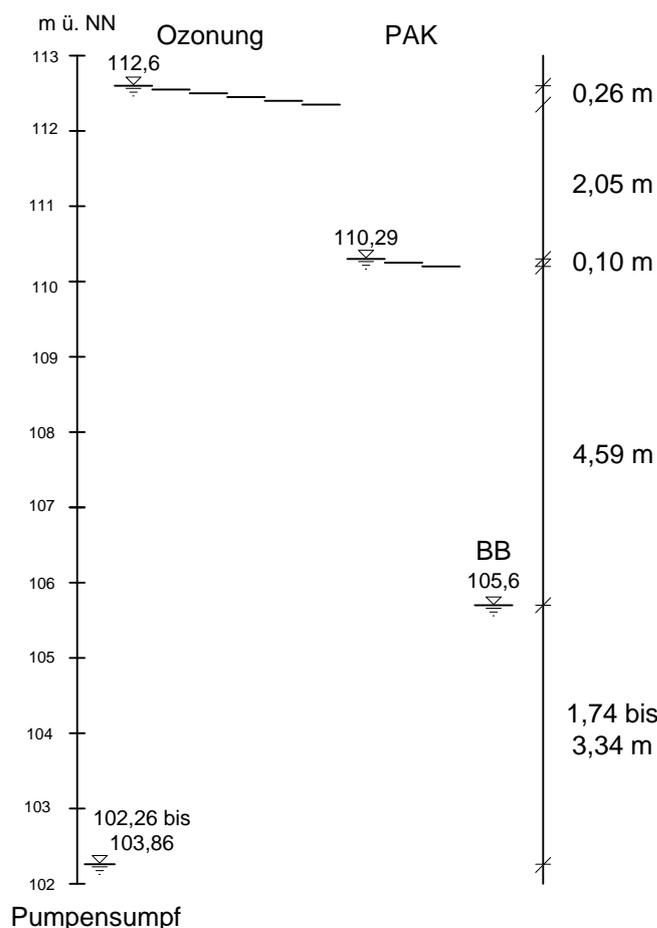
<b>kWh/m<sup>3</sup> Jahres- abwassermenge</b>	<b>kWh/m<sup>3</sup> Jahres- schmutzwasser- menge</b>	<b>kWh/(E<sub>CSB,mittel</sub>·a)</b>	<b>kWh/(E<sub>CSB,85- Perzentil</sub>·a)</b>
<b>0,046</b>	0,055	6	4

## 4.1.2 Kläranlage Schwerte

### 4.1.2.1 Förderhöhe

Bei der Betrachtung der Förderhöhen wird deutlich, dass die KA Schwerte zwar großtechnisch ausgelegt ist, jedoch trotzdem Pilotcharakter besitzt. Auf eine größtmögliche Flexibilität zur Versuchsdurchführung wurde Wert gelegt, was allerdings teilweise zu Lasten der Energieeffizienz ging. So durchfließt das Abwasser grundsätzlich die Ozonstufe und die PAK-Stufe, wobei die Differenz der Wasserspiegellagen zwischen dem letzten Ozonreaktor und dem ersten PAK-Behälter gut 2 m beträgt. Nach dem letzten PAK-Behälter fällt das Wasser um gut 4,5 m, wenn ins Belebungsbecken rezirkuliert wird.

In Abhängigkeit der Wasserspiegellage im Pumpensumpf beträgt die geodätische Förderhöhe in den ersten Ozonreaktor zwischen 8,74 m und 10,34 m. Beim Durchlaufen der sechs Ozonreaktoren werden 0,26 m abgebaut. Die Differenz der Wasserspiegellagen zwischen dem letzten Ozonreaktor und dem ersten PAK-Behälter beträgt 2,05 m. Zum Durchlaufen der drei PAK-Behälter im Freispiegelabfluss ist wiederum eine Spiegeldifferenz von 0,1 m erforderlich. Wird dann ins Belebungsbecken rezirkuliert (höchster Wasserstand der möglichen Rezirkulationsziele), so fällt das Wasser um 4,59 m. In Bild 4-10 sind die Wasserspiegellagen dargestellt.



**Bild 4-10: Wasserspiegellagen über NN**

Der Höhenunterschied zwischen den Wasserspiegellagen im Pumpensumpf und im Belebungsbecken muss in jedem Fall überwunden werden (1,74 m bis 3,34 m). Würden

die Behälter jedoch in den Boden eingelassen und auf die große Absturzhöhe sowohl zwischen dem letzten Ozonreaktor und dem ersten PAK-Behälter sowie zwischen dem letzten PAK-Behälter und dem Belebungsbecken verzichtet, so ergäben sich folgende Förderhöhen:

Ozon:  $1,74 + 0,26 = 2,00$  m bzw.  $3,34 + 0,26 = 3,60$  m

PAK:  $1,74 + 0,10 = 1,84$  m bzw.  $3,34 + 0,10 = 3,44$  m

Für eine Ozonbehandlung würden also nur 22,9 % bis 34,8 % und für eine PAK-Adsorption 21,1 % bis 33,3 % der tatsächlichen Förderhöhe benötigt. Da der Energieverbrauch beim Pumpen linear von der Förderhöhe abhängt, könnten somit beim Pumpwerk für eine Ozonbehandlung 65,2 % bis 77,1 % und für die PAK-Adsorption 66,7 % bis 78,9 % gespart werden.

#### 4.1.2.2 Rezirkulationsbetrieb

Bei den energetischen Auswertungen ist der Rezirkulationsbetrieb in Schwerte zu berücksichtigen. Bei Trockenwetter wird das Abwasser mehrfach über die vierte Reinigungsstufe geführt. Die Konzentrationen der Abwasserinhaltsstoffe und der Spurenstoffe im Zulauf zur vierten Reinigungsstufe sind somit niedriger als wenn eine reine Nachbehandlung stattfinden würde. Der energetische Nachteil einer mehrfachen Behandlung muss also der möglichen niedrigeren Dosiermenge gegenübergestellt werden. Bei den vorliegenden Versuchen war auch die Dosierung zunächst mengenabhängig auf die Zulaufmenge zur vierten Reinigungsstufe bezogen und nicht konzentrationsabhängig bspw. auf den DOC bezogen. Daher sind auch die folgenden energetischen Werte ebenfalls auf den Zulauf zur vierten Reinigungsstufe bezogen [THÖLE, 2012].

Des Weiteren wird durch den Rezirkulationsbetrieb das bereits gereinigte Abwasser erneut der biologischen Behandlung zugeführt, wobei sich die Frage stellt, ob dies zu Änderungen im dortigen Stromverbrauch führt. Dies wird im Folgenden vernachlässigt, da es durch die Mitbehandlung des bereits gereinigten Abwassers in der Biologie zu keinem Mehrverbrauch an Sauerstoff kommt. Die Sauerstoffversorgung stellt den Hauptstromverbraucher der biologischen Stufe dar. Um den TS-Gehalt im Belebungsbecken aufrecht zu erhalten, ist theoretisch die Rücklaufschlammmenge zu erhöhen, dies wurde im Versuchsbetrieb jedoch unterlassen, so dass es auch an dieser Stelle zu keinem Mehrverbrauch an Strom kommt. Es gibt möglicherweise aber auch gegenläufige und nicht so einfach zu quantifizierende Effekte, da der Zulauf der biologischen Reinigungsstufe durch den Rezirkulationsbetrieb verdünnt wird. Somit wird die Stickstoffkonzentration gesenkt. [THÖLE, 2013]

#### 4.1.2.3 Stromverbrauch der PAK-Zugabe auf der KA Schwerte

Der Stromverbrauch der **PAK**-Anlage wurde über die in Tabelle 4-4 angegebenen Zeiträume ausgewertet. Die Dosiermengen betragen dabei zwischen 5 und 20 mg/L.

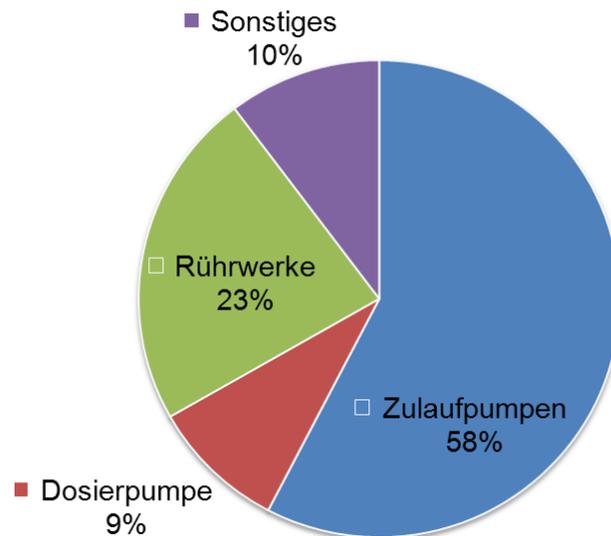
Tabelle 4-4: Energetische Auswertung der PAK-Versuche auf der KA Schwerte

Zeitraum		Dosiermenge	Mittlere Zulaufmenge	Mittlere Leistungsaufnahme	Spezifischer Stromverbrauch
von	bis	mg/L	m <sup>3</sup> /h	kW	kWh/m <sup>3</sup>
24.01.2011	01.02.2011	5	590,8	48,6	0,082
09.02.2011	24.02.2011	10	590,2	47,1	0,080
22.03.2011	06.04.2011	15	548,4	41,3	0,075
03.05.2011	11.05.2011	20	486,8	37,8	0,078

Die mittlere Leistungsaufnahme liegt zwischen 37,8 kW und 48,6 kW, im Mittel bei allen Dosiermengen bei 43,7 kW. Dies entspricht etwa 18 % der mittleren Leistungsaufnahme der gesamten Kläranlage in diesem Zeitraum. Der spezifische Stromverbrauch beträgt zwischen 0,075 kWh/m<sup>3</sup> und 0,082 kWh/m<sup>3</sup>, im Mittel **0,079 kWh/m<sup>3</sup>**.

Der Wert liegt in guter Übereinstimmung mit Stromverbrauch des mittleren Szenarios aus Literaturwerten nach Kapitel 2.2.1. Durch die Rückführung des behandelten Volumenstroms ins Belebungsbecken (im Freigefälle) entfallen in Schwerte Absetzbecken und Sandfilter zur Abtrennung der PAK. Es erfolgt durch die kaskadierte Bauweise keine Rezirkulation. Die Dosierpumpe benötigt 0,01 kWh/m<sup>3</sup>, das Rührwerk 0,02 kWh/m<sup>3</sup>. Der Energieeintrag im Kontaktbecken entspricht 22,4 W/m<sup>3</sup> und liegt im Vergleich zu den Literaturwerten (vgl. 2.2.1) somit relativ hoch (8 bis 20 W/m<sup>3</sup>). In der KA Schwerte wird nicht davon ausgegangen, dass es zu einem Mehrverbrauch an Strom in der Schlammbehandlung kommt.

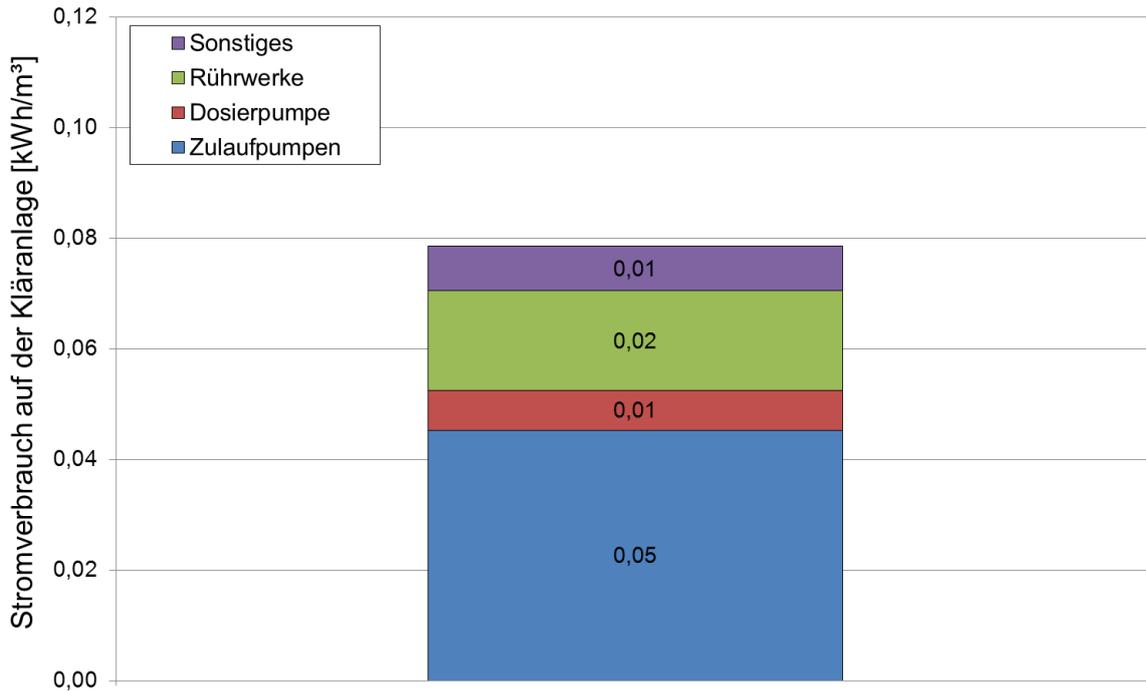
Die Leistungsaufnahme der Hauptverbraucher Zulaufpumpen, Dosierpumpe und Rührwerke ist nicht von der Dosiermenge abhängig, so dass die Versuchszeiträume im Folgenden zusammengefasst wurden. In Bild 4-11 ist der Stromverbrauch prozentual auf die Hauptverbraucher verteilt. Mit 57,6 % am Gesamtstromverbrauch der PAK-Anlage dominieren die Zulaufpumpen.



**Bild 4-11: Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate der PAK-Anlage auf der KA Schwerte**

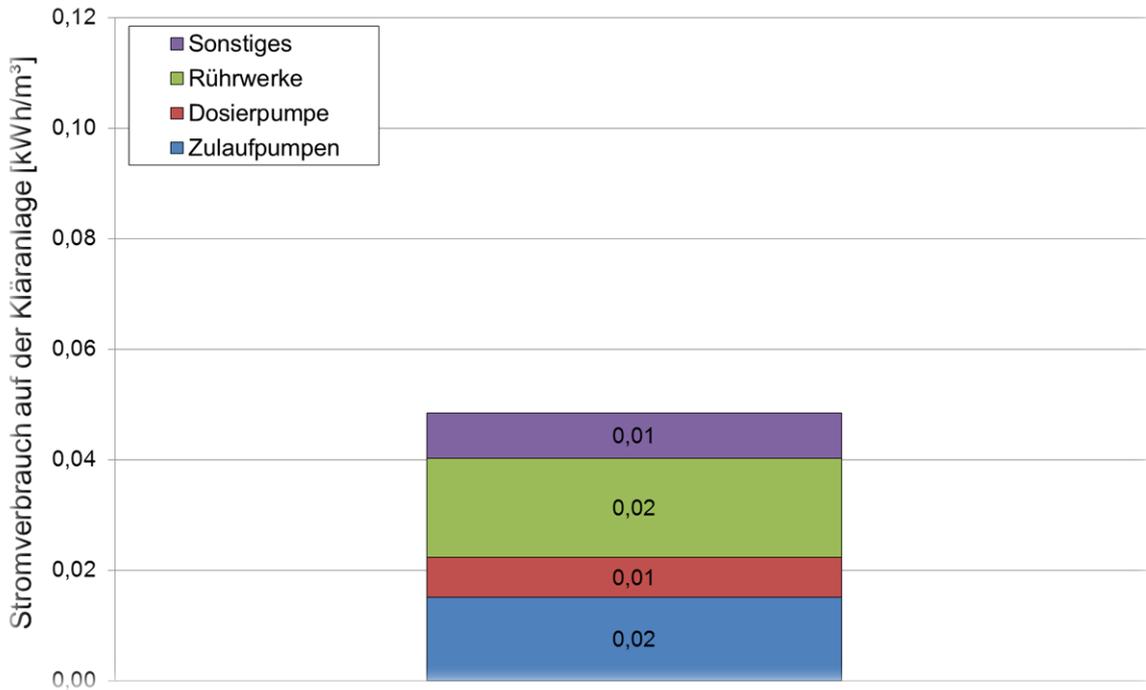
Die Differenz der Leistungsaufnahme der gesamten Unterverteilung der Spurenstoffelimination und der Addition der Leistungsaufnahme der Hauptverbraucher ergibt eine Abweichung von 10,3 %. Sie ist unter dem Begriff „Sonstiges“ aufgeführt. Ursächlich können hierfür weitere kleine Verbraucher in der Dosierung der PAK sein, die selten anspringen, wie beispielsweise ein Kugelhahn, ein Rüttelboden, ein Zellenrad, ein Rührwerk, eine Schnecke, ein Filter, ein Kompressor, eine Absperrklappe und die Silobefüllung.

In Bild 4-12 ist der Stromverbrauch auf der Kläranlage in kWh/m<sup>3</sup> den einzelnen Verbrauchern zugeordnet.



**Bild 4-12: Stromverbrauch [kWh/m³] der einzelnen Aggregate der PAK-Anlage auf der KA Schwerte bei realer Förderhöhe**

Wie oben erläutert, sind theoretisch nur maximal 33,3 % der Förderhöhe erforderlich. Unter dieser Annahme würde sich ein Stromverbrauch von 0,048 kWh/m³ ergeben und der Stromverbrauch würde sich wie in Bild 4-13 darstellen.



**Bild 4-13: Stromverbrauch der einzelnen Aggregate der PAK-Anlage auf der KA Schwerte bei theoretisch erforderlicher Förderhöhe**

Um die Energieverbräuche in Bezug zur Reinigungsleistung zu bringen, werden wieder einige Ergebnisse aus ARGE (2011) wiedergegeben. Im Rezirkulationsbetrieb ist nicht nur die PAK-Dosiermenge für die Eliminationsleistung der Gesamtanlage entscheidend, sondern auch das Massenverhältnis der PAK am belebten Schlamm, da davon ausgegangen wird, dass weitere freie Adsorptionsplätze in der biologischen Stufe von Spurenstoffen belegt werden können. Hierbei ist anzumerken, dass bei Zugabe von PAK der Energieverbrauch nicht von der Dosiermenge abhängt. Unterschiede ergeben sich hier nur in den Kosten durch den PAK-Verbrauch sowie in der ökologischen Betrachtung.

In Tabelle 4-5 wurde die frachtbezogene Elimination ( $\eta$ ) bei einer Zugabe von PAK für alle Stoffe in Anlehnung an ARGE (2011) für unterschiedliche Versuchseinstellungen (VE) in Kategorien eingeordnet. Dies erfolgte für die konventionelle Referenzstraße und die Versuchsstraße mit allen Dosiermengen. In der Referenzstraße wurden erwartungsgemäß die meisten Stoffe zu weniger als 30 % eliminiert und somit in Kategorie 1 eingeordnet. Diclofenac wurde in Kategorie 2 eingeordnet ( $30 \% < \eta < 50 \%$ ). DOC, die Moschusduftstoffe AHTN, HCCP sowie Bisphenol A wurden zwischen 50 und 90 % eliminiert und somit in Kategorie 3 eingeordnet und CSB mit einer Elimination von über 90 % in Kategorie 4.

Bereits bei einer Dosiermenge von 5 mg PAK/L werden viele Stoffe von Kategorie 1 in Kategorie 2 und 3 verschoben. Bei einer Dosierung von 10 mg PAK/L verbleibt nur Ritalinsäure in Kategorie 1, dies lässt sich auch durch noch höhere Dosierung nicht ändern. Amidotrizoessäure ist bei 10 und 15 mg PAK/L in Kategorie 2, und gelangt erst bei 20 mg PAK/L in Kategorie 3. Bei 15 mg PAK/L sind somit alle Stoffe bis auf Ritalinsäure, Amidotrizoessäure, Iopamidol und das Flammschutzmittel TCPP in Kategorie 4 und werden zu über 90 % eliminiert. Eine Steigerung auf 20 mg PAK/L bringt nur für Amidotrizoessäure eine Verbesserung. [ARGE, 2011]

**Tabelle 4-5: Stoffspezifische Kategorisierung der frachtbezogenen Elimination der Referenz- und Versuchsstraße bei verschiedenen Dosiermengen [ARGE, 2011]**

Fracht- bezogene Elimination	Referenzstraße 1	VE 1 $C_{PAK} = 5 \text{ mg/l}$	VE 2 $C_{PAK} = 10 \text{ mg/l}$	VE 3 $C_{PAK} = 15 \text{ mg/l}$	VE 4 $C_{PAK} = 20 \text{ mg/l}$
Kategorie 1 $\eta \leq 30\%$	Iopamidol, Amidotrizoesäure, TCPP, 1-H-Benzotriazol, Carbamazepin, Metoprolol, Sulfamethoxazol, Melperon, Ritalinsäure	Amidotrizoesäure, Sulfamethoxazol, Ritalinsäure	Ritalinsäure	Ritalinsäure	Ritalinsäure
Kategorie 2 $30\% < \eta \leq 50\%$	Diclofenac	Iopamidol, TCPP	Amidotrizoesäure	Amidotrizoesäure	
Kategorie 3 $50\% < \eta \leq 90\%$	DOC, AHTN, HCCP, Bisphenol A	DOC, 1-H-Benzotriazol, AHTN, HCCP, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol, Melperon, Bisphenol A	DOC, Iopamidol, TCPP, 1-H-Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol, Metoprolol, Bisphenol A	Iopamidol, TCPP	Amidotrizoesäure Iopamidol, TCPP
Kategorie 4 $\eta > 90\%$	CSB	CSB	CSB, AHTN, HCCP, Melperon	CSB, DOC, AHTN, HHCP, 1-H-Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol, Metoprolol, Melperon, Bisphenol A	CSB, DOC, AHTN, HHCP, 1-H-Benzotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol, Metoprolol, Melperon, Bisphenol A

#### 4.1.2.4 Stromverbrauch der Ozonung in Schwerte

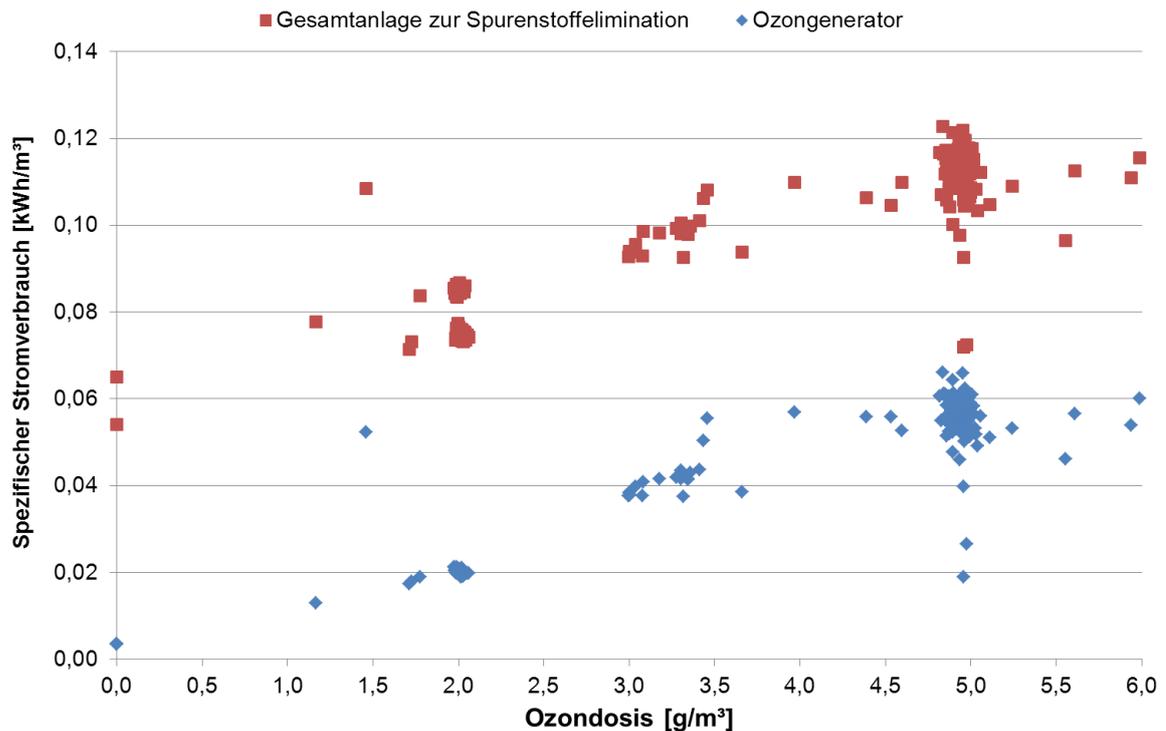
Der Stromverbrauch der **Ozonanlage** wurde über die in Tabelle 4-6 angegebenen Zeiträume ausgewertet. Die Dosiermengen betragen dabei 2 und 5 mg/L.

**Tabelle 4-6: Energetische Auswertung der Ozonversuche auf der KA Schwerte**

Zeitraum		Dosier- menge (Sollwert)	Mittlere Zulauf- menge	Mittlere Leistungs- aufnahme	Spezifischer Strom- verbrauch
von	bis	mg/L	m <sup>3</sup> /h	kW	kWh/m <sup>3</sup>
13.03.2012	27.03.2012	2	734,7	58,9	0,080
26.04.2012	11.05.2012	5	671,6	74,5	0,111

Die Solldosiermenge wird im Mittel nahezu erreicht und beträgt während der Auswertezwischenräume 1,95 mg/L bzw. 4,76 mg/L. Die Leistungsaufnahme beträgt bei einer Solldosis von 2 mg/L 58,9 kW und bei 5 mg/L 74,5 kW. Dies entspricht 23 % bzw. 26 % der mittleren gesamten Leistungsaufnahme der Kläranlage zu diesem Zeitpunkt. Der spezifische Stromverbrauch beträgt bei einer Solldosis von 2 mg/L **0,080 kWh/m<sup>3</sup>** und

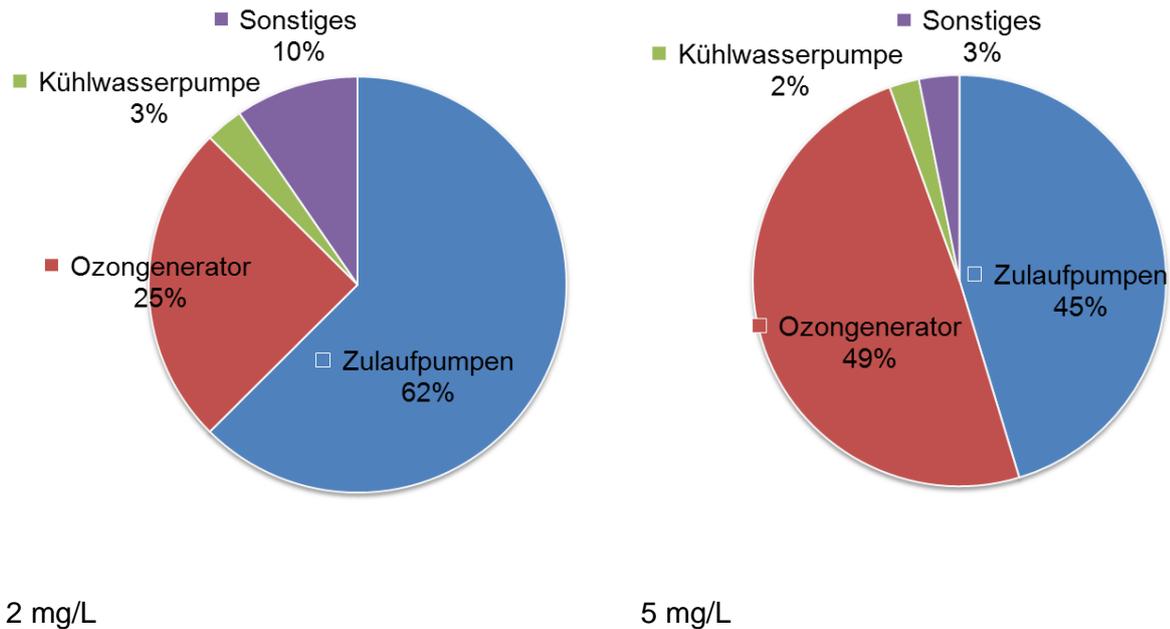
liegt damit in der Größenordnung der PAK-Stufe. Bei einer Solldosis von 5 mg/L ist der Stromverbrauch höher und liegt spezifisch bei **0,111 kWh/m<sup>3</sup>**. Der Stromverbrauch des Ozongenerators liegt in der Größenordnung wie in Bad Sassendorf. Bei einer Dosiermenge um 2 mg/L werden für den Ozongenerator 0,020 kWh/m<sup>3</sup> und um 5 mg/L 0,054 kWh/m<sup>3</sup> benötigt. Bild 4-14 zeigt den spezifischen Stromverbrauch der Gesamtanlage zur Spurenstoffelimination und des Ozongenerators in Abhängigkeit der Ozondosis.



**Bild 4-14: Spezifischer Stromverbrauch [kWh/m<sup>3</sup>] in Abhängigkeit der Ozondosis**

Diese Werte liegen in guter Übereinstimmung mit den mittleren Szenarien aus der Literaturlauswertung in Kapitel 2.1. Der Ozoneintrag mittels Diffusoren kommt durch den im Sauerstoff gespeicherten Druck ohne weiteren Stromverbrauch aus. Die Restozonvernichtung erfolgt katalytisch, wobei der Stromverbrauch nicht explizit angegeben wird, sondern im Stromverbrauch des Ozongenerators enthalten ist. Die Kühlung erfolgt mit gereinigtem Abwasser. Anders als bei der Literaturlauswertung ist der Stromverbrauch der Kühlwasserpumpen jedoch nicht zu vernachlässigen. Eine Nachbehandlung kann ggf. mit PAK erfolgen, ist hier jedoch energetisch nicht berücksichtigt.

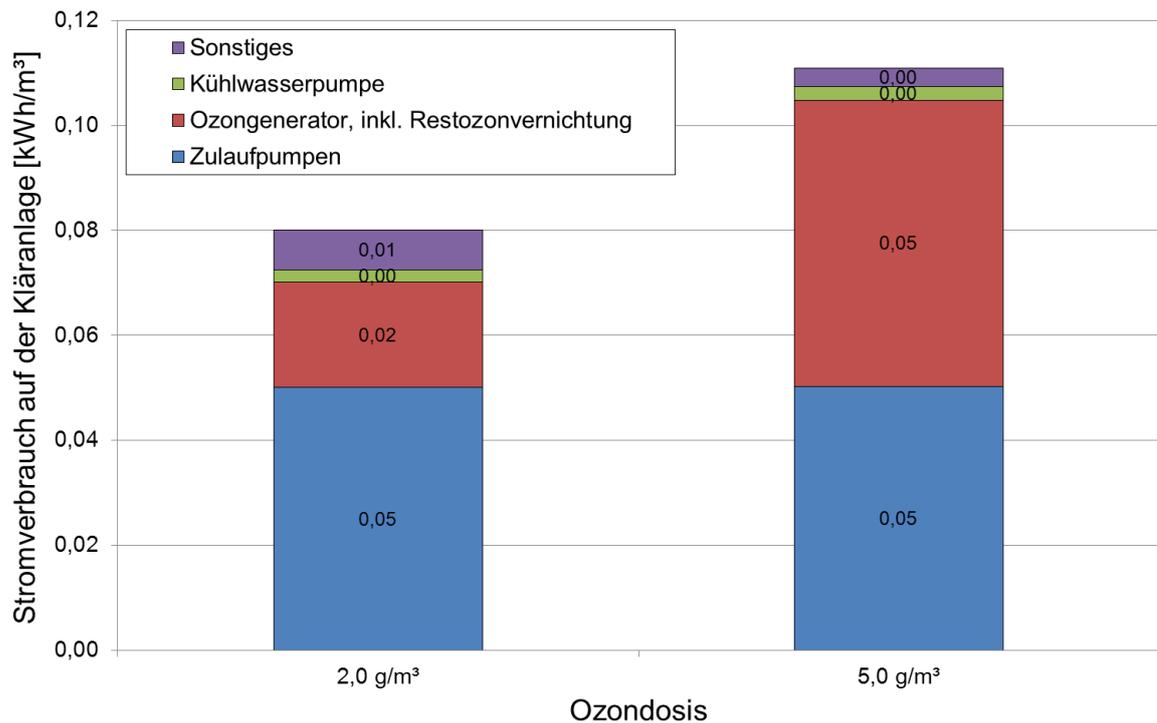
Bei einer höheren Ozondosis verschiebt sich erwartungsgemäß auch der prozentuale Anteil des Stromverbrauchs in Richtung Ozongenerator, wie in Bild 4-15 zu sehen ist.



**Bild 4-15: Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate der Ozonung auf der KA Schwerte**

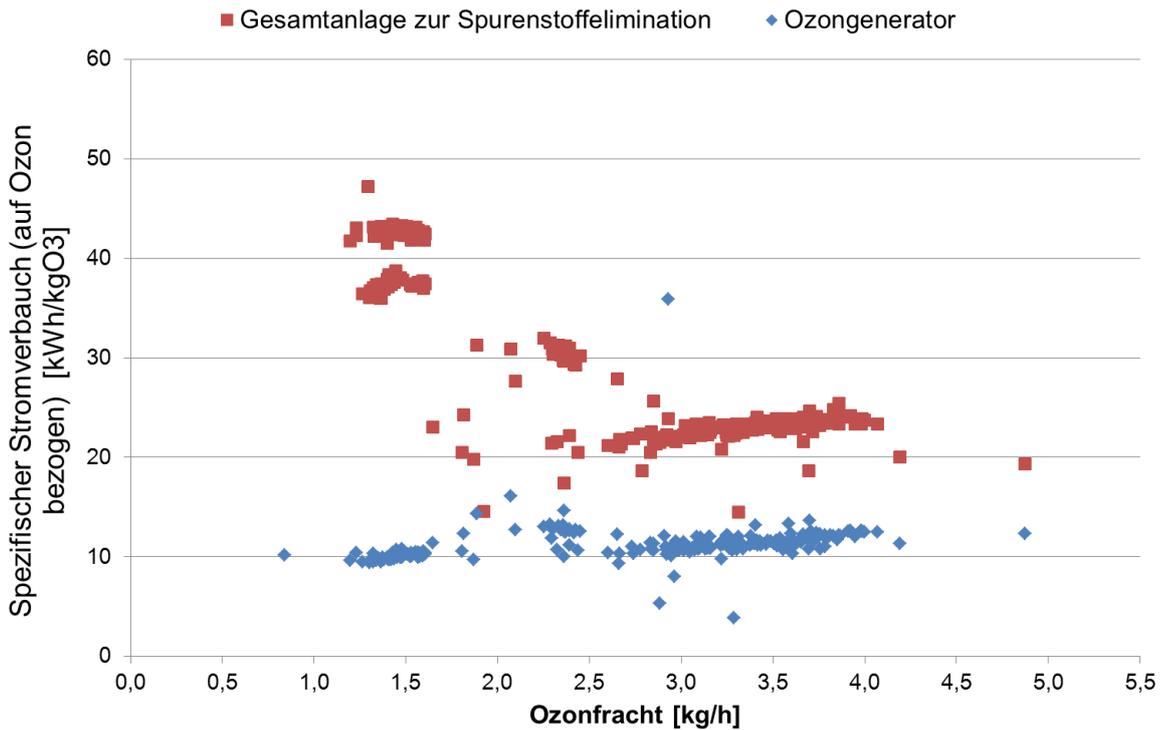
Mit einem Anteil von über 62 % bzw. 45 % am Gesamtstromverbrauch dominieren auch hier die Zulaufpumpen. Durch Addition der drei Stromverbraucher Zulaufpumpen, Ozongenerator und Kühlwasserpumpe konnten im Mittel über 90 % des Gesamtstromverbrauchs abgedeckt werden. Beim Ozongenerator sind pauschal 2,5 kW addiert worden. Dieser Mehrverbrauch zwischen dem im PLS registrierten Stromverbrauch und dem tatsächlichen wurde bei der Leistungsmessung der einzelnen Aggregate aufgedeckt und beinhaltet u.a. das Klimagerät im Schaltschrank, den Restozonvernichter, einen Ventilator, kleinere Messgeräte, Steuerung und Beleuchtung. Unter dem Begriff „Sonstiges“ ist erneut die Differenz zwischen der Leistungsaufnahme der gesamten Unterverteilung der Spurenstoffelimination und der Addition der Leistungsaufnahme der Hauptverbraucher aufgeführt.

In Bild 4-16 ist der Stromverbrauch auf der Kläranlage in kWh/m<sup>3</sup> den einzelnen Verbrauchern zugeordnet.



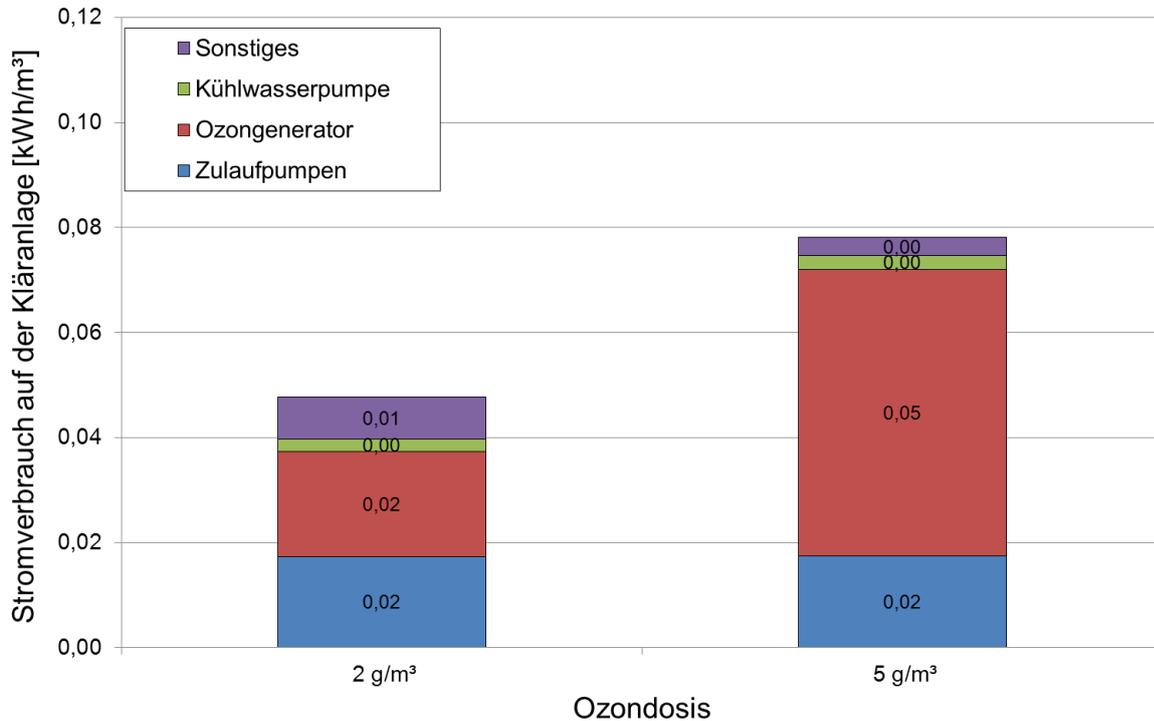
**Bild 4-16: Stromverbrauch [kWh/m³] der einzelnen Aggregate der Ozonung auf der KA Schwerte bei realer Förderhöhe**

In Bild 4-17 ist der spezifische, auf Ozon bezogene, Stromverbrauch in Abhängigkeit der Ozonfracht dargestellt. Der Stromverbrauch des Ozongenerators schwankt hierbei um 10 kWh/kg O<sub>3</sub>, für die Solldosis von 2 mg/L liegt er im Mittel bei 10,1 kWh/kg O<sub>3</sub>, für die Solldosis von 5 mg/L liegt er im Mittel bei 11,6 kWh/kg O<sub>3</sub>. Für den Stromverbrauch der gesamten Anlage zur Spurenstoffelimination liegen bei den zwei Solldosen die Werte bei 40 kWh/kg O<sub>3</sub> bzw. 22,1 kWh/kg O<sub>3</sub>, da die Pumpen unabhängig von Ozondosis sind.



**Bild 4-17: Spezifischer, auf Ozon bezogener, Stromverbrauch [kWh/kg O<sub>3</sub>] in Abhängigkeit der Ozonfracht**

Für eine reine Ozonbehandlung auf der KA Schwerte sind theoretisch nur 34,8 % der Förderhöhe erforderlich, so dass sich ein Gesamtstromverbrauch von 0,047 kWh/m<sup>3</sup> bei 2 mg/L bzw. 0,078 kWh/m<sup>3</sup> bei 5 mg/L ergeben würde. Die Verteilung des Stromverbrauchs sähe dann wie in Bild 4-18 dargestellt aus.



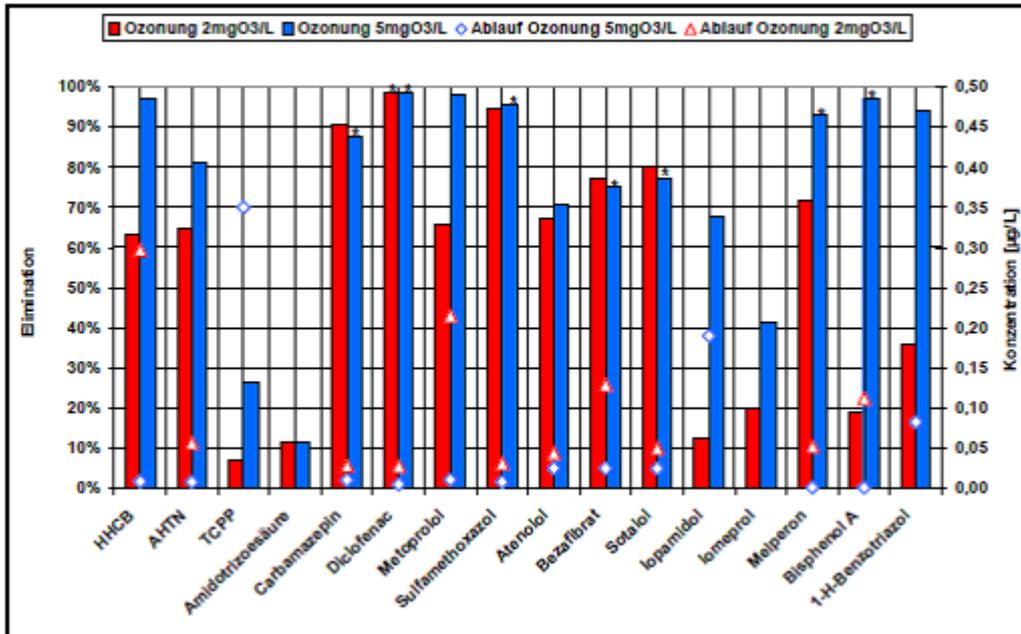
**Bild 4-18: Theoretische Verteilung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate der Ozonung auf der KA Schwerte bei theoretisch erforderlicher Förderhöhe**

Zur Eliminationsleistung der Ozonung finden sich in ARGE (2011) noch keine Angaben. In ARGE (2014) sind die Eliminationsleistungen der oxidativen Behandlung aufgeführt. In Schwerte wurden vier Konzepte der Ozondosierung untersucht: die mengenproportionale Ozonzugabe, die Ozonzugabe in Abhängigkeit der Ozonkonzentration im Off-Gas, die Ozonzugabe in Abhängigkeit der Ozonkonzentration der wässrigen Phase und die Zugabe in Abhängigkeit des  $SAK_{254}$ .

Aufgrund der baulichen Ausführung der Anlage (schwankende Wasserspiegellage und Eintrag von Umgebungsluft in den Gasraum) konnte die Regelung des Ozoneintrags in Abhängigkeit der Konzentration im Offgas nicht umgesetzt werden. Hierzu wäre eine gezielte Zwangsentlüftung des Gasraumes erforderlich. Die Regelungen des Ozonintrags in Abhängigkeit der Ozonkonzentration in der wässrigen Phase und in Abhängigkeit des  $SAK_{254}$  zeigten, dass diese Regelungskonzepte prinzipiell angewendet werden können. Allerdings ist eine weitere Verbesserung der quantitativen Genauigkeit der Regelungskonzepte notwendig. Auch dem Einbauort der Messsonde kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Ein vielversprechendes Regelungskonzept stellt die Regelung in Abhängigkeit des  $SAK_{254}$  dar, da mittels der Absorbanzabnahme ( $SAK_{254}$  als Summenparameter) zusätzlich Rückschlüsse auf die Oxidation der Spurenstoffe gezogen werden können. Allerdings müssen hier noch weitere Untersuchungen zur Kompensation des Einflusses von im Wasser gelöstem Ozon auf die kontinuierliche  $SAK_{254}$ -Messung stattfinden, bevor dieses Konzept großtechnisch etabliert werden kann. [ARGE, 2014]

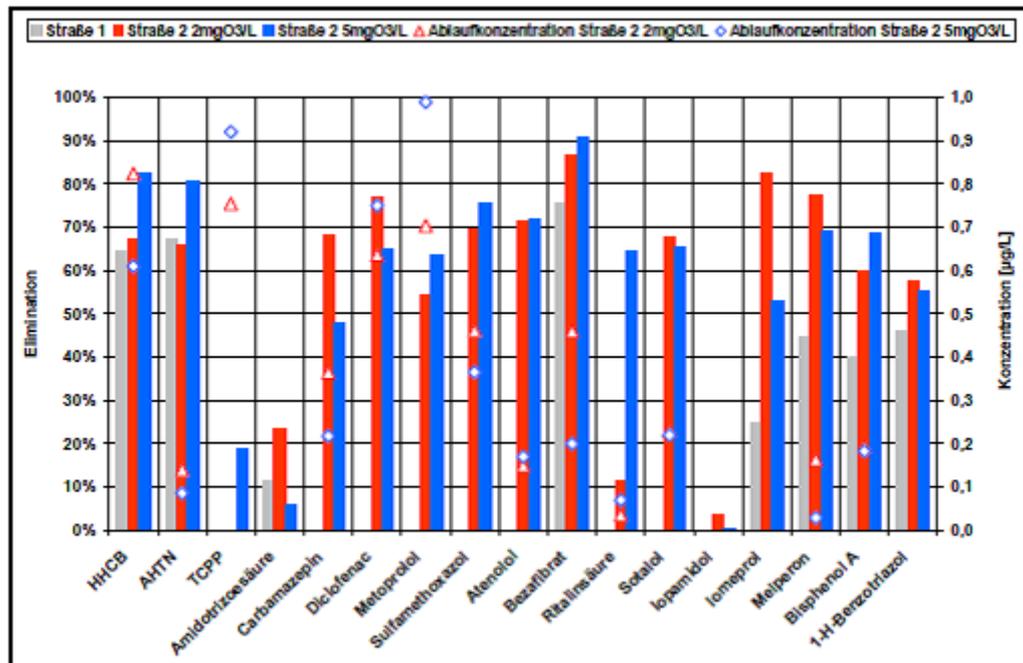
Da die Ergebnisse, die zur Energieauswertung der Ozonung auf der KA Schwerte benutzt wurden, bei der mengenproportionalen Zugabe erfolgen, werden an dieser Stelle lediglich die Eliminationsgrade für Spurenstoffe bei diesem Konzept aufgeführt. Für weitere Eliminationsgrade wird auf ARGE (2014) verwiesen. Aufgrund der dynamischen Rezirkulation in Schwerte muss zwischen der Elimination in der reinen Ozonung und der ganzen Straße unterschieden werden. In Bild 4-19 sind die durchschnittlichen Eliminationsgrade für unterschiedliche Spurenstoffe in der eigentlichen Ozonung bei der Zugabe von 2 und 5 mg/L Ozon dargestellt (entspricht 2 bzw. 5 g  $O_3/m^3$ ). Bereits bei einer Zugabe von 2 mg  $O_3/L$  (DOC-Konzentration im Zulauf: 4,7 bis 7,2 mg DOC/L) kann für die gut oxidierbaren Arzneimittelrückstände Diclofenac, Carbamazepin und Sulfamethoxazol eine Elimination von mehr als 90 % erreicht werden. Durch Erhöhung der Ozondosis auf 5 mg/L (DOC-Konzentration im Zulauf: 5,9-7,3 mg DOC/L) kann die Elimination der mäßig mit Ozon reagierenden Substanzen, wie bspw. Metoprolol, Bisphenol A sowie 1H-Benzotriazol, deutlich gesteigert werden. Schlecht bzw. gar nicht mit Ozon reagierende Verbindungen wie das Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure werden nur geringfügig eliminiert. Die Elimination der iodierten Röntgenkontrastmittel Iopamidol und Iomeprol wurde bei einer Ozonzugabe von 5 mg $O_3/L$  von 10 % auf knapp 70 % (Iopamidol) bzw. von 20 % auf 40 % (Iomeprol) gesteigert. Für einige Stoffe konnte nur eine Mindestelimination angegeben werden, da die Ablaufkonzentrationen schon unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) lagen. Auch wird bei Stoffen, deren Ablaufkonzentration an der BG liegt, der Eliminationsgrad durch die Zulaufkonzentration bestimmt; dies begründet, dass die für einige Stoffe (z.B. Diclofenac, Carbamazepin, Sulfamethoxazol) geringere

oder gleichbleibende Eliminationsgrade bei höheren Ozondosen im Vergleich zu einer geringeren Ozondosis auftreten. In diesen Fällen ist aber i.d.R. die durchschnittliche Ablaufkonzentration des Stoffes geringer. Die Abnahme des SAK<sub>254</sub> beträgt bei der mengenproportionalen Ozonzugabe im Mittel 25 % mit einer Dosis von 2 mgO<sub>3</sub>/L bzw. 43 % mit einer Dosis von 5 mgO<sub>3</sub>/L. [ARGE, 2014]



**Bild 4-19: Durchschnittliche Eliminationsleistung (Säulen) und Ablaufkonzentrationen (Symbole) der Ozonung (Bilanzraum Ozonungzulauf / Ozonungsablauf) bei mengenproportionaler Ozonzugabe von 2 und 5 mg O<sub>3</sub>/L im dynamischen Rezirkulationsbetrieb (\* = Mindestelimination) [ARGE, 2014]**

In Bild 4-20 sind die Eliminationsgrade in der gesamten biologischen Stufe der Ozonstraße dargestellt (Straße 2). Zum Vergleich wird Straße 1 als Referenz (graue Säulen) aufgeführt. Die Eliminationsgrade sowie die Ablaufkonzentrationen sind für eine Dosierung von 2 mg/L O<sub>3</sub> sowie 5 mg/L O<sub>3</sub> aufgeführt. Beim Vergleich der Gesamtelimination der Straße 2 für beide Ozondosen fällt die geringfügig verbesserte Gesamtelimination bei einer Ozonzugabe von 5 mg/L O<sub>3</sub> im Vergleich zur Dosis von 2 mg/L O<sub>3</sub> für die Stoffe Carbamazepin und Diclofenac auf, gleichwohl der Eliminationsgrad der Ozonstufe für diese Stoffe bei der höheren Ozondosis leicht angestiegen bzw. gleich geblieben ist (vgl. Bild 4-19). Die Ursache hierfür sind unterschiedliche Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage und im Zulauf der Ozonung an den jeweiligen Untersuchungstagen. Für die meisten Stoffe liegt die durchschnittliche Elimination bei einer applizierten Ozondosis von 5 mg/L O<sub>3</sub> zwischen 50 und 70 %. Lediglich die Moschusstoffe und Bezafibrat konnten zu etwa 80 % eliminiert werden. [ARGE, 2014]



**Bild 4-20:** Durchschnittlicher Eliminationsgrad und Ablaufkonzentrationen der Straße 2 (Bilanzraum Zulauf Belebungsbecken/Ablauf Nachklärung 2 bei mengenproportionaler Ozonzugabe von 2 und 5 mg O<sub>3</sub>/L im dynamischen Rezirkulationsbetrieb und durchschnittliche Eliminationsgrade der Referenzstraße 1 (\* = Mindestelimination) [ARGE, 2014]

#### 4.1.2.5 Kombinierte oxidative und adsorptive Behandlung

Zusätzlich zu der reinen adsorptiven und der reinen oxidativen Behandlung wurde in Schwerte die Kombination aus oxidativer und adsorptiver Behandlung untersucht. Der Vergleich von einer Kombination von 2 mg/L O<sub>3</sub> + 5 mg/L PAK mit 5 mg/L O<sub>3</sub> + 5 mg/L PAK zeigte keine nennenswerte Steigerung der Eliminationsleistung durch eine erhöhte Ozonzugabe. Weiterhin wurde noch die Kombination 2 mg/L O<sub>3</sub> und 10 mg/L PAK untersucht und mit der reinen Zugabe von 10 mg/L PAK verglichen. Für die meisten hier untersuchten Arzneimittel erreichte die kombinierte Behandlung einen höheren Eliminationsgrad und eine geringere Ablaufkonzentration im Vergleich zur alleinigen PAK-Zugabe. Auch ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Phase I [ARGE, 2011] lässt auf eine verbesserte Elimination durch diese kombinierte Behandlung schließen. Eine Quantifizierung der zusätzlichen Elimination durch die kombinierte Behandlung auf Basis der Ergebnisse aus ARGE (2014) ist nicht möglich und erfordert weitere Untersuchungen. Für genaue Eliminationsgrade der kombinativen Untersuchungen wird auf ARGE (2014) verwiesen.

#### 4.1.2.6 Vergleich des Stromverbrauchs der Verfahrenstechniken

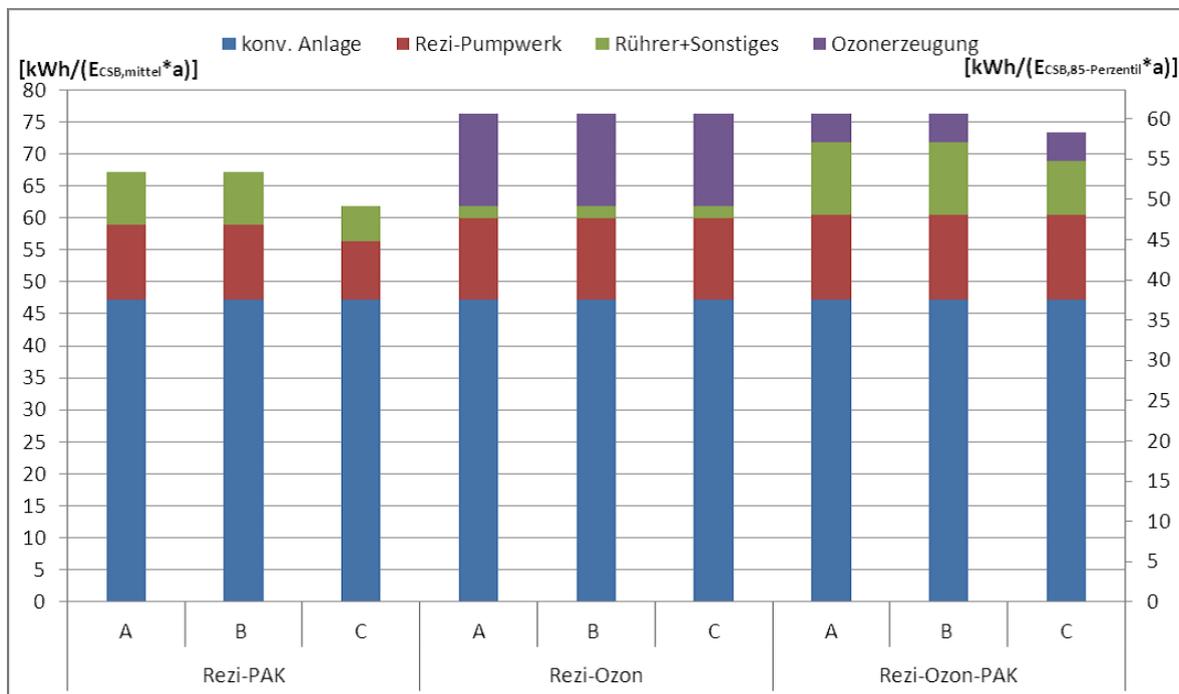
Aufgrund der in ARGE (2011) und ARGE (2014) ermittelten Ergebnisse wurden für die Kostenbetrachtungen für die Straße 2 in ARGE (2014) folgende Dosiermengen gewählt, die eine zufriedenstellende Elimination an Spurenstoffe gewährleisten sollen:

- Rein adsorptive Behandlung: **10 mg/L PAK**
- Rein oxidative Behandlung: **5 mg/L O<sub>3</sub>**

- Kombination oxidativ-adsorptive Behandlung: **2 mg/L O<sub>3</sub> und 5 mg/L PAK**

In Bild 4-21 sind die einwohnerspezifischen Energieverbräuche der KA Schwerte für die unterschiedlichen Verfahrensvarianten aufgeführt. Es wird zwischen drei Szenarien für die Kostenbetrachtung unterschieden:

- Gesamtbetrachtung ohne Investitionsförderung: sämtliche Kosten der Versuchsanlage auf der Kläranlage werden angesetzt, auch die Anlagenteile, die nicht in Betrieb sind. Es handelt sich hierbei also um eine Maximalbetrachtung.
- Gesamtbetrachtung mit Investitionsförderung: Hier wird die gewährte finanzielle Förderung der Investitionen der Versuchsanlage durch das Land Nordrhein-Westfalen (70 % der förderungsfähigen Kosten) berücksichtigt und somit die tatsächliche Kostensituation auf der Kläranlage bei einem Weiterbetrieb am Standort realistisch dargestellt. Auf den Energieverbrauch hat dies jedoch keinen Einfluss.
- Optimierte Betrachtung: hier werden fiktive Veränderungen der Anlage berücksichtigt, die aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen sinnvoll und machbar erscheinen, und bei einer erneuten Investitionsentscheidung umgesetzt würden. Für die KA Schwerte wird also die nicht benötigte Verfahrenstechnik (Ozonanlage bzw. PAK-Anlage) nicht betrachtet und ein hydraulisch optimiertes Rezirkulationspumpwerk angesetzt.



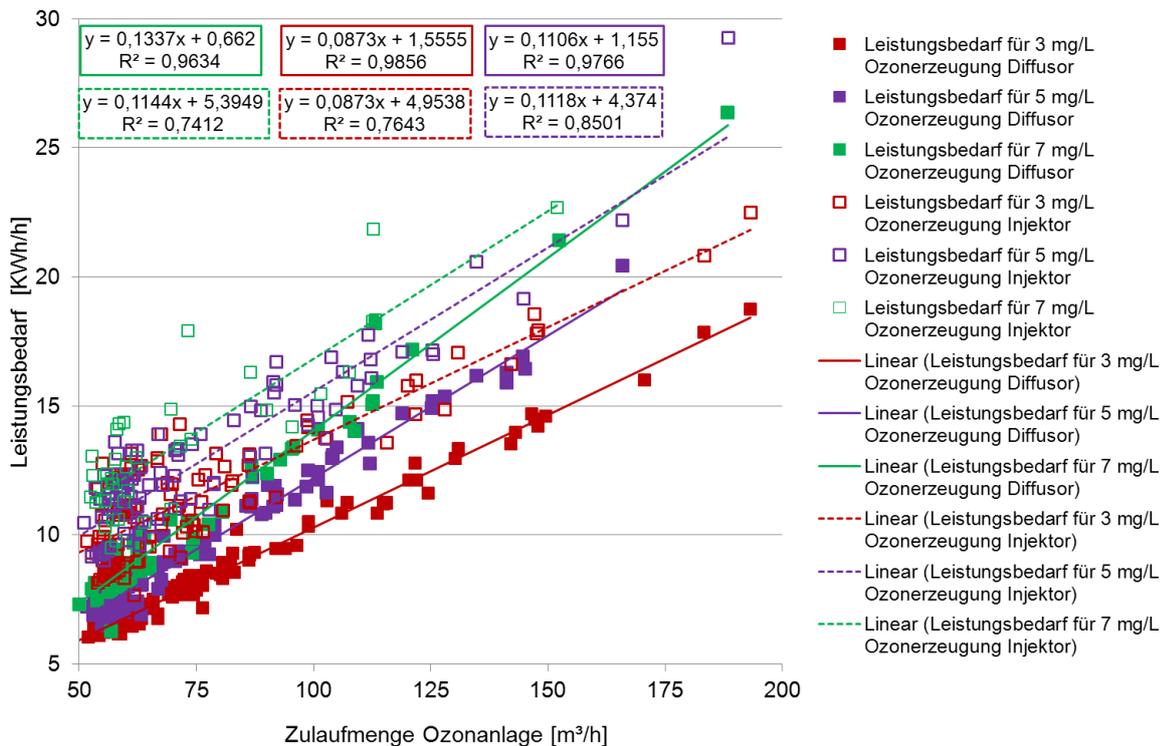
**Bild 4-21: Einwohnerspezifischer Energieverbrauch der KA Schwerte in Abhängigkeit der gewählten Verfahrenskombination und des gewählten Kosten-Szenarios [ARGE, 2014]**

In der nach Szenario C optimierten Betrachtung erhöht sich der Gesamtenergiebedarf einer konventionellen Kläranlage durch die Rezi-Ozon/PAK-Anlage um 56 % (ca. 26 kWh/(E<sub>CSB,mittel</sub>\*a)), bei der Verfahrensweise Rezi-Ozon um 62 % (ca.

29 kWh/(E<sub>CSB,mittel</sub>·a) und bei der Verfahrensweise Rezi-PAK um 31 % (ca. 15 kWh/(E<sub>CSB,mittel</sub>·a)). Der geringste Energieverbrauch auf der Kläranlage findet bei der rein adsorptiven Behandlung mit Rezirkulation statt, hier können die höher gelegenen Ozongeneratoren umfahren werden und die Ozonerzeugung fällt weg. Obwohl bei der kombinierten Behandlung der Energieverbrauch der Rührer und sonstiger Komponenten erhöht wird, liegt der Energieverbrauch bei der optimierten Betrachtung leicht unterhalb dem der alleinigen Ozonung, da weniger Ozon zudosiert und entsprechend produziert werden muss. Ohne den Betrieb des standortspezifischen Rezi-Pumpwerkes ergeben sich Steigerungsraten im Vergleich zur konventionellen Anlage bei Rezi-Ozon/PAK von 27 % (ca. 13 kWh/(E<sub>CSB,mittel</sub>·a)), bei Rezi-Ozon von 35 % (ca. 16 kWh/(E<sub>CSB,mittel</sub>·a)), und bei Rezi-PAK von 11 % (ca. 5 kWh/(E<sub>CSB,mittel</sub>·a)); der deutliche Einfluss des Pumpwerkes ist demnach erkennbar. Etwaige Einflüsse auf die Schlammigenschaften (Erhöhung des Heizwertes) werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. [ARGE, 2014]

### 4.1.3 Kläranlage Duisburg-Vierlinden

Die Inbetriebnahme erfolgte im Juni 2011 und es wurden Energiedaten im Zeitraum vom 1.7.2011 bis zum 31.12.2012 für Dosiermengen von 3, 5 und 7 mg/L (entsprechend 3, 5 und 7 g/m<sup>3</sup>) Ozon als Tagesmittelwerte erfasst und ausgewertet. Die Auswertung erfolgte für beide Straßen getrennt. In Bild 4-22 sind die erfassten Leistungsdaten für beide Straßen für die jeweiligen Dosierungen 3, 5 und 7 mg/L dargestellt. Hierbei wurden nur Tage in die Auswertung mit aufgenommen, an denen auch diese Dosiermengen appliziert wurden. Tage, an denen höhere Dosiermengen angewandt wurden, oder an denen aufgrund von Wartung und Reparatur keine Ozonung erfolgte, sind nicht mit abgebildet. [HERBST ET AL., 2013]



**Bild 4-22: Leistungsbedarf der Ozonung in Duisburg-Vierlinden in Abhängigkeit der Zulaufmengen und der Dosiermenge für die Injektor- und die Diffusorstraße [HERBST ET AL., 2013]**

In der Darstellung sind der Energiebedarf des Zulaufpumpwerks (geodätische Höhe: 7 m), die Herstellung von Ozon sowie der Eintrag berücksichtigt. Der Medianwert der mittleren täglichen Beschickung der beiden Straßen beträgt 65 m<sup>3</sup>/h bei Trockenwetter [MAUS, 2013]. Die mittlere Aufenthaltszeit für die Daten liegt jeweils bei ca. 87 Minuten. Dies ist deutlich höher als die Bemessungszeit von 30 Minuten, was auf die geringeren Zuflüsse bei Trockenwetter im Vergleich zum Bemessungszufluss (2 x 200 m<sup>3</sup>/h) zurückzuführen ist.

Für beide Straßen steigt der Energieverbrauch mit der Zulaufmenge an. Allerdings ist die lineare Korrelation zwischen Leistungsbedarf und Zulaufmenge bei der Diffusorstraße deutlich ausgeprägter als für die Injektorstraße. Die Injektorstraße hat für die gleichen Dosiermengen jeweils einen höheren Energieverbrauch als die Diffusorstraße. Die

Ursachen hierfür liegen in dem zusätzlichen Betrieb der Injektorpumpe für den Ozonetrageintrag, der sich auf ca. 1-2 kWh/h beläuft; die Kreiselpumpe des Injektors läuft bei allen Anlageneinstellungen mit konstanter Leistung. Des Weiteren ist die Zulaufrohrleitung in der Injektorstraße in Duisburg-Vierlinden etwas länger als in der Diffusorstraße und der statische Mischer in der Injektorstraße stellt ein zusätzlich zu überwindendes Hindernis dar. Insgesamt ist der elektrische Energiebedarf der Injektorstraße insbesondere durch die zusätzliche Injektorpumpe um ca. 3 kWh/h höher als derjenige der Diffusorstraße. [HERBST ET AL. 2013]

Aufgrund der erfassten Daten wurden Funktionen für die Erzeugung und den Eintrag bei den drei aufgeführten Dosiermengen sowie für das Zulaufpumpwerk für beide Straßen erstellt. Die Funktionen sowie der ermittelte Energiebedarf für eine Wassermenge von 100 m<sup>3</sup>/h sind in Tabelle 4-7 aufgeführt.

**Tabelle 4-7: Energiebedarf des Zulaufpumpwerks sowie der Ozonerzeugung und des Ozonetrageintrags bei 3, 5 und 7 mg O<sub>3</sub>/L, getrennt für die Injektor- und Diffusorstraße nach [HERBST ET AL., 2013]**

Verbraucher	Injektor		Diffusor	
	Energiebedarf [kWh/h] als Funktion von Q in m <sup>3</sup> /h	spez. Energiebedarf [kWh/m <sup>3</sup> ] bei 100 m <sup>3</sup> /h	Energiebedarf [kWh/h] als Funktion von Q in m <sup>3</sup> /h	spez. Energiebedarf [kWh/m <sup>3</sup> ] bei 100 m <sup>3</sup> /h
<b>Zulaufpumpwerk</b>	$0,054 \cdot Q + 2,27$	0,077	$0,058 \cdot Q + 0,14$	0,059
<b>Ozonerzeugung + Eintrag (3 mg O<sub>3</sub>/L)</b>	$0,033 \cdot Q + 2,68$	0,060	$0,030 \cdot Q + 1,42$	0,044
<b>Ozonerzeugung + Eintrag (5 mg O<sub>3</sub>/L)</b>	$0,058 \cdot Q + 2,10$	0,079	$0,053 \cdot Q + 1,02$	0,063
<b>Ozonerzeugung + Eintrag (7 mg O<sub>3</sub>/L)</b>	$0,060 \cdot Q + 3,12$	0,092	$0,076 \cdot Q + 0,53$	0,081

Die Förderhöhe von 7 m macht bei 100 m<sup>3</sup>/h für eine Dosierung von 5 mg/L für beide Eintragungssysteme etwas mehr als 50 % des Energieverbrauchs der Ozonstufe aus. Insgesamt ergeben sich für einen Zufluss von 100 m<sup>3</sup>/h die Werte in Tabelle 4-8 für den Energieverbrauch auf der Kläranlage.

**Tabelle 4-8: Spezifischer berechneter Energieverbrauch bei unterschiedlichen Ozondosierungen für Injektor- und Diffusorstraße bei einem Zufluss von 100 m<sup>3</sup>/h**

Ozonkonzentration	Energieverbrauch		
	Injektorstraße [kWh/m <sup>3</sup> ]	Diffusorstraße [kWh/m <sup>3</sup> ]	Rel. höherer Verbrauch der Injektorstraße
<b>3 mg/L</b>	0,137	0,104	32 %
<b>5 mg/L</b>	0,156	0,123	27 %
<b>7 mg/L</b>	0,169	0,141	20 %

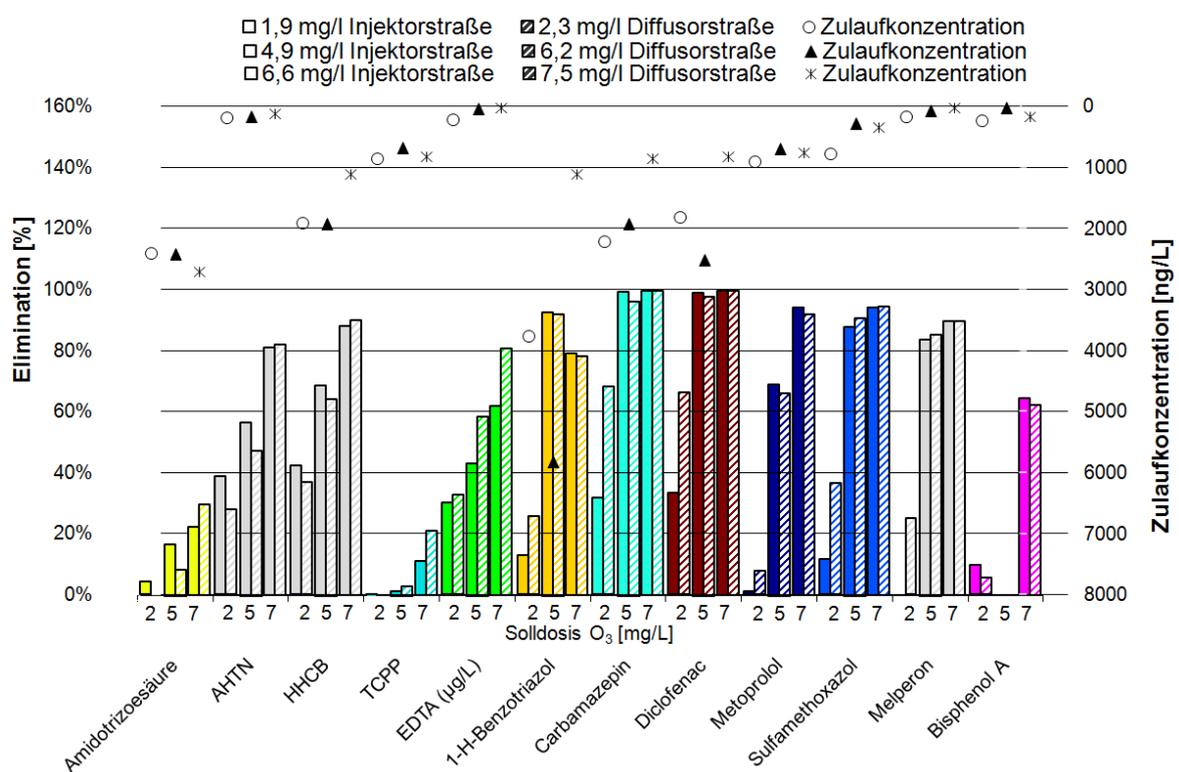
Im Vergleich mit den Werten aus den Berechnungen aus Phase I liegen diese Werte für den Diffusor bei 5 mg/L im Bereich des mittleren Energiebedarfs und für den Injektor zwischen dem mittleren und dem maximalen Bedarf. Dies ist auf die hohe Förderhöhe zurückzuführen. Werden die Werte für 7 mg/L mit den berechneten Werten für 7,5 mg/L aus Phase I verglichen, sind die Werte schon verhältnismäßig niedriger. Dies liegt daran, dass die Beschickung der Straße immer einen gleichbleibenden Anteil am Energieverbrauch ausmacht und bei höheren Dosiermengen einen niedrigeren Anteil am Gesamtenergieverbrauch hat.

Hinsichtlich der Spurenstoffelimination konnte für beide Straßen kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden. Die Versuchsergebnisse zeigen lediglich eine Tendenz, dass die Elimination der Spurenstoffe in der Diffusorstraße bei geringen Dosiermengen etwas höher ist, wohingegen bei hohen Dosiermengen, die Eliminationen in der Injektorstraße etwas höher sind. In Duisburg-Vierlinden wurden zwei Steuerungsstrategien untersucht: mengenproportionale und DOC-proportionale Ozondosierung. Zur Bewertung der Strategien wurde der Ozoneintrag beider Straßen verglichen. Verglichen mit den Diffusoren wies die Injektorstraße eine geringfügig höhere Eintragungseffizienz (Feststellen durch Messen der Konzentration im Off-Gas)<sup>1</sup> auf. Bei der DOC-proportionalen Steuerung konnte in der Injektorstraße eine konstant hohe Effizienz erreicht werden; bei der mengenproportionalen Steuerung trat in einigen Fällen bei Dosierungen von mehr als 6 mg/L eine deutliche Minderung der Eintragungseffizienz unterhalb von 90 % auf. Für die Diffusorstraße konnte bei beiden Steuerungsstrategien ein weniger effizienter Ozoneintrag als bei der Injektorstraße festgestellt werden. Die Dosierung über den DOC ist jedoch aufwändiger als die mengenproportionale Steuerung, da sie eine kostenintensive Online-Messung für den DOC erfordert. Zudem konnte ein nur geringer Einfluss der DOC-Zulaufschwankungen auf die Leistung der Spurenstoffelimination festgestellt werden. Da die Kläranlage Duisburg-Vierlinden mit

<sup>1</sup> In beiden Straßen wird auch Ozon in der gelösten Phase im Ablauf gemessen. Die Konzentrationen liegen jedoch unterhalb der Bestimmungsgrenze.

einer Ausbaugröße von 30.000 E relativ klein ist, würde ein möglicher Vorteil der besseren Eintragungseffizienz der DOC-Steuerung und geringeren Sauerstoff und Energiekosten ggf. durch die hohen Kosten der DOC-Messung übertroffen werden. [vgl. ARGE, 2014]

In Bild 4-23 sind die Eliminationsgrade bei den mengenproportionalen Solldosierungen von 2, 5 und 7 mg/L Ozon für eine Auswahl an Spurenstoffen dargestellt. Die entsprechenden DOC-Konzentrationen im Zulauf zur Ozonung betragen 8,6 mg/L (bei 2 mg O<sub>3</sub>/L), 7,6 mg/L (bei 5 mg O<sub>3</sub>/L) und 7,0 mg/L (bei 7 mg O<sub>3</sub>/L). Über die Differenz der Ozonmenge im Off-Gas wurde die entsprechende Ozonzehrung bestimmt, welche als Mittelwert oberhalb des Diagramms angegeben ist und für die Diffusorstraße etwas höher ist als für die Injektorstraße. Hinsichtlich der Spurenstoffelimination werden bei einer Dosierung von 5 mg/l deutlich verbesserte Eliminationsgrade beispielsweise für 1-H-Benzotriazol, Carbamazepin, Metoprolol, Sulfamethoxazol und Melperon im Vergleich zu einer Dosierung von 2 mg/L erreicht. Es muss jedoch beachtet werden, dass es sich hier um einzelne Messergebnisse handelt, die zum Teil mit deutlich unterschiedlichen Zulaufkonzentrationen vorgenommen wurden. [ARGE, 2014]



**Bild 4-23: Eliminationsgrade beim Parallelbetrieb der Injektor- und Diffusorstraße, 1 Versuch je Solldosis von 2, 5 und 7 mg O<sub>3</sub>/L bei mengenproportionaler Steuerung O<sub>3</sub>-Dosierung (ARGE, 2014)**

Als bevorzugte Dosiermenge für Duisburg-Vierlinden wurden in HERBST ET AL. (2013) **5 mg/L** angesetzt. Bei Kostenbetrachtungen wurde bei dieser Dosiermenge und einer behandelten Abwassermenge von 1.500.000 m<sup>3</sup>/a (Schmutzwassermenge 1.100.000 m<sup>3</sup>/a) ein Energieverbrauch von 144.540 kWh/a angesetzt, was einem spezifischen Energieverbrauch von 0,096 kWh/m<sup>3</sup> entspricht. Dieser Wert liegt unterhalb

der Werte aus Tabelle 4-8, weil er auf eine verhältnismäßig größere behandelte Abwassermenge bezogen ist (Zulauf von 171 m<sup>3</sup>/h). Das Zulaufpumpwerk macht hierbei rund 50 % des Energieverbrauchs und entsprechend auch der Energiekosten aus. Der Energiebedarf der gesamten KA Duisburg-Vierlinden würde durch die Ozonanlage um 8 % auf insgesamt 1.845 MWh/a gesteigert, was einer Steigerung von 75 kWh/(E·a) auf insgesamt 81 kWh/(E·a) durch die Ozonanlage entspräche [HERBST ET AL., 2013]. Auf die Einwohnerwerte bezogen, würde dies eine prozentuale Steigerung von ca. 7 % ausmachen. Diese Steigerung von 6 kWh/(E·a) ist gering im Vergleich zum Gesamtverbrauch der Anlage; dieser ist jedoch als sehr hoch anzusehen, da der Medianwert des Energieverbrauchs von Kläranlagen der Größenklasse 4 bei 34,9 kWh/(E·a) liegt [DWA, 2012]. Würde dieser mediane Energieverbrauch betrachtet werden, so würde die Ozonung bei einer Erhöhung von 6 kWh/(E·a) eine Erhöhung von 17 % des einwohnerwertspezifischen Energieverbrauchs bedeuten. Als Ursachen für den hohen Energieverbrauch der „konventionellen“ Kläranlage Duisburg-Vierlinden können die beim Energieverbrauch mitbetrachtete Regenwasserbehandlung, eine nicht energieeffiziente Oberflächenbelüftung in der Biologie sowie eine geringe Auslastung der Kläranlage geführt werden. Eine stattfindende Energieanalyse wird hier für weitere Aufklärung sorgen. [MAUS, 2013]

Der Energieverbrauch der Ozonung der Kläranlage Duisburg-Vierlinden ist demnach im Einklang mit den Ergebnissen aus Phase I und wird annähernd zur Hälfte durch die geodätische Förderhöhe von 7 Metern ausgemacht. Der Verbrauch der Injektorstraße ist höher als bei der Diffusorstraße, scheint jedoch bei höheren Dosierungen an Ozon durch einen verbesserten Ozoneintrag zu einer leicht verbesserten Spurenstoffelimination beizutragen. Für eine gezielte Spurenstoffelimination wird eine Dosierung von 5 mg/L angesetzt [HERBST ET AL., 2013]. Der von HERBST UND ANTE (2010) angesetzte Verbrauch für das der Injektorstraße nachgeschaltete Wirbelbett von 0,02 kWh/m<sup>3</sup> würde die entsprechenden Verbräuche der Straße je nach Dosiermenge um bis zu 15 % erhöhen.

#### 4.1.4 Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen

Die zusätzlichen Verbraucher der umgerüsteten Filterzelle in Wuppertal-Buchenhofen sind im Einzelnen:

- Rührwerk im Überstauraum (nicht notwendig, siehe unten)
- Dosierstation für Fällmittel (FM) und Flockungshilfsmittel (FHM) (vernachlässigbar bzw. nicht in Betrieb nach BORNEMANN (2013))
- PAK-Dosierstation (Treibwasser für die Dosierschnecke)
- Stickstoff-Dosierstation zur Verhinderung von Klumpenbildung im PAK-Silo (vernachlässigbar nach BORNEMANN (2013))

Die umgerüstete Filterzelle, in die PAK dosiert wird, enthält als relevanten zusätzlichen Verbraucher ein Rührwerk zur Umwälzung. Dieses verbraucht nach BIEBERSDORF ET AL. (2011) 4 W/m<sup>3</sup>. Bei 150 m<sup>3</sup> Überstauraum (siehe 3.4) ergibt sich demnach eine Leistungsaufnahme von 0,60 kW. In der Ausschreibung der Anlage wurde das Rührwerk mit 2 kW Leistung ausgeschrieben, welches auch in BORNEMANN ET AL. (2012) aufgeführt

ist. Eingebaut ist ein Rührwerk KSB AmamixC 3231/26 DU, welches eine Leistungsaufnahme von 3,20 kW besitzt. [KAUB, 2013] Diese unterschiedlichen Leistungsangaben führen zu unterschiedlichen Angaben der Energieverbräuche im VersuchsfILTER (vgl. Bild 4-24). Das eingebaute Rührwerk ist ein schnelllaufendes Horizontalrührwerk und wurde eingesetzt, um einen möglichen positiven Einfluss auf die Adsorptionsleistung zu untersuchen. Das im VersuchsfILTER installierte Rührwerk ist mit einer Leistung von 3,2 kW – entspricht  $21 \text{ W/m}^3$  -- großzügig ausgelegt. Ziel der Versuche war, herauszufinden, ob die Durchmischung des Überstauraumes generell einen positiven Einfluss auf die Adsorptionsleistung hat. Da die Versuche keine eindeutige Empfehlung für ein Rührwerk liefern konnten, ergibt sich hier die Frage der grundsätzlichen Notwendigkeit eines solchen Rührwerks. In nachfolgenden Versuchen in Buchenhofen (2013/2014) wird auf ein Rührwerk gänzlich verzichtet.

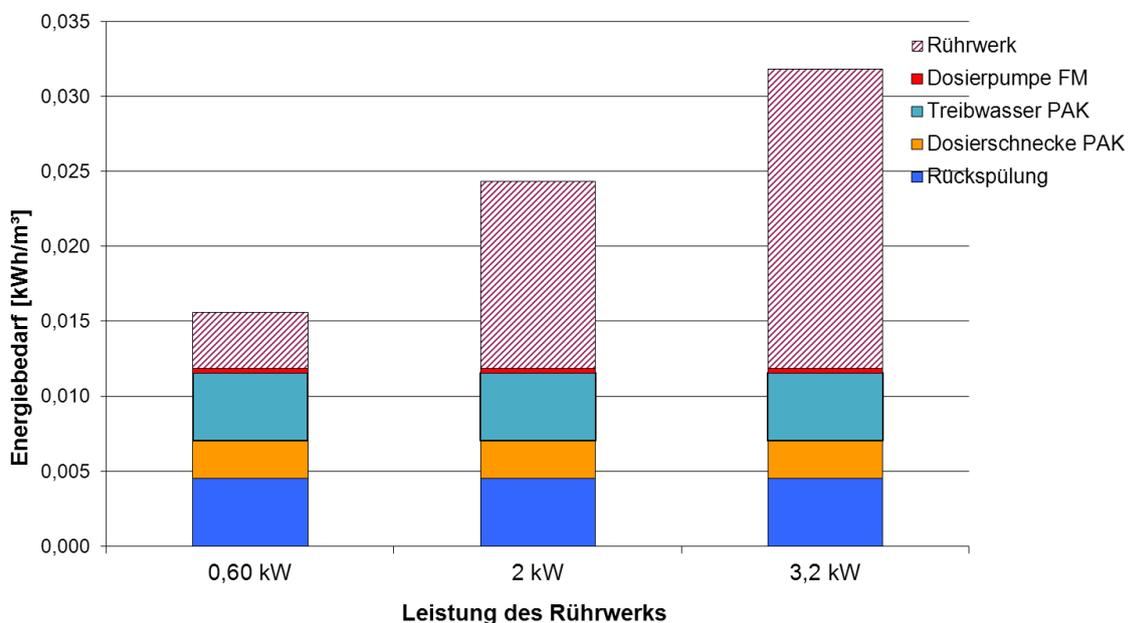
Für die Dosierpumpe der Metallsalze als Flockungsmittel kann eine Leistungsaufnahme von 0,05 kW angesetzt werden [KAUB, 2013], welche als vernachlässigbar gering anzusehen ist. Die Antriebsleistung für die Dosierschnecke des PAK-Dosiergeräts kann über das Jahr mit 0,4 kW (Leistungsaufnahme von 0,55 kW bei maximaler Dosiermenge) angesetzt werden [KAUB, 2013]. Der Kostenaufwand für das Treibwasser zur Dosierung der PAK wird bei der Kostenbetrachtung für einen Vollausbau der Kläranlage (28 Filter) mit 70 €/d angesetzt, welcher pro Filter zu einem Tagesverbrauch von rund 17 kWh/d führt. Bei einem Vollausbau würde die Anlage so dimensioniert werden, dass 80 % der Jahresabwassermenge mit PAK behandelt würden [vgl. BORNEMANN ET AL. 2012]. Die Jahresabwassermenge pro Straße, die mit PAK behandelt wird, läge demnach bei rund  $1.346.000 \text{ m}^3/\text{a}$ .

Der VersuchsfILTER wurde in das Standardspülprogramm der Anlage eingebunden und genauso gespült wie die anderen Filter. Über Trübungsmessungen und Massenbilanzen der Feststoffe wurde festgestellt, dass das Spülprogramm zum Austrag der PAK ausreicht und das Spülprogramm nicht angepasst werden muss [BORNEMANN ET AL., 2012]. In der Regel wird bei Trockenwetter einmal am Tag und bei Mischwasserzufluss ca. alle 12 h rückgespült. Des Weiteren kann eine Spülung durch den Anstieg des Filterwiderstandes bis zu einem max. Differenzdruck oder beim Erreichen eines max. Öffnungsgrades der Ablaufarmatur ausgelöst werden. Der Filterwiderstand erhöhte sich zwar durch die zusätzliche durch die PAK eingetragene Feststofffracht, führte jedoch nur sehr selten zu vorzeitigen Filterspülungen. Für alle Versuchseinstellungen bei dynamischer Beschickung sind die mittleren Filterstandzeiten für den Versuchs- und den Referenzfilter nahezu identisch. Selbst bei einer Dosierung von 40 mg PAK/L ist eine Filterlaufzeit von 24 h bei Trockenwetter einzuhalten. [BORNEMANN ET AL., 2012] Somit kann ein erhöhter Stromverbrauch durch häufigeres Rückspülen ausgeschlossen werden. Für den Ausbau auf die gesamte Kläranlage wurde jedoch von einer zusätzlichen Rückspülung alle 2 Tage ausgegangen, die mit etwa 33 kWh pro Rückspülung (5 € bei 0,15 €/kWh) angenommen wird.

Bei dieser behandelten Jahresabwassermenge mit PAK ergeben sich die spezifischen Energieverbräuche pro  $\text{m}^3$  behandeltem Abwasser, in Abhängigkeit von der Leistung des installierten Rührwerks, die in Bild 4-24 dargestellt sind. Je nach Leistung des Rührwerks

liegen die Werte zwischen 0,015 und rund 0,032 kWh/m<sup>3</sup> Abwasser, was 20 bis 64 % des gesamten Energieverbrauchs der PAK-Stufe ausmacht. Im Vergleich zu den Berechnungen aus Phase I, die einen Strombedarf von 0,05 bis 0,09 kWh/m<sup>3</sup>, im Mittel 0,07 kWh/m<sup>3</sup> (ohne Berücksichtigung eines Energiegewinns aus dem Schlamm) ergaben, liegen die Werte hier niedriger. In Wuppertal ist keine geodätische Höhe zu überwinden, welches einen energetischen Vorteil bietet. In Phase I wurde ein zusätzlicher Energieverbrauch für die Rückspülwasserbehandlung angenommen, der hier nicht betrachtet wurde. Dennoch wurden in Wuppertal Werte für die Dosiereinrichtungen und für eine, aufgrund der Versuchsergebnisse nicht unbedingt nötige, vermehrte Rückspülung mitbetrachtet, so dass alle Aggregate, die zum Energiebedarf beitragen, abgedeckt sind. Die Versuche in Wuppertal deuten nicht auf einen zwingend notwendigen Einsatz des Rührwerks hin, so dass der Energieverbrauch durch Verzicht auf das Rührwerk sinken würde und nur 0,012 kWh/m<sup>3</sup> betragen würde. Weiterhin bleibt zu bemerken, dass die Werte aus Bild 4-24 für 80 % der Jahresabwassermenge gelten, da die Zugabe von PAK in den Überstau der Flockungsfiltration bei einer vollausgebauten Anlage nur für 80 % der Jahresabwassermenge erfolgen soll. Die Zugabe von PAK in den Überstau eines Filters, wie sie in Wuppertal untersucht wurde ist also mit einem geringen Mehrbedarf an Energie durchführbar, zumindest für den Energieverbrauch auf der Kläranlage. Betrachtungen zum Erhöhen des Heizwertes des Schlammes bzw. Erhöhung der Entsorgungskosten wurden nicht vorgenommen.

**Spezifischer Energieverbrauch in Abhängigkeit der Leistung des installierten Rührwerks**



**Bild 4-24: Spezifischer Energieverbrauch der Versuchszelle in Abhängigkeit der Leistung des Rührwerks**

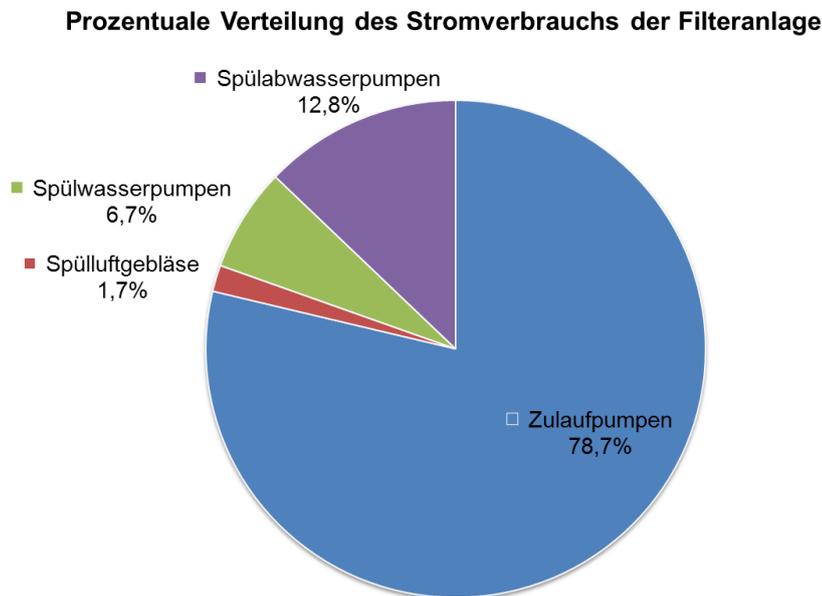
In Wuppertal-Buchenofen war ein stabiler Betrieb bei Dosiermengen zwischen 10 und 40 mg PAK/L möglich. Im Vergleich zum Referenzfilter wurde ein vermehrter Rückhalt von Spurenstoffen festgestellt. Die Eliminationsgrade lagen bei den Arzneimitteln Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol bei 20 mg PAK/L und 0,2 mg Fe/mg PAK bei

ca. 80 % bezogen auf den Zulauf zur Filtration; bei einer Bereinigung um den Einfluss der Rückspülwässer bei fast 90 %. Bei anderen Substanzen wie Amidotrizesäure, Ritalinsäure oder EDTA führte auch eine höhere Dosierung nicht zu einer besseren Adsorption. Bezogen auf den Zulauf der Kläranlage wird Bisphenol A bereits in der biologischen Stufe bis auf das Niveau der Nachweisgrenze abgebaut. Weitere Stoffe wie Sulfamethoxazol, Diclofenac und Metoprolol werden zum Teil in der Biologie transformiert, so dass die Gesamtelimination in der Kläranlage für diese Stoffe bei 80 bis 90 % liegt. [BORNEMANN ET AL., 2012]

#### 4.1.5 Kläranlage Düren-Merken

Die Hauptstromverbraucher der Filteranlage verursachten im Untersuchungszeitraum (12. Oktober 2012 bis 18. November 2012, dritte GAK eingebaut, vgl. 3.5) einen Stromverbrauch von 115.521 kWh. Dies entspricht 0,052 kWh/m<sup>3</sup> für die gesamte Filteranlage bezogen auf die filtrierte Wassermenge von 2.215.312 m<sup>3</sup> bzw. 3,69 kWh/(E·a) bezogen auf die Anschlussgröße von 310.000 E.

In Bild 4-25 ist dargestellt, wie sich der Stromverbrauch der Filteranlage auf die Hauptstromverbraucher (5 Zulaufpumpen, 2 Spülluftgebläse, 3 Spülwasserpumpen und 2 Spülabwasserpumpen) verteilt. Hinzu kommen kleinere Verbraucher wie Licht, Schieber, Steuerungstechnik etc..



**Bild 4-25: Prozentuale Verteilung des Stromverbrauchs der Filteranlage in der Kläranlage Düren (12.10. bis 18.11.2012)**

Die Zulaufpumpen verbrauchten in dieser Zeit mit 78,7 % am Gesamtstromverbrauch der Filteranlage 90.950 kWh und förderten 2.215.312 m<sup>3</sup>. Somit ergibt sich ein spezifischer Stromverbrauch der Zulaufpumpen von 0,041 kWh/m<sup>3</sup> bei einer Förderhöhe von etwa 8,5 m. Mit der jeweils filtrierte Menge der einzelnen Filterzellen aus Tabelle 3-2 kann auf den Stromverbrauch der Referenzfilterzelle und der GAK-Filterzelle für die Förderung des Zulaufes geschlossen werden.

Der Stromverbrauch für Spülluftgebläse und Spülwasserpumpen, den die Referenz- und die GAK-Filterzelle im Betrachtungszeitraum verursacht haben, konnte zugeordnet werden, da aus den Daten ersichtlich war, welche der Filterzellen rückgespült hat. Hieraus ergab sich, dass die Referenzfilterzelle pro Rückspülung ca. 2,20 kWh für die Spülluftgebläse und 8,03 kWh für die Spülwasserpumpen verbraucht. Die GAK-Filterzelle mit der dritten GAK verbraucht 1,05 kWh pro Rückspülung für die Spülluftgebläse und 9,54 kWh für die Spülwasserpumpen. Für die Referenzfilterzelle addiert sich der Stromverbrauch pro Rückspülung somit auf 10,23 kWh und für die GAK-Filterzelle mit der

dritten GAK auf 10,59 kWh. Mit der Anzahl der Rückspülungen und der filtrierten Menge aus Tabelle 3-2 kann der Stromverbrauch der Referenzfilterzelle und der GAK-Filterzelle für die Rückspülungen ermittelt werden.

Um den Anteil der Referenz- und GAK-Filterzelle am Stromverbrauch der Spülabwasserpumpen zu ermitteln, wurde zunächst die Spülabwassermenge je Rückspülung und Filterzelle ermittelt. Für die Referenzfilterzelle ergibt sich eine Rückspülmenge von 137,5 m<sup>3</sup> und für GAK-Filterzelle von 157 m<sup>3</sup>. Hinzu kommt, dass zu Beginn der Rückspülung der Füllstand im Filter zunächst abgesenkt wird. Bei der Referenzfilterzelle wird bis zu einem Füllstand von 60 % filtriert, anschließend wird aus Zeitgründen das anstehende Wasser bis Oberkante Spülrinne, also etwa 59,2 m<sup>3</sup> in den Spülabwasserkeller geleitet. Bei der GAK-Filterzelle wird nur bis zu einer Füllhöhe von 80 % filtriert und somit 80,6 m<sup>3</sup> in den Spülabwasserkeller geleitet. Anhand dieser unterschiedlichen Wassermengen, die mit den Spülabwasserpumpen in die Biologie zurück befördert werden und der Anzahl der Rückspülungen, konnte der prozentuale Anteil der Referenz- und GAK-Filterzelle am Stromverbrauch der Spülabwasserpumpen ermittelt werden.

Aus diesen betrieblichen und energetischen Kennwerten kann der Stromverbrauch für die Referenzfilterzelle und die GAK-Filterzelle mit der dritten GAK ermittelt werden. Es ergibt sich, dass die Referenzfilterzelle 0,048 kWh/m<sup>3</sup> verbraucht, die GAK-Filterzelle mit der dritten GAK **0,063 kWh/m<sup>3</sup>**. Der Zusatzaufwand ergibt sich somit zu **0,016 kWh/m<sup>3</sup>** bzw. 32,9 %.

Damit liegt der Stromverbrauch in der Größenordnung des minimalen Szenarios nach Bild 2-5. Eine Vorbehandlung, wie sie energetisch in den aus Literaturwerten ermittelten Daten berücksichtigt wurde, gibt es in der KA Düren nicht. Ebenso wurde in den Daten aus Literaturwerten die Mitbehandlung des Rückspülwassers in der Belebungsstufe berücksichtigt, was für Düren nicht geschehen ist. Hierin verbirgt sich für die Literaturwerte gedanklich jedoch auch die Förderung des Rückspülwassers, also der Stromverbrauch der Spülabwasserpumpen, die in den Werten aus Literaturdaten nicht explizit ausgewiesen sind, in Düren aber einen größeren Posten (12,8 % des Gesamtstromverbrauchs der Filteranlage) darstellen.

Die Eliminationsleistungen der dritten GAK werden in BENSTÖM ET AL. (2014) aufgeführt und mit den ersten beiden GAK verglichen. Bei der zweiten GAK wird beispielsweise nach einem Durchsatz von etwa 4.000 Bettvolumina noch ein Rückhalt von mehr als 80 % des Antiepileptikums Carbamazepin beobachtet [BENSTÖM ET AL., 2013], wohingegen bei der ersten GAK bei 4.000 Bettvolumina der Rückhalt von Carbamazepin nur noch bei rund 60 % lag [BORNEMANN ET AL., 2012]. Bei der dritten GAK wird Carbamazepin ab rund 2.400 Bettvolumina zu weniger als 80 % zurückgehalten [BENSTÖM ET AL., 2014]. Diese Eliminationsgrad beziehen sich jedoch lediglich auf einen einzelnen Filter in Betrieb; durch Parallelschaltung von 6 Adsorbern würde Carbamazepin mit der 3. GAK bis zu einer Wassermenge von rund 4.300 Bettvolumina zu mehr als 80 % zurückgehalten werden [BENSTÖM, et al. 2014], bei der 1. GAK wären es bis zu 900 Bettvolumina, und bei der 2.

GAK bis zu rund 7.000 Bettvolumina. Weitere Eliminationsgrade und mögliche Austauschkriterien für die Kohle befinden sich in BENSTÖM ET AL. (2014).

#### 4.1.6 Kläranlage Obere Lutter

Die Berechnungen aus dem ersten Forschungsprojekt auf der Kläranlage Obere Lutter [in NAHRSTEDT ET AL., 2011] geben pro Rückspülung einen Stromverbrauch von 1,4 kWh an. Diese wurde bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2 m/h bei der großtechnischen Filterzelle durchschnittlich einmal pro Woche nötig.

Im Anhang von NAHRSTEDT ET AL. (2011) sind Berechnungsbeispiele für die Betriebskosten angeführt, die auf den Versuchsergebnissen des kleintechnischen Versuchsbetriebs beruhen. Daraus sind zu entnehmen, dass der Filtrationsbetrieb eines Filters bei einer Filtergeschwindigkeit von 2,5 m/h und dem Betrieb an 5 von 7 Tagen pro Woche und einem Druckverlust von 230 mbar einen Stromverbrauch von 5.711 kWh/a aufweist. Zudem werden 65 Spülungen nötig (an Tagen mit Filtrationsbetrieb), so dass sich der Jahresstromverbrauch zu 5.802 kWh/a addiert.

Bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5 m/h verdoppelt sich die behandelte Wassermenge und somit auch der Strombedarf für die Filtration. Ebenso wird von doppelt so vielen Rückspülungen (130) ausgegangen, so dass sich der Jahresstromverbrauch insgesamt ebenfalls zu 11.604 kWh/a verdoppelt, der spezifische Stromverbrauch (in kWh/m<sup>3</sup>) bleibt jedoch gleich. Im Anhang von NAHRSTEDT ET AL. (2011) sind diese Berechnungsbeispiele ebenfalls für die Filtrationsgeschwindigkeiten 8 m/h (18.568 kWh/a) und 10 m/h (23.172 kWh/a) sowie für die Umrüstung von bis zu 5 Filtern zu finden.

Im 2. Forschungsprojekt wurde der Energiebedarf für die Filtration ebenfalls in der Kostenberechnung für die untersuchten Adsorber berücksichtigt [vgl. NAHRSTEDT ET AL. 2013B]. Als Grundlage für die Energiedaten dienen hier Messdaten der installierten Pumpen. Der jährliche Energieverbrauch der Filtration und der Spülung sowie der spezifische Energieverbrauch bei einem diskontinuierlichen Betrieb an 5 von 7 Tagen (sog. intermittierender Betrieb) die Woche sind in Tabelle 4-9 aufgeführt. Die spezifischen Energieverbräuche der GAK-Filter liegen zwischen **0,035 kWh/m<sup>3</sup> und 0,039 kWh/m<sup>3</sup>**, wobei für die dynamisch betriebene Zelle der geringste spezifische Energieverbrauch zu verzeichnen ist. Insgesamt verbraucht der dynamisch betriebene Großadsorber 3 (GA3) im Jahr zwar mehr Energie, liefert aber auch ein höheres Filtratvolumen aufgrund der höheren Filtergeschwindigkeit. Ob der Filter mit Reaktivat oder Frischkohle betrieben wird, ist für den Energieverbrauch auf der Kläranlage nicht von Bedeutung. Der größte Teil des Energieverbrauchs wird durch die eigentliche Filtration mit 0,03 kWh/m<sup>3</sup> bedingt. Der Energiebedarf für die Spülung setzt sich zusammen aus dem Energiebedarf für die Spülwasserzufuhr (6 kWh/Spülung), die Spülluftzufuhr (9 kWh/Spülung) und die Rückführung des Spülwassers zurück zum Zwischenpumpwerk und dann bis zum Ablaufbauwerk (9 Meter Förderhöhe) (27 kWh/Spülung). Der Gesamtbedarf für die Spülung beläuft sich demnach auf 42 kWh/Spülung; dieser Wert ist deutlich höher als der in NAHRSTEDT ET AL. (2011) angegebene Wert von 1,4 kWh/Spülung. Aufgrund des intermittierenden Betriebes wurde eine Rückspülung zweimal pro Woche angesetzt.

Insgesamt sind die gemessenen Werte deutlich höher als die berechneten Werte aus dem ersten Teil des Forschungsprojektes.

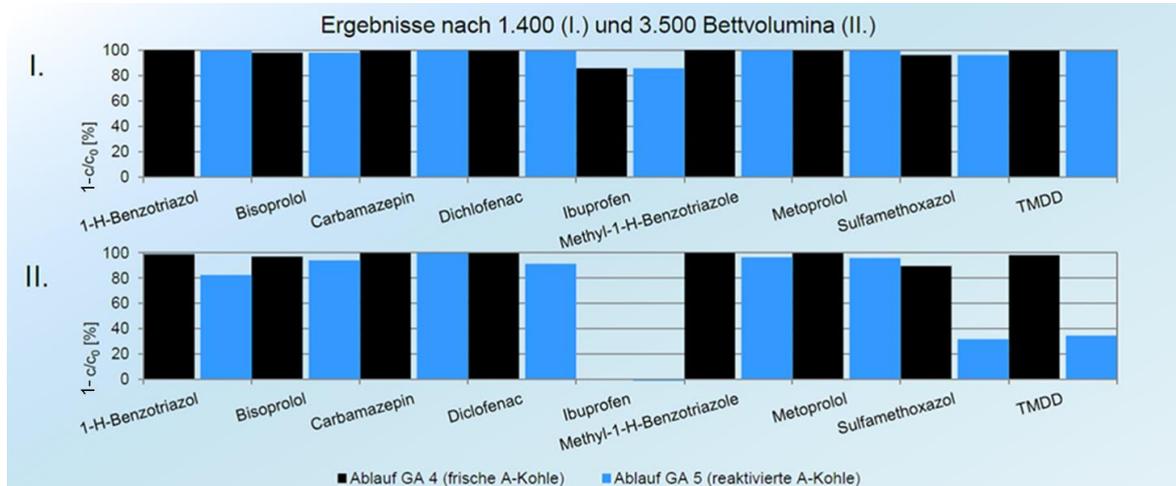
**Tabelle 4-9: Berechnete spezifische Energieverbräuche der unterschiedlichen GAK-Filter auf dem Klärwerk Obere Lutter [nach NAHRSTEDT ET AL. 2013B]**

	<b>GA3, Frischkohle dynamischer Betrieb (mittlere Geschwindigkeit 3,6 m/h)</b>	<b>GA4, Frischkohle konstanter Betrieb (2 m/h)</b>	<b>GA5, Reaktivat konstanter Betrieb (2 m/h)</b>
<b>Filtration (gemessene Pumpenleistungen) [kWh/a]</b>	27.166	15.205	15.205
<b>Spülung inkl. Rückführung Spülabwasser (gemessene Pumpenleistungen) [kWh/a]</b>	4.368	4.368	4.368
<b>Filtrat [m³/a]</b>	905.534	506.829	506.829
<b>spezifischer Energieverbrauch [kWh/m³]</b>	<b>0,0348</b>	<b>0,0386</b>	<b>0,0386</b>
<b>Durchgesetzte Bettvolumina [m³/m³<sub>(GAK)</sub>]</b>	7.000	9.000	6.000
<b>Laufzeit bis Erreichen Sättigungsbeladung [Monate]</b>	9,3	21,3	14,3

Als Grundlage für die Berechnungen in Tabelle 4-9 dient ein Durchsatz von 7.000 m³ Wasser/m³ GAK Bettvolumina für den GA3, von 9.000 m³ für den GA4 und von 8.000 m³ für den GA5. Als Kriterium für den Ausbau der Kohle wurden Sättigungsbeladungen für den CSB in Abhängigkeit des Verhaltens der Kohlen angesetzt. Auf den spezifischen Energieverbrauch hat die erreichbare Laufzeit keinen Einfluss, wie der Vergleich von mit 2 m/h betriebenen Filtern GA4 und GA5 zeigt. Für die drei GAK-Filter in Obere Lutter wurden zudem CO<sub>2</sub>-Bilanzen in NAHRSTEDT ET AL. (2013B) erstellt. Diese werden in 5.2.3. näher erläutert; hier wird der Unterschied zwischen der Verwendung frischer Kohle und von Reaktivat deutlich.

Für die mit GAK ausgestatteten Filterzellen wurden für den Energieverbrauch folgende Faktoren berücksichtigt: Luftspülung, Wasserspülung inklusive Förderung des Spülabwassers, Spülschlammentsorgung (vernachlässigbar) und der Filtrationsbetrieb (0,03 kWh/m³ zur Förderung sowie ein geringer Anteil des Kompressors zur Regulierung des Filterzulaufs). Der spezifische Wert des Referenzfilters ist mit 0,0451 kWh/m³ leicht

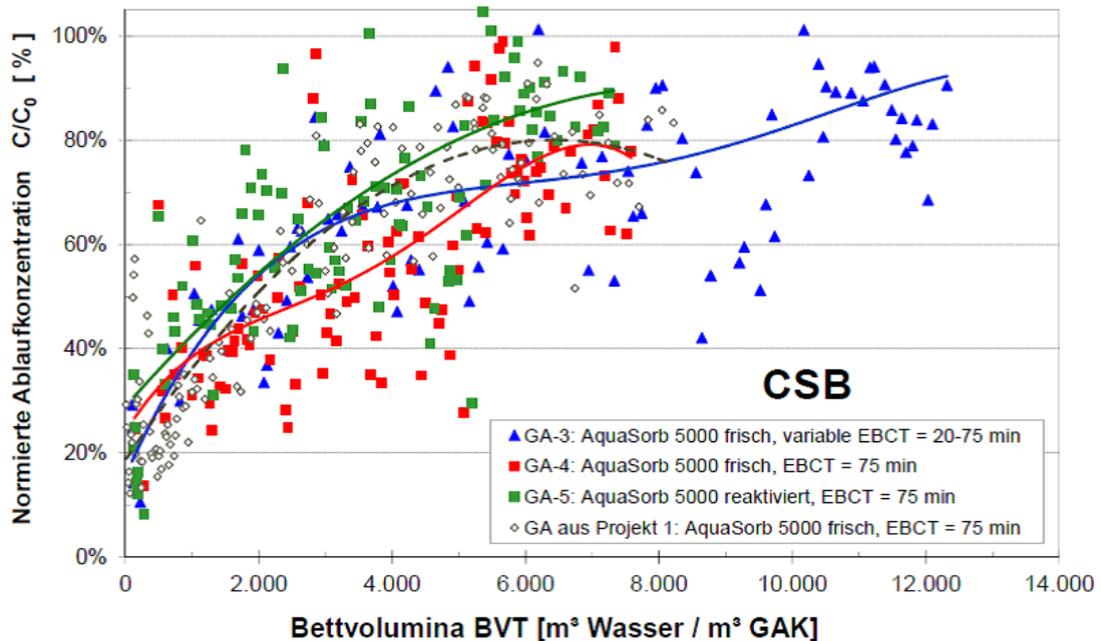
höher und zum größten Teil auf das Drehkolbengebläse für die Prozessluft sowie auf die häufigeren Rückspülungen (fünfmal die Woche) zurückzuführen. Allerdings würde der Referenzfilter nicht ausgebaut werden, die angesetzte Wassermenge wird lediglich zum Vergleich angesetzt. Die in Tabelle 4-9 dargestellten unterschiedlichen Laufzeiten der drei Filter lassen bereits auf den unterschiedlichen Rückhalt an Organik der drei Filterzellen schließen. Im Vergleich die schlechtesten Ergebnisse zeigte die dynamisch beschickte Frischkohle, die jedoch auch einen größeren spezifischen Durchsatz hat. Im Vergleich zu den 9,3 Monaten Laufzeit kann die gleiche Kohle, mit einer konstanten Filtergeschwindigkeit von 2 m/h mehr als anderthalb Jahre betrieben werden. Allerdings wird im Vergleich zu der dynamisch betriebenen Kohle nur absolut ein Drittel mehr Wasser durchgesetzt. Die Laufzeit des Reaktivats der gleichen Kohle beträgt zwei Drittel der Laufzeit der Frischkohle. In Bild 4-26 sind die Eliminationsgrade für unterschiedliche Arzneimittelwirkstoffe bei Probenahmen nach 1.400 und 3.500 Bettvolumina für GA4 und GA5 dargestellt. Es wird deutlich, dass beide Kohlen bei den aufgeführten Bettvolumina für die meisten Stoffe einen Rückhalt von 80 % und mehr bieten. Die reaktivierte Kohle adsorbiert bei 1.400 BVT so gut wie die Frischkohle. Bei 3.500 BVT sind jedoch die Eliminationsgrade des Reaktivats für viele Spurenstoffe schlechter als die der Frischkohle. Für Sulfamethoxazol werden beispielsweise nach 3.500 BVT von der Frischkohle noch rund 80 % zurückgehalten, bei dem Reaktivat sind es nur rund 30 %, bei Carbamazepin hingegen verzeichnen beide Kohlen nach 3.500 BVT eine Elimination von über 95 % [BUHRBAUM UND BRUN, 2013].



**Bild 4-26: Eliminationsgrade der GA4 und GA5 in Obere Lutter nach 1.400 und 3.500 Bettvolumina [nach BUHRBAUM UND BRUN, 2013]**

Entscheidend für die Laufzeit einer Aktivkohlefiltration ist das Kriterium, welches für das Erreichen einer Sättigungsbeladung angesetzt wird. Dieses können zum Beispiel ein maximaler CSB-Wert als Summenparameter, eine Mindest-CSB-Elimination, eine maximale Konzentration einzelner Spurenstoffe oder ein Mindestwert für deren Elimination sein. In Bild 4-27 sind die normierten Ablaufkonzentrationen des CSB der drei Adsorber aus der zweiten Projektphase und die korrespondierenden Werte aus der ersten Phase in Abhängigkeit der durchgesetzten Wassermengen dargestellt. Der dynamisch mit Frischkohle betriebene GA3 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie der GA aus der ersten

Phase (Frischkohle, 2 m/h) mit einigen Abweichungen im Mittelteil der Kurven. Im Vergleich zeigt der GA5 mit dem Reaktivat bis zu etwa 5.000 Bettvolumina ein ähnliches Verhalten auf, danach findet aber ein geringerer Rückhalt an CSB statt. Der konstant mit Frischkohle betriebene GA4 zeigt ab 1.500 Bettvolumina einen deutlich besseren Rückhalt an CSB im Vergleich zu GA5 auf. Bei 6.000 Bettvolumina bricht der CSB von allen Kohlen zu etwa 75 % bis 90 % durch. Spurenstoffe wie Carbamazepin werden aber noch zu mehr als 95 % (GA4, Frischkohle) bzw. 80 % (GA5, Reaktivat), zurückgehalten (vgl. hierzu Bild 8-1, Bild 8-2).



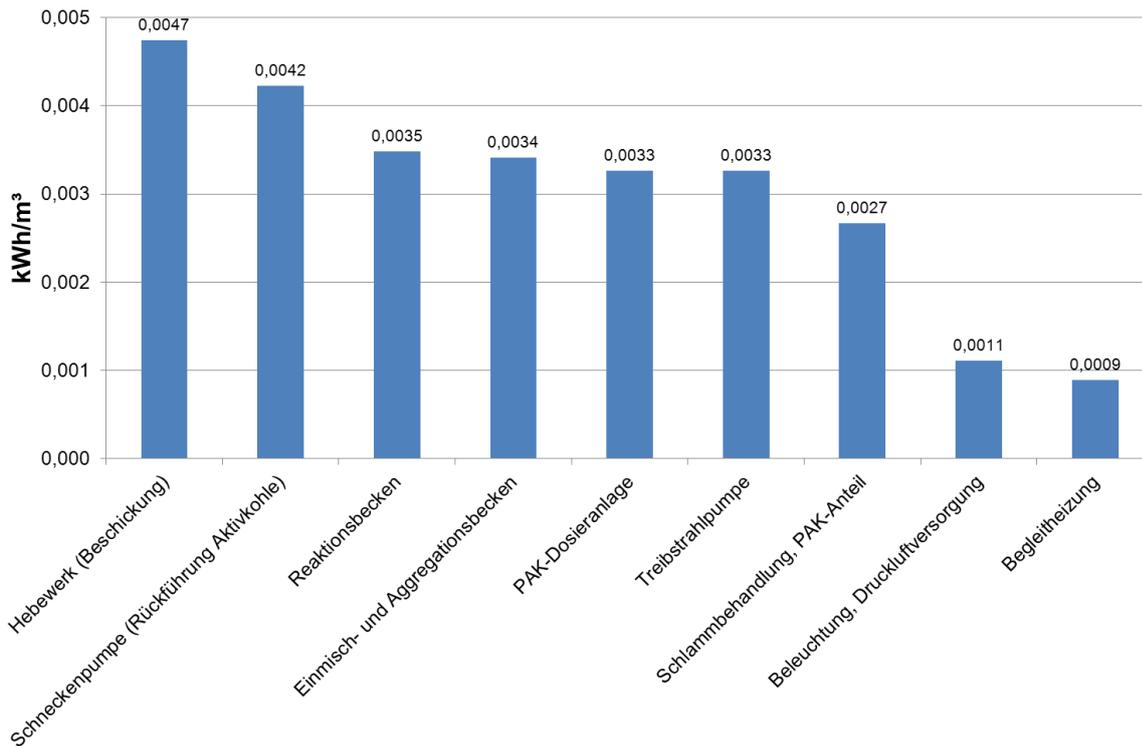
**Bild 4-27: Normierte Ablaufkonzentration  $c/c_0$  des CSB der Adsorber im Vergleich zu den analogen Daten des GA in ersten Projekt [NAHRSTEDT ET AL, 2013B]**

#### 4.1.7 Kläranlage Böblingen-Sindelfingen

Seit Januar 2012 wird der Stromverbrauch gemessen. Die Hauptstromverbraucher sind:

- Hebewerk zur Beschickung (etwas weniger als 1 m Förderhöhe zur Überwindung der hydraulischen Verluste innerhalb der PAK-Anlage),
- Schneckenpumpe zur Rückführung der Aktivkohle (ca. 1,2 m Förderhöhe),
- Umwälzung im Reaktionsbecken,
- Umwälzung im Einmisch- und Aggregationsbecken.

Weitere Verbraucher sind die PAK-Dosieranlage und eine Treibstrahlpumpe. Ein Anteil der Schlammbehandlung lässt sich dem PAK-Anteil zurechnen. Beleuchtung, Druckluftdosierung und Begleitheizung sind weitere kleine Verbraucher. In Bild 4-28 ist der Stromverbrauch in kWh/m<sup>3</sup> den einzelnen Verbrauchern zugeordnet.



**Bild 4-28: Stromverbrauch der Aktivkohleadsorption nach Verbrauchern [nach BIEBERSDORF ET AL., 2012]**

Die Aktivkohleadsorption benötigt etwa 365.000 kWh/a, also 2,6 kWh/(E·a) bzw. **0,027 kWh/m³** bei einer Abwassermenge von 13.500.000 m³/a. Die Flockungsfiltration verbraucht 420.000 kWh/a, also 3 kWh/(E·a) bzw. 0,031 kWh/m³. Der übrige Betrieb der Gesamtanlage beläuft sich auf 4.300.000 kWh/a, also 30,7 kWh/(E·a) bzw. 0,319 kWh/m³.

Die Aktivkohleadsorption und die Flockungsfiltration zusammen verursachen somit 5,6 kWh/(E·a) [BIEBERSDORF ET AL., 2012] bzw. **0,058 kWh/m³** (bei einer Jahreswassermenge von 13.500.000 m³/a und einem Anschlusswert von 140.000 E) oder rund 15,5 % vom Gesamtenergieverbrauch der Anlage.

BIEBERSDORF ET AL. (2012) weisen darauf hin, dass die hydraulischen Verluste infolge der kompakten Lageplananordnung und einer tangentialen Rohrleitungsanbindung an das Kontaktbecken gering sind. Kaskadierte Kontaktbecken und die Umleitung des Zulaufs würden zu höheren hydraulischen Verlusten und damit auch zu höherem Energieverbrauch für das Hebewerk führen. Günstig ist zudem, dass das Sedimentationsbecken rund ist und das Kontaktbecken als Ring herum angeordnet ist. Der spezifische Energieeintrag für die Umwälzung von Rechteckbecken wäre rund 5-mal höher.

Bei einer Zugabe von 10 g/m³ PAK in Böblingen-Sindelfingen ist eine zufriedenstellende Spurenstoffelimination zu verzeichnen. Carbamazepin, Diclofenac, Benzotriazole, und Iomeprol werden, in Bezug auf den Zulauf der Kläranlage zu 85 % und mehr eliminiert. Ibuprofen und die östrogene Gesamtaktivität werden zu mehr als 95 % vermindert. [BIEBERSDORF ET AL., 2012]

#### 4.1.8 Kläranlage Mannheim

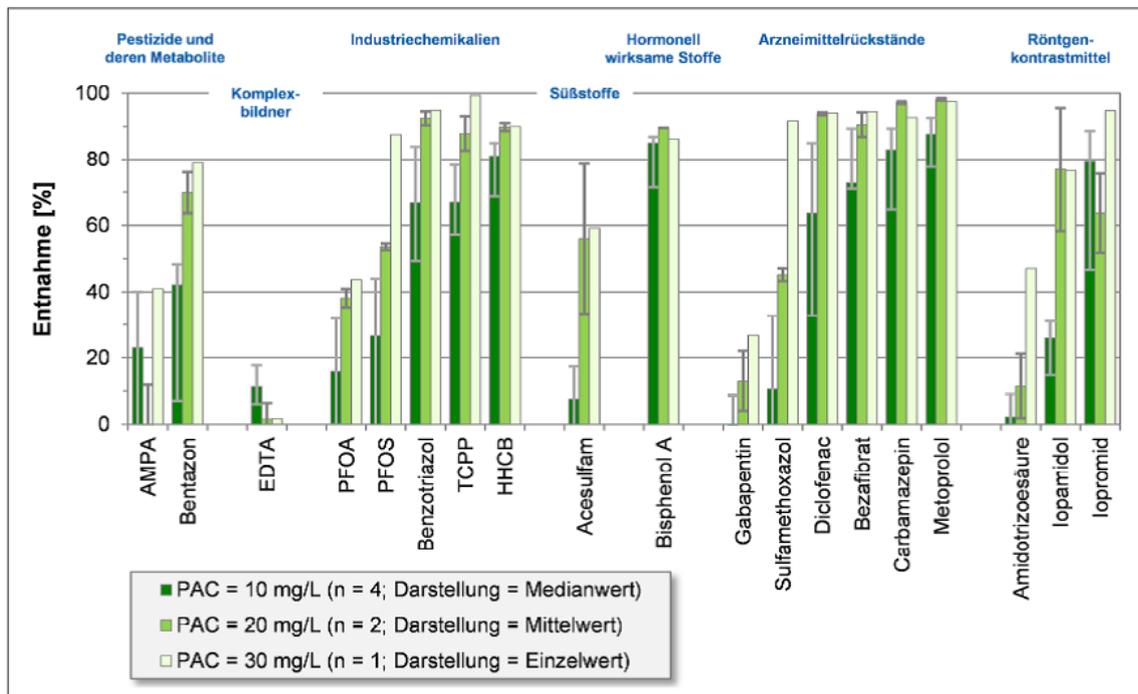
Auf der KA Mannheim wurde der Energieverbrauch für die Pulveraktivkohlestufe aufgezeichnet. Zwischen dem 24.8.2012 und dem 22.2.2013 wurde ein Gesamtverbrauch von 98.520 kWh aufgezeichnet. Bei einer durchgesetzten Wassermenge von 3.144.960 m<sup>3</sup> (entsprechend festgesetzten 200 L/s)<sup>2</sup> an 182 Tagen entspricht dies einem spezifischen Energieverbrauch von 0,031 kWh/m<sup>3</sup>. Ein weiteres Ablesen des Zählers am 18.6.2013 liefert bei 4.890.240 m<sup>3</sup> Wasser Durchsatz an insgesamt 283 Tagen (15 Tage Stillstand wurden herausgerechnet) einen spezifischen Energieverbrauch von 0,030 kWh/m<sup>3</sup>. Die Dosierung über den Versuchszeitraum lag bei 10 mg/L PAK (entsprechend 10 g/m<sup>3</sup>). Dieser Energieverbrauch berücksichtigt alle für den Betrieb der PAK-Stufe notwendigen Aggregate: Rührwerke, Dosiereinrichtungen, Messtechnik, Räumler und Rücklaufkohlepumpen. Die Rückführung des Spülwassers, die Tauchmotorpumpen zur Förderung des Wassers auf die Filter sowie die DIA-Pumpen zur Beschickung der Pilotanlage sind hierbei nicht berücksichtigt. Auch der konventionelle Filter wird mit Pumpen beschickt, rückgespült und besagte Pumpen sind nur für den Betrieb der Pilotanlage notwendig. Beim zukünftigen Ausbau der Anlage auf vollen Trockenwetterzufluss [vgl. MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG, 2013] werden diese DIA-Pumpen wegfallen und das Wasser wird im freien Gefälle in die Becken laufen. [KUHLMANN UND MONDL, 2013]

Die Spurenstoffelimination auf der KA Mannheim wurde für PAK-Dosierungen von 10 mg/L und 20 mg/L und 30 mg/L untersucht. Die Messungen von insgesamt 180 Einzelsubstanzen ergaben hierbei für rund 70 Stoffe Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenze nach der biologischen Behandlung. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der PAK-Stufe wurde der Ablauf der Filtration der PAK-Stufe mit dem Ablauf des Filters einer der anderen vier konventionellen Stufen verglichen. In Bild 4-29 sind die in Mannheim ermittelten Eliminationsgrade für ausgewählte Spurenstoffe aufgeführt. Diese beziehen sich auf die Adsorptionsstufe, der Vergleich Zulauf-Ablauf Kläranlage wurde nicht durchgeführt. Bei einer PAK-Dosierung von 10 mg/L werden einige Substanzen wie Carbamazepin und Metoprolol bereits zu über 70 Prozent oder teilweise sogar in einem noch höheren Umfang zurückgehalten. Eine Erhöhung der Dosierung führt zu einer Verbesserung des Rückhaltes für viele Stoffe. Stoffe die jedoch bei 10 mg/L PAK kaum eliminiert werden, werden auch bei der doppelten Dosis meist nicht vermehrt zurückgehalten, wie z.B. der Komplexbildner EDTA und das Röntgenkontrastmittel Amidotrizoensäure. Manche Stoffe wie PFOS und Sulfamethoxazol können erst mit Zugabe von 30 mg/L PAK in einem vergleichsweise ähnlich hohen Maße entfernt werden wie andere Stoffe bei einer Zugabe von 10 mg/L bzw. 20 mg/L. [METZGER ET AL., 2012]

---

<sup>2</sup> Da es bei der maximalen Menge von 300 L/s (vgl. 3.8) im Dauerbetrieb (plus Spülabwasser) über einen längeren Zeitraum zu einer Verschiebung der Kohle in das Absetzbecken kommt, wurde der Dauerbetrieb auf 200 L/s eingestellt. Zu dieser Menge kommt noch das Spülabwasser aus den Filtern hinzu, welches in die Kontaktbecken eingeleitet wird [KUHLMANN, 2013].

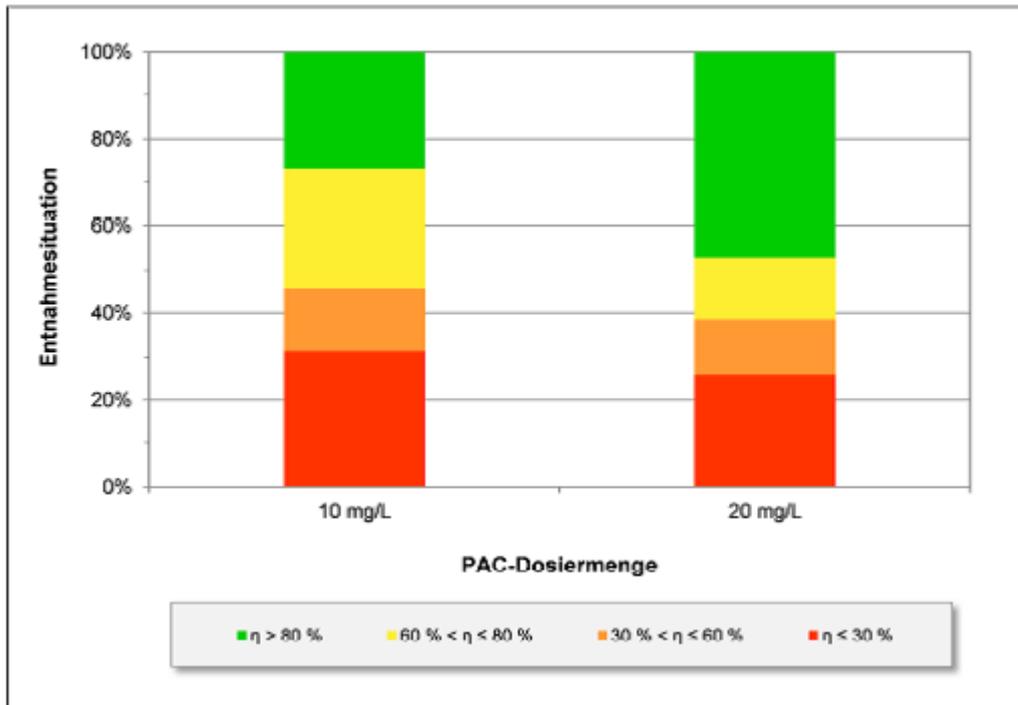
Für einige Spurenstoffe, wie zum Beispiel Diclofenac, fand auch ein Abbau im Filter der konventionellen Straße statt, der bei den aufgeführten Eliminationsgraden jedoch nicht berücksichtigt wird. Die Elimination der Spurenstoffe ist auf den Ablauf der Nachklärung bezogen; für Kläranlagen mit einer bereits bestehenden Filtration müsste die Entnahme demnach auf den Ablauf des konventionellen Filters bezogen werden, um die vermehrte Elimination zu bewerten. [KAPP 2012, METZGER ET AL. 2012] Eine Rückführung der Überschussschleife in die Biologie führte für einige Spurenstoffe noch zu einer weiterführenden Elimination, wohingegen kein weiterer Rückgang des CSB-Wertes beobachtet wurde [KAPP, 2012].



**Bild 4-29: Prozentuale Entnahme von Spurenstoffen im System Adsorptionsstufe + Filtration bei unterschiedlichen PAK-Dosiermengen [METZGER ET AL., 2012]**

Im Vergleich zu den Werten aus der Literatur reihen sich die Werte aus Mannheim mit einem mittleren Energieverbrauch von  $0,03 \text{ kWh/m}^3$  an die niedrigeren Werte aus Phase I an. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass keine Förderhöhe zu berücksichtigen ist, und auch die Anlage schon mit einer konventionellen Filtration betrieben wird, also lediglich der Verbrauch der Adsorptionsstufe ins Gewicht fällt. Was die Spurenstoffelimination betrifft, können bei  $10 \text{ mg/L}$  PAK schon signifikante Reduktionen festgestellt werden, die bei einer Zugabe von  $20 \text{ mg/L}$  für die meisten Stoffe erhöht werden [vgl. KAPP 2012, METZGER ET AL., 2012]. Die Gesamtentnahme in der adsorptiven Stufe für alle 70 in Mannheim nachgewiesenen Stoffe ist in Bild 4-30 dargestellt. Bei einer Zugabe von  $10 \text{ mg/L}$  PAK können etwa 25 % der nach der biologischen Reinigung vorliegenden Stoffe zu mindestens 80 Prozent zurückgehalten werden. Bei einer Zugabe von  $20 \text{ mg/L}$  erhöht sich dieser Anteil auf 35 Prozent. Bei diesen Stoffen handelt es sich hauptsächlich um Rückstände von Arzneimitteln. Stoffe,

die bei einer Zugabe von 10 mg/L schlecht entfernt werden, werden auch bei 20 mg/L kaum vermehrt entfernt [METZGER ET AL. 2012]. Da die Eliminationen sich auf den Zulauf zur adsorptiven Stufe beziehen, können bei Zugabe von 10 mg/L PAK Eliminationen in der vorgeschalteten Klärstufe jedoch schon für ein Einhalten der je nach Qualitätsziel angesetzten Zielwerte sorgen.



**Bild 4-30: Gesamtentnahme in der adsorptiven Stufe für die 70 nachgewiesenen Stoffe [METZGER ET AL., 2012]**

#### 4.1.9 Kläranlage Gütersloh-Putzhagen

In Gütersloh-Putzhagen wurde keine separate dauerhafte Energiemessung für die zwei auf GAK umgerüsteten Filterzellen durchgeführt. Für die Berechnung des Energieverbrauchs wurde auf Einzelmessungen und Rechenwerte zurückgegriffen [vgl. NAHRSTEDT ET AL. 2013A]. Für die Berechnung der Kosten des Adsorberbetriebs wurde einerseits der Energiebetrieb des Filters, andererseits die Spülungen des Filters betrachtet. Der Filterbetrieb wird pro Jahr und pro Filter auf 43.781 kWh/a angesetzt. Bei einer Abwassermenge von 1.801.275 m<sup>3</sup>/a (23,5 h Betrieb am Tag, bei 210 m<sup>3</sup>/h Durchfluss) ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch für die Filtration von 0,024 kWh/m<sup>3</sup>. Für das Spülluftgebläse und für die Spülwasserpumpen wurde eine Leistungsaufnahme durchgeführt. Mit diesen und der jeweiligen Dauer der Spülung kann der spezifische Energieverbrauch für beide Straßen berechnet werden. Bei einer Abwassermenge von 1.801.725 m<sup>3</sup>/a je Filter ergeben sich die Ergebnisse in Tabelle 4-10.

**Tabelle 4-10: Berechnete spezifische Energieverbräuche der GAK-Filter in Gütersloh-Putzhagen**

Energieverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ]	in	GA1 (AquaSorb 5000)	GA2 (Hydraffin AR)
Filtration		0,024	0,024
Luftspülung		2,33 *10 <sup>-4</sup>	2,33*10 <sup>-4</sup>
Wasserspülung		4,65*10 <sup>-4</sup>	6,06 10 <sup>-4</sup>
<b>GESAMT</b>		<b>0,0250</b>	<b>0,0251</b>

Der spezifische Energieverbrauch liegt demnach für beide Straßen bei rund 0,025 kWh/m<sup>3</sup>, wobei der größte Anteil von der Filtration an sich ausgemacht wird. Dieser setzt sich aus dem bei der Filtration mit 5 m/h auftretenden Druckverlust von 200 mbar, dem zu überwindenden geodätischen Höhenunterschied von 4,8 bis 5,0 Metern, einer Laufzeit von 23,5 Stunden am Tag und einem Pumpenwirkungsgrad von ca. 80 % zusammen. Trotz täglicher Rückspülung der Filter scheint diese nur einen geringen Anteil am spezifischen Energieverbrauch der aufwärtsdurchströmten Filtration über GAK auf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen zu haben. Der Energiebedarf für die Rückspülung basiert auf dem Volumenstrom des Rückspülwassers, dem Druckverlust, dem geodätischen Höhenunterschied von 1,6 bis 2,6 m und dem Pumpenwirkungsgrad. Für die Berücksichtigung der Luftspülung wurden der Volumenstrom, der Druckverlust, die Dauer sowie der Wirkungsgrad des Gebläses betrachtet.

Zum Vergleich betrug der Stromverbrauch der Anlage Gütersloh-Putzhagen im Jahr 2012 ohne Spurenstoffelimination 5.024.326 kWh bei 145.152 angeschlossenen Einwohnern [SCHRÖDER, 2013]. Dies entspricht einem einwohnerspezifischen Wert von 34,6 kWh/(E·a) und einem spezifischen Energieverbrauch von 0,786 kWh/m<sup>3</sup> bei einem Zulauf von insgesamt 6.392.940 m<sup>3</sup>. Der spezifische Verbrauch der Filtration über GAK-Anteil würde also rund drei Prozent der Gesamtanlage ausmachen, wobei noch berücksichtigt werden muss, dass auch die Anlage ohne gezielte Spurenstoffelimination bereits mit einer Filtration betrieben wird.

Im Versuchszeitraum wurden sowohl die Elimination von CSB und DOC, als auch die Elimination von Mikroschadstoffen untersucht. Nach den im Versuchszeitraum durchgesetzten 6.700 Bettvolumina war der Rückhalt der organischen Summenparameter nahezu erschöpft. Im Vergleich dazu ergab sich für die Mikroschadstoffe ein unterschiedliches Bild. So werden Stoffe wie Clarithromycin, Atenolol, Bisoprolol und Sotalol, Phenazon und Carbamazepin gegen Ende der Versuche noch vollständig eliminiert. Eine deutliche Verminderung lag noch für Metoprolol, Diclofenac und die Benzotriazole vor, wohingegen nur noch eine leichte Elimination für die Röntgenkontrastmittel Iohexol, Iomeprol, Iopamidol und Iopromid stattfand. Keine Adsorption wurde nach diesem Zeitpunkt für die Stoffe EDTA, Sulfamethoxazol, und Amidotrizoesäure verzeichnet. Eine Extrapolation der Kurven für Diclofenac und Carbamazepin deutet daraufhin, dass diese Stoffe bis zu Durchsätzen von 20 000 Bettvolumina noch zum Teil zurückgehalten werden können. [NAHRSTEDT ET AL., 2013A] Je nach Qualitätsziel könnten die Filter also länger betrieben

werden. Ein längerer Betrieb besitzt jedoch keinen direkten Einfluss auf den Stromverbrauch der Anlage, ein seltenerer Austausch der Kohle würde jedoch zu Einsparungen bei der Herstellung bzw. Regeneration/Reaktivierung von Aktivkohle führen.

Zu beachten ist noch, dass die Versuche ohne Zugabe von Fällmitteln zur Phosphorelimination gefahren wurden. Die Filter zeigten am Anfang der Versuchsreihe einen ähnlich guten Rückhalt an Phosphat wie der konventionelle Referenzfilter. Gegen Ende hin stiegen die Ablaufwerte der Adsorber jedoch Richtung Zulaufniveau an. Demnach sollte eine Kombination aus Adsorption und Fällmittelzugabe erfolgen. Entsprechend würde die Trübstoffbeaufschlagung der Aktivkohle vermindert, die Spülintervalle könnten vergrößert werden und die Laufzeit verlängert. [NAHRSTEDT ET AL., 2013A] Eine Fällmittelzugabe ist jedoch mit höheren technischen und finanziellen Aufwendungen verbunden; auch der zusätzliche Energieaufwand müsste dann betrachtet und bewertet werden.

#### 4.1.10 Kläranlage Kressbronn-Langenargen

Der Stromverbrauch im Jahr 2013 der Kläranlage Kressbronn-Langenargen beläuft sich auf ca. 938.000 kWh. Der Stromverbrauch der Adsorptionsstufe beläuft sich auf 93.000 kWh also ca. 10 % des Gesamtverbrauchs der Anlage. Der Stromverbrauch der PAK-Stufe setzt sich zusammen aus den Verbrauchern Rührwerke (Kontaktbecken, Vorlage, Einmischung Fällmittel und Flockungshilfsmittel), Rücklaufkohlepumpen und Überschusskohlepumpe, sowie Dosierpumpen für die Fäll- und Flockungshilfsmittel. Bei einem Durchsatz von 2.603.000 m<sup>3</sup> im Jahr ergibt sich ein spezifischer Verbrauch von 0,036 kWh/m<sup>3</sup>. [MÜLLER, 2014] Anzumerken bleibt, dass die Kläranlage über ein BHKW zur Eigenstromerzeugung verfügt.

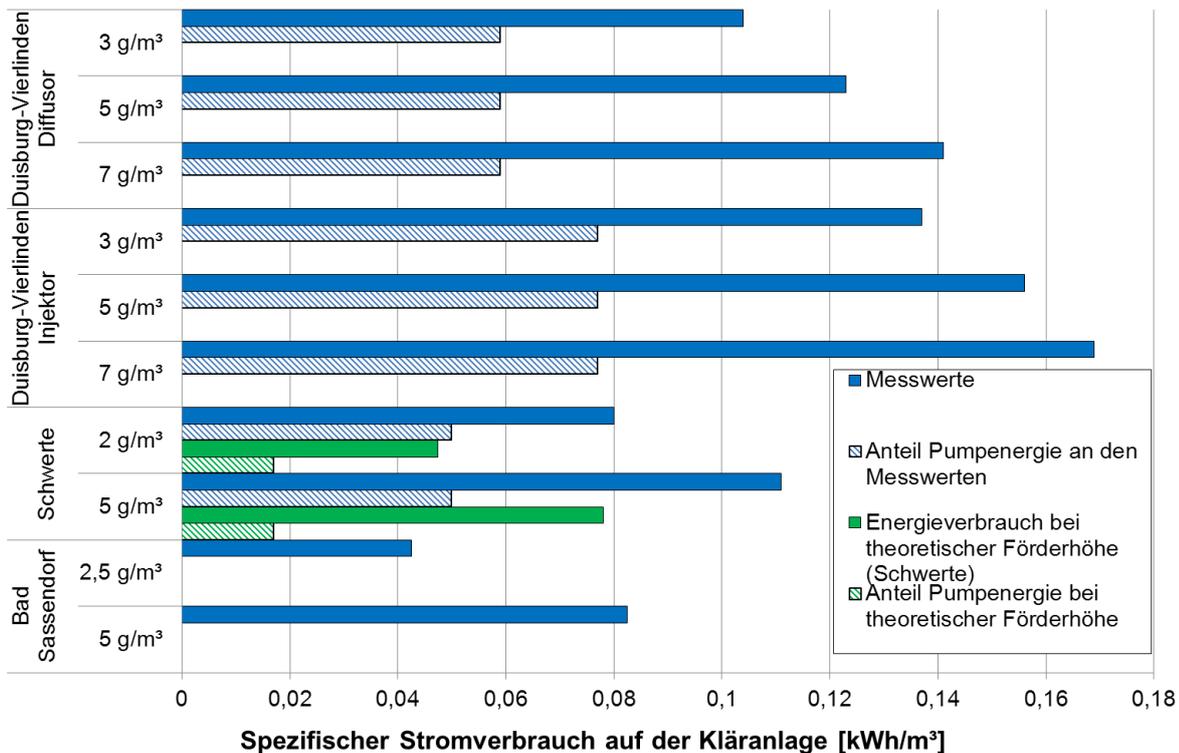
## 4.2 Zusammenfassung der Werte und Vergleich mit Literaturwerten

Im Folgenden wird der für die großtechnischen Anlagen ermittelte Stromverbrauch auf der Kläranlage zusammengefasst und mit Literaturwerten verglichen.

### 4.2.1 Ozonung

Die in Phase II ermittelten Werte für den spezifischen Stromverbrauch der großtechnischen Anlagen auf der Kläranlage sind mit den entsprechenden Dosiermengen an Ozon in Bild 4-31 dargestellt. Zusätzlich ist die Pumpenenergie zur Überwindung der Förderhöhen gesondert dargestellt. Für die Kläranlage Schwerte sind zudem die Werte mit der theoretisch berechneten Förderhöhe dargestellt (vgl. 4.1.2.4).

Die gemessenen Werte liegen im Bereich von ca. **0,04 kWh/m<sup>3</sup> bis ca. 0,17 kWh/m<sup>3</sup>**. Die zugegebenen Dosiermengen an Ozon bewegen sich im Bereich von 2 bis 7 g/m<sup>3</sup>. Mit steigender Ozondosis steigt auch der spezifische Energieverbrauch an, was auf den höheren Verbrauch des Ozongenerators zurückzuführen ist.



**Bild 4-31: Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen Ozonanlagen**

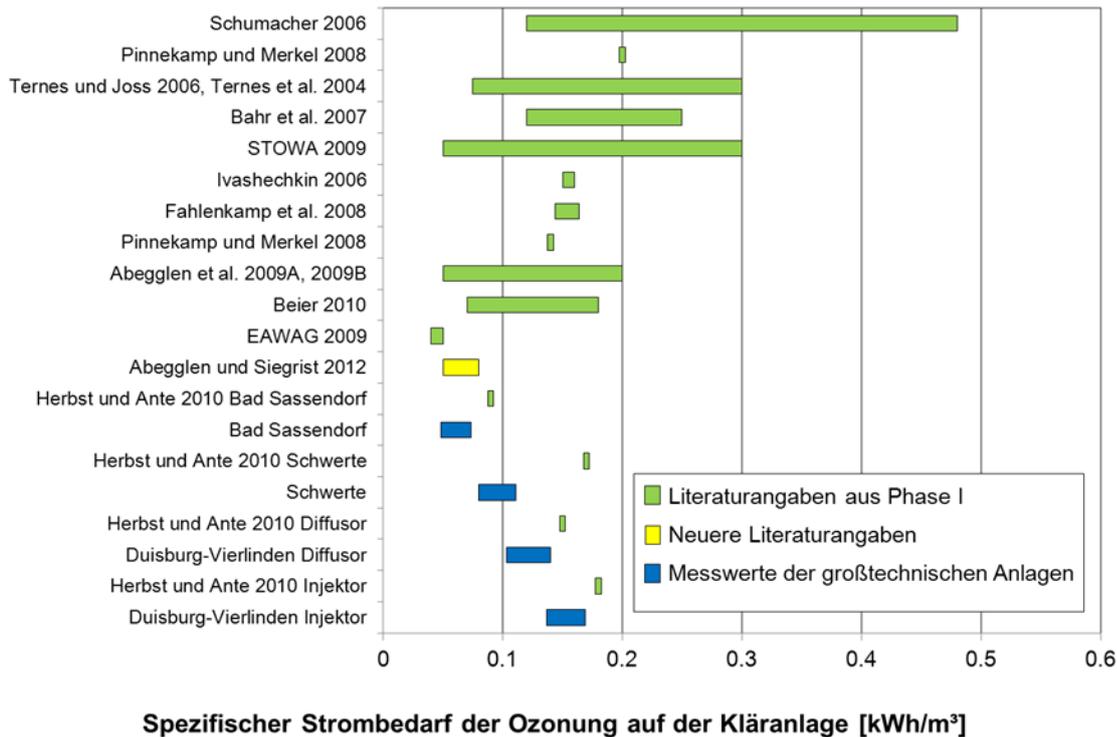
Die gemittelten Messwerte liegen für die KA **Bad Sassendorf** bei 0,043 kWh/m<sup>3</sup> für Dosiermengen um 2,5 g/m<sup>3</sup> und bei 0,083 kWh/m<sup>3</sup> für Dosiermengen um 5 g/m<sup>3</sup>. Auf der KA **Schwerte** beträgt der Verbrauch rund 0,08 kWh/m<sup>3</sup> für 2 g/m<sup>3</sup> bzw. 0,11 kWh/m<sup>3</sup> für 5 g/m<sup>3</sup>. 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 (vgl. Kapitel 4.1.2.1) läge der Gesamtstromverbrauch nur bei 0,047 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 0,078 kWh/m<sup>3</sup> und damit fast identisch

mit dem in Bad Sassendorf. Der Stromverbrauch des Ozongenerators liegt in Bad Sassendorf mit  $0,022 \text{ kWh/m}^3$  bei Dosiermengen um  $2,5 \text{ g/m}^3$  und  $0,050 \text{ kWh/m}^3$  bei  $5 \text{ g/m}^3$  in derselben Größenordnung wie in Schwerte, wo er bei  $2 \text{ g/m}^3$   $0,020 \text{ kWh/m}^3$  und bei  $5 \text{ g/m}^3$   $0,054 \text{ kWh/m}^3$  beträgt.

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

Die Werte liegen sehr gut im Einklang mit den Werten aus Phase I (vgl. Bild 2-1) für die entsprechenden Dosiermengen für das niedrige und das mittlere Szenario. Es bleibt zu beachten, dass auf den untersuchten Anlagen unterschiedliche Förderhöhen zu überwinden sind, und die Nachbehandlungen noch nicht mitberücksichtigt wurden. In Bad Sassendorf ist ein Schönungsteich vorhanden, der jedoch mit keinem relevanten Energiebedarf einhergeht. In Schwerte wird das Abwasser in die konventionelle Biologie eingebracht, und es wird nicht von einem Mehrbedarf an Sauerstoff (Belüftungsenergie) ausgegangen (vgl. 4.1.2.2, THÖLE [2013]). In Duisburg-Vierlinden ist das Wirbelbett nur für eine Straße installiert, der von HERBST UND ANTE [2010] angesetzte Verbrauch von  $0,02 \text{ kWh/m}^3$  würde die entsprechenden Verbräuche der Injektorstraße je nach Dosiermenge um bis zu 15 % erhöhen.

Bild 4-32 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. Der Energiebedarf wird bezogen auf die spezifische Abwassermenge [ $\text{kWh/m}^3$ ] angegeben. Um den Vergleich mit konventionellen Anlagen zu vereinfachen, wurde in Phase I die Bezugsgröße „Einwohner · Jahr“ ( $\text{E} \cdot \text{a}$ ) herangezogen. Die Umrechnung des spezifischen Energiebedarfs von [ $\text{kWh/m}^3$ ] in [ $\text{kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$ ] erfolgte, auf der Basis eines täglichen Abwasseranfalls von  $245 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$  nach dem Handbuch Energie in Kläranlagen [MURL 1999]. Der Bezug auf die aus dem CSB berechnete Einwohnerzahl in Anlehnung an die Arbeiten der DWA-Arbeitsgruppe 216 erwies sich für die Literaturdaten als schwierig, da die meisten Quellen keine Angaben zu CSB-Frachten im Zulauf zu Kläranlagen machen bzw. nur die weitergehende Reinigungsstufe betrachten. Für die großtechnischen Anlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden ist der Bezug auf die aus dem CSB ermittelte Einwohnerzahl in den entsprechenden Kapiteln 4.1.1, 4.1.2 und 4.1.3 angegeben. Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle und im Folgenden auf eine verallgemeinerte Umrechnung auf Einwohner verzichtet.



**Bild 4-32: Strombedarf einer nachgeschalteten Ozonung auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus den großtechnisch untersuchten Anlagen mit Literaturangaben**

Die aus der Literatur zusammengetragenen Werte liegen in der Spannweite von 0,04 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,48 kWh/m<sup>3</sup>. Die angegebenen Daten stammen zum Teil aus Abschätzungen und Modellberechnungen. Andere wurden mittels aus Pilotversuchen gewonnenen Daten berechnet. Die Randbedingungen sind also näher zu betrachten (vgl. PINNEKAMP ET AL., 2011).

Die Bandbreite in SCHUMACHER (2006) ist mit 0,12 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,48 kWh/m<sup>3</sup> so groß, da Dosiermengen zwischen 6 g/m<sup>3</sup> und 24 g/m<sup>3</sup> betrachtet wurden. Hier wird von einem Strombedarf zur Herstellung von Ozon von 20 kWh/kg O<sub>3</sub> ausgegangen. Dieser Wert beinhaltet die Herstellung von Reinsauerstoff vor Ort mittels des sogenannten „Pressure Swing Adsorption“ (PSA) Verfahrens. Im Allgemeinen gilt die Herstellung von Reinsauerstoff vor Ort als unwirtschaftlich und sollte nur bei kleinen Anlagen durchgeführt werden [ITT WEDECO 2007 in PINNEKAMP UND MERKEL, 2008]. In BAHR ET AL. (2007) ist ebenfalls der Stromverbrauch der Reinsauerstoffherstellung vor Ort mittels PSA enthalten. Die Werte sind aus den Erfahrungen mit Pilotversuchen in Berlin-Ruhleben im Rahmen des Projektes Pilotox abgeleitet.

PINNEKAMP UND MERKEL (2008) schätzen den Stromverbrauch anhand einer Modellanlage mit 0,14 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 0,2 kWh/m<sup>3</sup> inkl. Aktivkohlefiltration ab. Ebenfalls auf Grundlage einer Modellanlage schätzen FAHLENKAMP ET AL. (2008) den Stromverbrauch ähnlich mit 0,144 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,164 kWh/m<sup>3</sup> ab. IVASHECHKIN (2006) betrachtet Modellanlagen für 5.000 E, 25.000 E und 100.000 E und gibt die Spannweite zu 0,15 bis 0,16 kWh/m<sup>3</sup> an.

Etwas ältere Literaturangaben [TERNES UND JOSS, 2006; TERNES ET AL., 2004] schätzen den Stromverbrauch relativ hoch ein und geben an, dass er unterhalb von 0,3 kWh/m<sup>3</sup>

erwartet wird. Bis  $0,3 \text{ kWh/m}^3$  geht auch die Angabe von STOWA (2009). Hier sind allerdings hohe Ozonmengen von  $15 \text{ g/m}^3$  zu Grunde gelegt worden. Für  $2,5 \text{ g/m}^3$  werden nur  $0,05 \text{ kWh/m}^3$  angesetzt.

Neuere Literaturangaben schätzen den Stromverbrauch geringer ein. So wird in ABEGGLEN ET AL. (2009A UND 2009B) von einer Spannweite von  $0,05 \text{ kWh/m}^3$  und  $0,2 \text{ kWh/m}^3$  (inkl. Sandfiltration) ausgegangen, wobei auch die Herstellung und der Transport der Betriebsmittel (Sauerstoff) berücksichtigt sind. Aus Angaben in BEIER (2010) können  $0,07 \text{ kWh/m}^3$  bei einer Ozondosis von  $5 \text{ g/m}^3$  und  $0,18 \text{ kWh/m}^3$  bei  $12,5 \text{ g/m}^3$  berechnet werden. Hierbei ist die Reinsauerstofferzeugung vor Ort berücksichtigt.

Die Minimalangabe macht mit  $0,04 \text{ kWh/m}^3$  die EAWAG (2009) mit den Erfahrungen der Pilotanlage Regensdorf bei einer Dosierung von  $3 \text{ g/m}^3$ . Eine auf diesen Erfahrungen basierende, vertiefte Betrachtung für rund 40 Schweizer KA zeigte auf, dass eine Ozonung bei Dosiermengen zwischen  $4$  und  $6 \text{ g/m}^3 \text{ O}_3$  den Energieverbrauch zwischen  $0,05$  und  $0,08 \text{ kWh/m}^3$  erhöht. Durch den Sandfilter steigt dieser Wert noch um  $0,02$  bis  $0,05 \text{ kWh/m}^3$ . Die sich ergebenden Werte sind vor allem vom DOC-Wert im Ablauf der Kläranlage abhängig [ABEGGLEN UND SIEGRIST, 2012].

Die hier betrachteten großtechnischen Anlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden wurden auch schon von HERBST UND ANTE (2010) hinsichtlich ihres Strombedarfs abgeschätzt. HERBST UND ANTE (2010) machen die Angabe  $0,09 \text{ kWh/m}^3$  in Bezug auf Bad Sassendorf. Die Angabe  $0,13 \text{ kWh/m}^3$  bezieht sich auf Schwerte; das Hebewerk wird mit zusätzlichen  $0,04 \text{ kWh/m}^3$  angesetzt. Der Stromverbrauch ist somit in beiden Fällen etwas überschätzt worden.

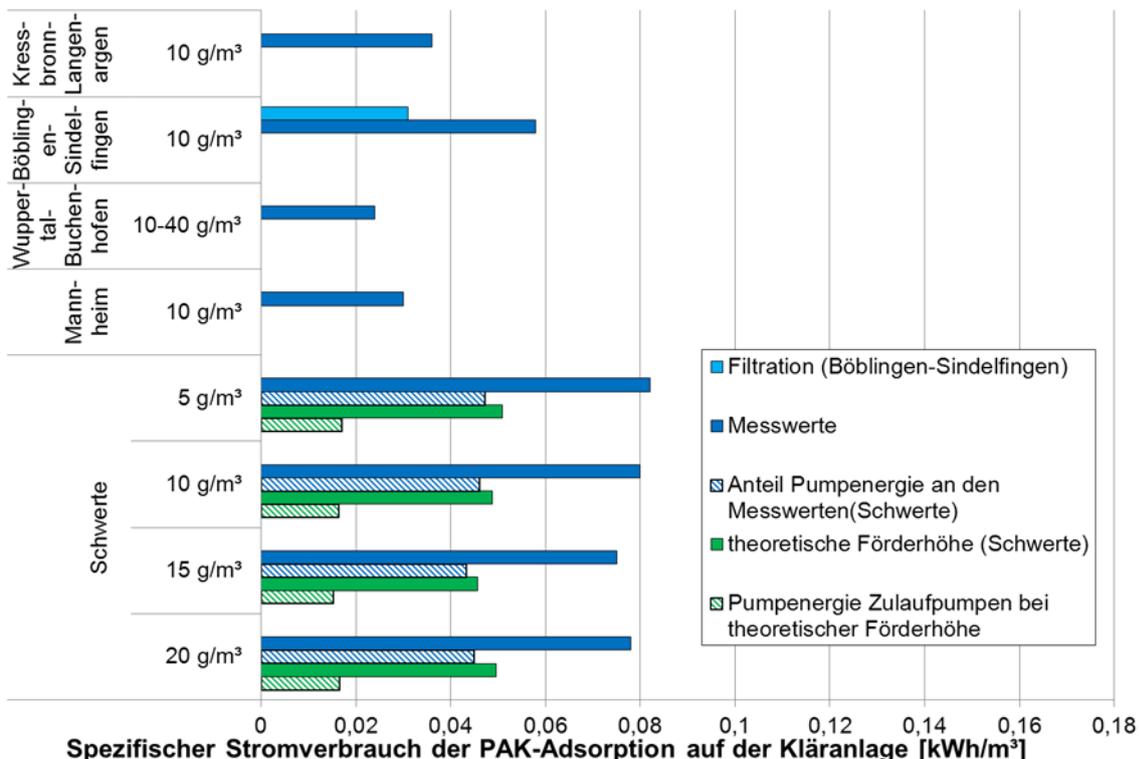
Für Duisburg-Vierlinden gehen HERBST UND ANTE (2010) von einem spezifischen Stromverbrauch von  $0,11 \text{ kWh/m}^3$  für die Diffusor- und von  $0,12 \text{ kWh/m}^3$  für die Injektorstraße aus. Auch hier wird das Hebewerk mit  $0,04 \text{ kWh/m}^3$  angesetzt. Die in Duisburg-Vierlinden gemessenen Werte für die Diffusorstraße liegen etwas tiefer als die Berechnungen. Allerdings wird mehr Strom durch das Hebewerk benötigt, und der Anteil der alleinigen Ozonung ist verhältnismäßig geringer. Die Erfahrungswerte für die Injektorstraße nähern sich bei hohen Dosiermengen den Berechnungswerten an, da in diesen zusätzliche  $0,02 \text{ kWh/m}^3$  für den Wirbelbettreaktor als Nachbehandlung in der Injektorstraße angesetzt sind.

Insgesamt liegen die Werte der großtechnischen Anlagen im einem ähnlichen Bereich wie die Literaturangaben und auch wie die Berechnungen aus Phase I (vgl. 2.1). Ein besonderer Einfluss auf den Energieverbrauch auf der Kläranlage ist den Hebewerken und der etwaigen Nachbehandlung zuzuordnen.

#### 4.2.2 Zugabe von PAK

Die in Phase II ermittelten Werte für den spezifischen Energieverbrauch der großtechnischen Anlagen auf der Kläranlage sind mit den entsprechenden Dosiermengen in Bild 4-33 dargestellt. Es werden zum einen die Messwerte der Anlagen, sowie zum anderen auch der Energiebedarf bei einer theoretischen Höhe von maximal 33,3 % (vgl. 4.1.2.3) der tatsächlichen Förderhöhe in Schwerte 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.

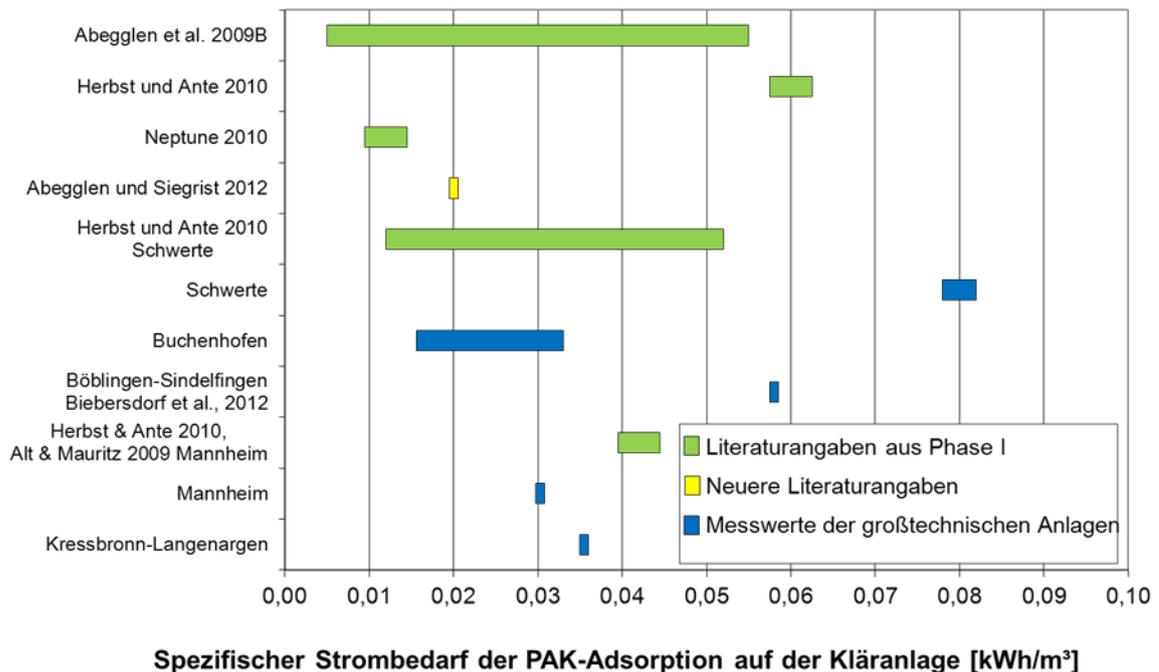
Für die KA **Mannheim** beträgt der Messwert für den Energieverbrauch der Zugabe von PAK ca. 0,03 kWh/m<sup>3</sup>. In **Böblingen-Sindelfingen** beträgt der Mehrbedarf an Strom durch die Adsorptionsstufe 0,027 kWh/m<sup>3</sup>. In **Wuppertal-Buchenhofen** erfolgt die Zugabe von PAK in die Flockungsfiltration mit einem Mehrbedarf an Energie von im Mittel 0,024 kWh/m<sup>3</sup>. 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/m<sup>3</sup> liegt. In **Kressbronn-Langenargen** wurde ein mittlerer Energieverbrauch für den Betrieb der Adsorptionsstufe von 0,036 kWh/m<sup>3</sup> ermittelt. Der Energiebedarf der Zugabe von PAK ist nicht von der Dosiermenge abhängig. Bei günstigen Bedingungen kann der Verbrauch im Bereich von 0,03 kWh/m<sup>3</sup> für die Adsorptionsstufe angesetzt werden.



**Bild 4-33: Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen Spurenstoffeliminationsstufen mit Zugabe von PAK**

Bild 4-34 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. Auf die Umrechnung auf Einwohnerwerte wird aus bereits erwähnten Gründen verzichtet (vgl. 4.2.1).



**Bild 4-34: Strombedarf einer nachgeschalteten Zugabe von PAK auf der Kläranlage – Vergleich von Daten aus den großtechnisch untersuchten Anlagen mit Literaturangaben**

Die aus der Literatur zusammengetragenen Werte liegen in der Spannweite von 0,005 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,06 kWh/m<sup>3</sup>. ABEGGLEN ET AL. (2009) geben für die Adsorption einen Stromverbrauch von 0,005 kWh/m<sup>3</sup> an, für die Sandfiltration werden 0,05 kWh/m<sup>3</sup> veranschlagt, so dass es zu der großen Spannweite kommt. In ABEGGLEN UND SIEGRIST (2012) wird der Energieverbrauch der Adsorptionsstufe ohne abschließende Filtration bei Dosiermengen zwischen 10 und 15 g/m<sup>3</sup> PAK mit 0,02 kWh/m<sup>3</sup> angegeben.

In HERBST UND ANTE (2010) sind Angaben für verschiedene Kläranlagen zu finden. Die Autoren geben für die KA Steinhäule den Stromverbrauch zu 0,06 kWh/m<sup>3</sup> an, wobei für die Adsorption 0,025 kWh/m<sup>3</sup>, für das Hebewerk zur Adsorption 0,012 kWh/m<sup>3</sup>, für das Hebewerk zur Filtration 0,019 kWh/m<sup>3</sup> sowie für den Sandfilter 0,004 kWh/m<sup>3</sup> anfallen. Für die KA Mannheim geben HERBST UND ANTE (2010) sowie ALT UND MAURITZ (2009) einen Stromverbrauch von 0,042 kWh/m<sup>3</sup> an, wobei hier nach HERBST UND ANTE (2010) nur die Adsorptionsstufe (ohne Hebewerk und Nachbehandlung) berücksichtigt ist. Die Auswertung der Daten aus der großtechnischen Anlage Mannheim liefert einen mittleren Energieverbrauch von 0,03 kWh/m<sup>3</sup>; dieser Wert berücksichtigt den durch die Adsorptionsstufe im Vergleich zur konventionellen Filtration bedingten Mehrbedarf an Strom und liegt somit niedriger als die Literaturangabe.

Für die KA Schwerte schätzen HERBST UND ANTE (2010) 0,012 kWh/m<sup>3</sup> für die PAK-Dosierung ohne Hebewerk sowie 0,052 kWh/m<sup>3</sup> mit Hebewerk. Der Stromverbrauch ist somit für die KA Schwerte leicht unterschätzt worden. Er liegt im Mittel bei 0,079 kWh/m<sup>3</sup>.

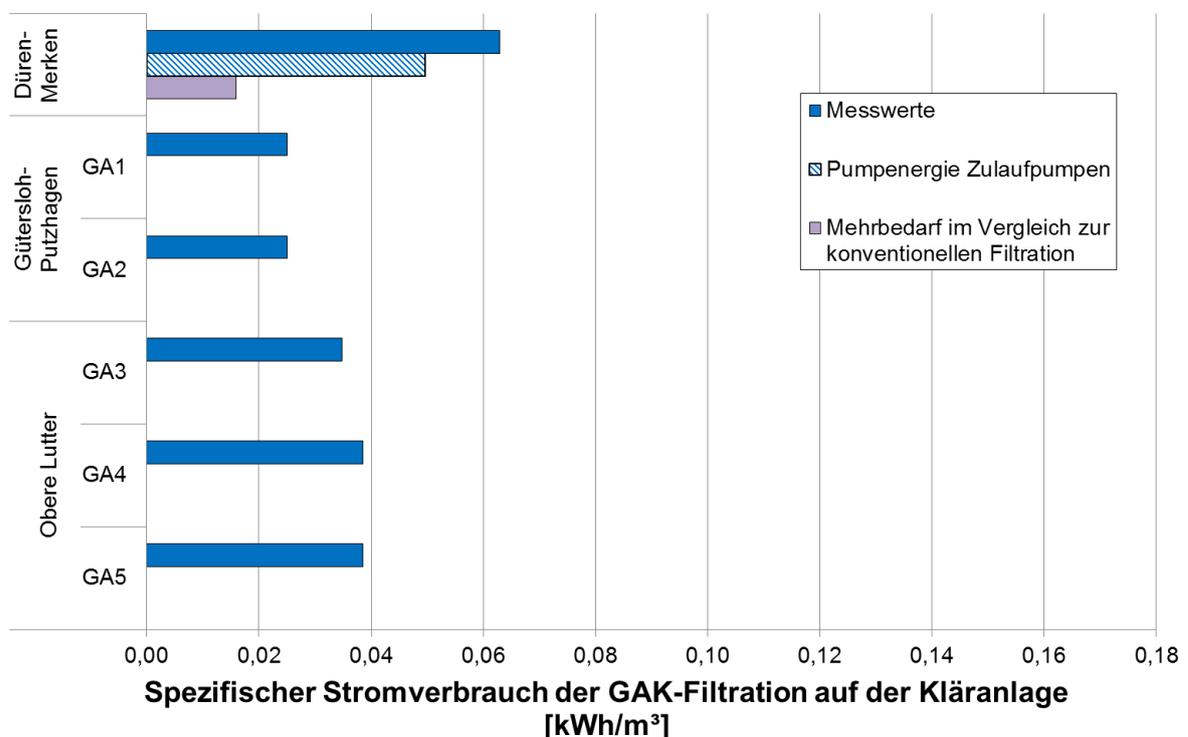
Mit der theoretisch erforderlichen Förderhöhe käme die KA Schwerte auf einen Stromverbrauch von  $0,048 \text{ kWh/m}^3$  und läge damit im prognostizierten Bereich. Die KA Böblingen-Sindelfingen liegt mit  $0,058 \text{ kWh/m}^3$  in einer Größenordnung, die beispielsweise von HERBST UND ANTE (2010) für Steinhäule angegeben wurde und die sich auch in ABBEGLEN ET AL. (2009) unter Berücksichtigung des Sandfilters einordnet. Hier ist zu beachten, dass lediglich  $0,027 \text{ kWh/m}^3$  der  $0,058 \text{ kWh/m}^3$  durch die Adsorption zusätzlich bedingt werden. Die Literaturangaben können also den Bereich des Energieverbrauchs abschätzen, genaue Werte können aber nur in der Großtechnik festgestellt werden und hängen stark von der jeweiligen Anlagenkonfiguration ab.

Aus den aufgeführten Werten lässt sich festhalten, dass der zusätzliche Energieverbrauch einer PAK-Adsorptionsstufe (PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken und PAK-Zugabe in die Flockungsfiltration) im Bereich von  $0,025\text{-}0,035 \text{ kWh/m}^3$  liegt. Diese Werte sind sowohl für die Zugabe in ein Kontaktbecken als auch in die Flockungsfiltration ähnlich wie die Berechnungen aus Phase I (vgl. Kapitel 2.2.1 und Kapitel 2.2.2). Durch die abschließende Filtration/PAK-Abtrennung wird der Verbrauch noch um  $0,01\text{-}0,05 \text{ kWh/m}^3$  erhöht (siehe Böblingen-Sindelfingen und vgl. 2.2.1). Allerdings verfügen viele Kläranlagen vor Einführung der vierten Reinigungsstufe bereits über eine Filtration, so dass dieser Mehrbedarf an Strom nicht unmittelbar der Spurenstoffelimination zugeordnet werden kann. Je nach Anlagenkonfiguration fällt ein zusätzlicher, mehr oder weniger hoher, Strombedarf durch Hebewerke an.

### 4.2.3 Filtration über GAK

Die in Phase II ermittelten Messwerte für den spezifischen Energieverbrauch pro  $\text{m}^3$  behandeltem Abwasser der großtechnischen GAK-Filtrationsanlagen (Großadsorber (GA)) sind in Bild 4-35 dargestellt. Der mittlere Energiebedarf für **Düren-Merken** liegt bei  $0,063 \text{ kWh/m}^3$  inklusive Hebewerk und Rückspülung. Der größte Anteil des Stromverbrauches (rund 79 %) wird durch das Hebewerk bedingt, das jedoch auch bei der konventionellen Filtration zum Einsatz kommt. Der Vergleich zeigt, dass der Zusatzaufwand sich auf  $0,016 \text{ kWh/m}^3$  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 (vgl. Kapitel 4.1.5).

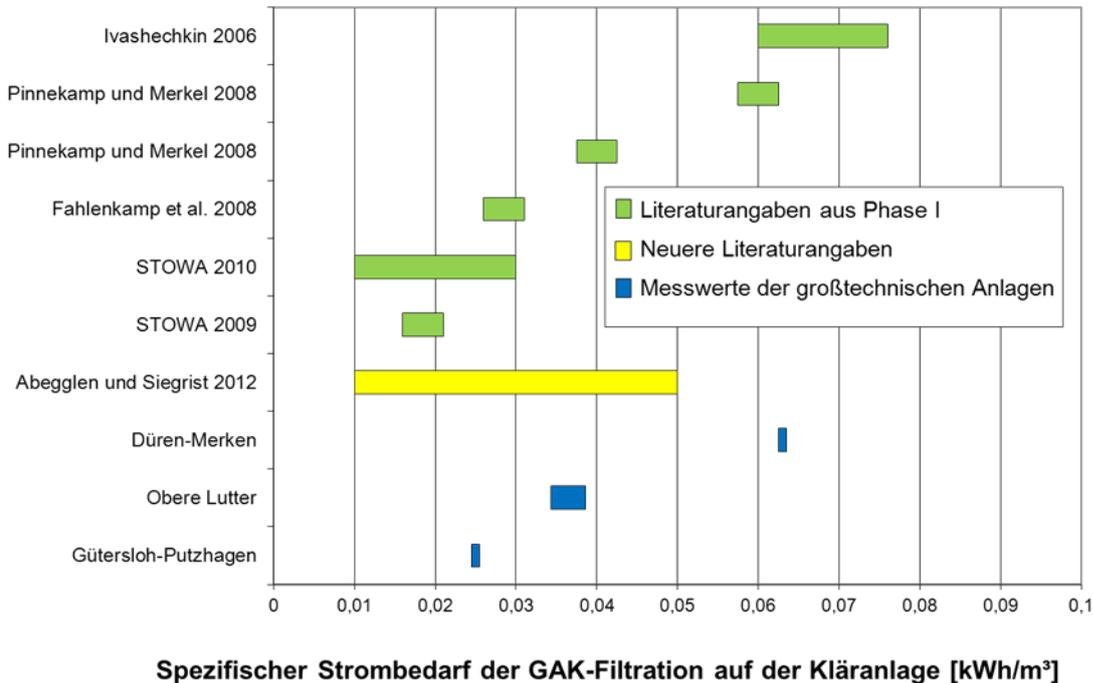
Der mittlere Energiebedarf des aufwärtsdurchströmten Filters in **Gütersloh-Putzhagen** liegt bei  $0,025 \text{ kWh/m}^3$ , wobei nur ein geringer Anteil durch die tägliche Rückspülung bedingt wird. Eine eventuelle Fällmittelzugabe, die im Versuchsbetrieb nicht vorlag, könnte noch Einfluss auf diese Werte haben. Auf dem Klärwerk **Obere Lutter** liegt der Energiebedarf der unterschiedlichen Filter bei rund  $0,037 \text{ kWh/m}^3$ . Hier werden ca.  $0,030 \text{ kWh/m}^3$  durch die eigentliche Filtration bewirkt; der Rest ist den Rückspülungen (zweimal wöchentlich) zuzuschreiben. 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 4-35).



**Bild 4-35: Spezifischer Stromverbrauch der untersuchten großtechnischen GAK-Filtrationsanlagen**

Bild 4-36 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. Auf die Umrechnung auf Einwohnerwerte wird verzichtet (vgl. 4.2.1.)



**Bild 4-36: 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/m<sup>3</sup> und 0,076 kWh/m<sup>3</sup>. IVASHECHKIN (2006) betrachtet Modellanlagen für 5.000 E, 25.000 E und 100.000 E und gibt die Spannweite für die GAK-Filtration mit 0,040 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,056 kWh/m<sup>3</sup> zuzüglich eines Pumpwerkes mit 0,02 kWh/m<sup>3</sup> an. PINNEKAMP UND MERKEL (2008) machen die Angabe von 0,02 kWh/m<sup>3</sup> für die GAK-Filtration. Hinzu kommen entweder 0,04 kWh/m<sup>3</sup> für einen Sandfilter oder 0,02 kWh/m<sup>3</sup> für ein Mikrosieb. FAHLENKAMP ET AL. (2008) geben für die GAK-Filtration 0,008 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,009 kWh/m<sup>3</sup>, für das Pumpwerk 0,008 kWh/m<sup>3</sup> und für einen vorgeschalteten Sandfilter 0,010 kWh/m<sup>3</sup> an. STOWA (2010) geben die Spannweite mit 0,01 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,03 kWh/m<sup>3</sup> an. In STOWA (2009) wird ein Stromverbrauch eines GAK-Filters inklusive Rückspülung von 0,016 kWh/m<sup>3</sup> genannt. In ABEGLLEN UND SIEGRIST (2012) wird der Energiebedarf für einen GAK-Filter im Bereich von 0,01–0,05 kWh/m<sup>3</sup>, ähnlich eines Sandfilters, angegeben. Auch wird Bezug auf den Verbrauch von 0,03 kWh/m<sup>3</sup> der Kläranlage Lage in Deutschland genommen.

Die Einordnung des Energieverbrauchs eines GAK-Filters im Bereich eines Sandfilters (0,01–0,05 kWh/m<sup>3</sup>) wie in ABEGLLEN UND SIEGRIST (2012) scheint demnach plausibel. Je nach Abwasserbeschaffenheit kann Aktivkohle sich schneller zusetzen als herkömmliches Filtermaterial, was zu häufigeren Rückspülungen, wie in Düren, führen kann. Dies kann den Verbrauch im Vergleich zu einem konventionellen Filter erhöhen. Auch die Höhen-

unterschiede, die bei der GAK-Filtration zu überwinden sind, haben Einfluss auf den Energieverbrauch.

Allesamt liegen die Werte der drei großtechnischen Anlagen im Bereich der Literaturwerte und im Bereich der Werte aus Phase I (vgl. Kapitel 2.2.3). Da viele Kläranlagen jedoch bereits über eine Filtration verfügen, ist nur der zusätzliche Anteil im Vergleich zu einer konventionellen Filtration der Spurenstoffelimination unmittelbar zuzuschreiben. So liegt der alleinige Mehrbedarf an Energie in Düren mit 0,016 kWh/m<sup>3</sup> durchaus im Bereich der Berechnungen aus Phase I. Auf dem Klärwerk Obere Lutter ist der Energieverbrauch der GAK-Zellen sogar zwischen 0,006-0,010 kWh/m<sup>3</sup> unterhalb des Verbrauchs der konventionellen Zellen (vgl. 4.1.6). Um vermehrte Rückspülungen zu vermeiden, ist ein vorgeschalteter ausreichender Rückhalt an Feststoffen als sinnvoll zu betrachten.

## 5 Ganzheitlicher Energiebedarf

Der Energieverbrauch auf der Kläranlage (nur in Form von elektrischer Energie) konnte durch die Datenauswertung aktualisiert werden. Für die Energieverbräuche die außerhalb der Kläranlage anfallen (elektrisch und thermisch) und zusammen mit dem Stromverbrauch auf der Kläranlage den ganzheitlichen Energieverbrauch ergeben, gibt es im Rahmen dieser Projektphase einige neue Erkenntnisse. Die in Phase I ermittelten Werte zum ganzheitlichen Energiebedarf sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

**Tabelle 5-1: Zusammenfassung des ganzheitlichen Energiebedarfs aus Phase I**

		Mittelwert [kWh/m <sup>3</sup> ]		Spannweite [kWh/m <sup>3</sup> ]
<b>Ozon</b>	Anlieferung von Reinsauerstoff	0,22		0,03 – 0,58
	Herstellung von Reinsauerstoff	0,26		0,05 – 0,63
		Elektrisch [kWh/m <sup>3</sup> ]	Thermisch [kWh/m <sup>3</sup> ]	Spannweite [kWh/m <sup>3</sup> ]
<b>PAK</b>	Kontaktbecken	0,03 – 0,14	-0,02 – 0,99	0,01 – 1,13
	Flockungsraum eines Filters	0,07 – 0,09	0,005 – 0,99	0,08 – 1,08
<b>GAK</b>	frisch	0,08 – 0,17	0,12 – 3,49	0,20 – 3,66
	regeneriert	0,06 – 0,17	0,04 – 1,83	0,10 – 2,00

Nach den Ergebnissen aus Phase I machen Herstellung und Transport (siehe 5.1 und 5.2) bei Ozon 17 bis 29 %, bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken 69 bis 91 % (oder mehr, wenn der thermische Energiegewinn aus der Schlammbehandlung berücksichtigt wird), bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters 73 bis 92 % (oder mehr, wenn der thermische Energiegewinn aus der Schlammbehandlung berücksichtigt wird), bei Filtration über frische GAK 70 bis 95 % und bei Filtration über regenerierte GAK 40 bis 91,5 % des ganzheitlichen Energiebedarfs aus. Es wird demnach 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 der Aktivkohle bedingt wird.

Im Folgenden werden für die einzelnen Verfahren, die Ergebnisse aus Phase I kurz erläutert und neue Erkenntnisse aus der zweiten Projektphase vorgestellt. Zudem wird, wenn möglich, eine Eingrenzung der spezifischen Dosiermengen aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 4 vorgenommen. Zum besseren Vergleich der Energieformen erfolgt eine Umrechnung des Strombedarfs auf Primärenergie.

Über den kumulierten Energieverbrauch (KEV) kann der Strombedarf auf primäre Energie (in kWh<sub>primär</sub>/kWh<sub>el</sub>) umgerechnet werden. Für Deutschland lagen die Werte in 2012 bei 2,19 kWh<sub>primär</sub>/kWh<sub>el</sub> für den nichterneuerbaren Bedarf und 2,71 kWh<sub>primär</sub>/kWh<sub>el</sub> für den

gesamten Strommix bei einer Einspeisung aus dem lokalen Netz. Bei dieser Umrechnung werden die Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung berücksichtigt. Die Werte sind im Vergleich zu 2010 und 2011 leicht gesunken, was auf den Anstieg der Stromproduktion aus erneuerbaren Ressourcen zurückzuführen ist. Der nichterneuerbare KEV ist bei diesen Ressourcen deutlich geringer als bei der Herstellung aus fossilen Rohstoffen. [INAS, 2013]

Für die Berechnungen im Folgenden wird nur der nichterneuerbare Anteil des KEV betrachtet. Bei der Aktivkohleherstellung/-regeneration, die den größten Anteil der betrachteten thermischen Energie ausmacht, ist davon auszugehen, dass fossile Brennstoffe zur Aktivierung/Regeneration genutzt werden. Somit ist eine bessere Vergleichbarkeit gegeben. Für die Werte zur Herstellung/Regeneration der Aktivkohle wird der Energiebedarf als rein thermisch angenommen und nicht weiter umgerechnet. 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).

## 5.1 Ozonung

### 5.1.1 Anlieferung von Reinsauerstoff

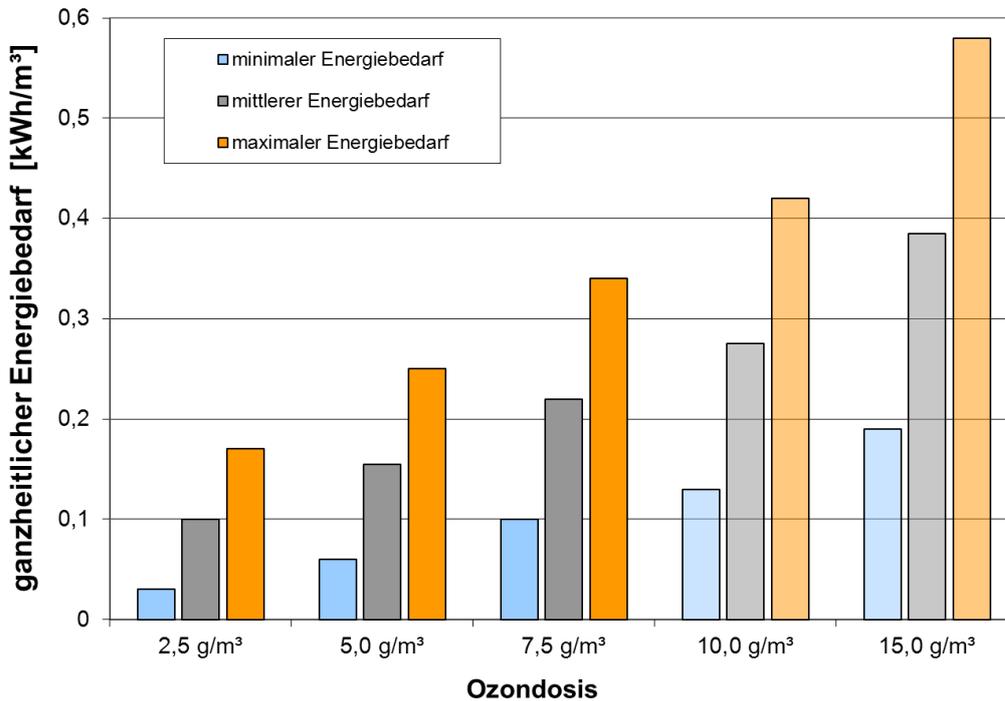
#### 5.1.1.1 Ergebnisse aus Phase I

Wird von einer Lieferung von Flüssigsauerstoff ausgegangen, muss für eine ganzheitliche Betrachtung neben dem Strombedarf auf der Kläranlage auch jener für die Herstellung von Reinsauerstoff und dessen Transport einbezogen werden.

Für die Herstellung von Reinsauerstoff wurden in Phase I drei Verhältnisse von Sauerstoff zu Ozon betrachtet. Dies waren  $10 \text{ kg O}_2/(\text{kg O}_3)$  [MIELCKE, 2010 in BEIER, 2010],  $15 \text{ kg O}_2/(\text{kg O}_3)$  [in Anlehnung an NIJDAM ET AL., 1998] und dazwischen  $12,5 \text{ kg O}_2/(\text{kg O}_3)$ . Dies wurde mit drei verschiedenen Angaben zum Stromverbrauch zur Herstellung von Sauerstoff verknüpft. Hier wurden  $0,26 \text{ kWh}/(\text{kg O}_2)$  [Beier, 2010],  $0,4 \text{ kWh}/(\text{kg O}_2)$  [nach EAWAG, 2009] und  $0,64 \text{ kWh}/(\text{kg O}_2)$  [EIGA, 2010] gewählt. Die mit diesen Daten ermittelte Bandbreite für den Energiebedarf zur Herstellung von Flüssigsauerstoff liegt für Ozondosen zwischen  $2,5$  und  $15 \text{ g}/\text{m}^3$  zwischen  $0,01$  und  $0,14 \text{ kWh}/\text{m}^3$ , der Mittelwert beträgt  $0,04 \text{ kWh}/\text{m}^3$ .

Zur Herstellung von Reinsauerstoff kommt noch der Transport des Sauerstoffs hinzu. Der Energiebedarf hierfür wurde nach NTM (2002) in BAUMANN UND TILLMANN (2004) berechnet. Es wurden  $2,4 \text{ MJ}/(\text{Mg}\cdot\text{km})$  für einen kleinen LKW und kurze Distanzen (hier  $100 \text{ km}$ ) angenommen,  $1,9 \text{ MJ}/(\text{Mg}\cdot\text{km})$  für einen mittelgroßen LKW und regionale Verteilung (hier  $250 \text{ km}$ ) und  $0,7 \text{ MJ}/(\text{Mg}\cdot\text{km})$  für einen großen LKW und große Distanzen (hier  $500 \text{ km}$ ). In Kombination mit den oben genannten Daten für das Verhältnis von Sauerstoff zu Ozon und den Dosiermengen ergeben sich die Werte des Energieverbrauchs für die Anlieferung von Flüssigsauerstoff in einer engen Spannweite um den Mittelwert von  $0,01 \text{ kWh}/\text{m}^3$ .

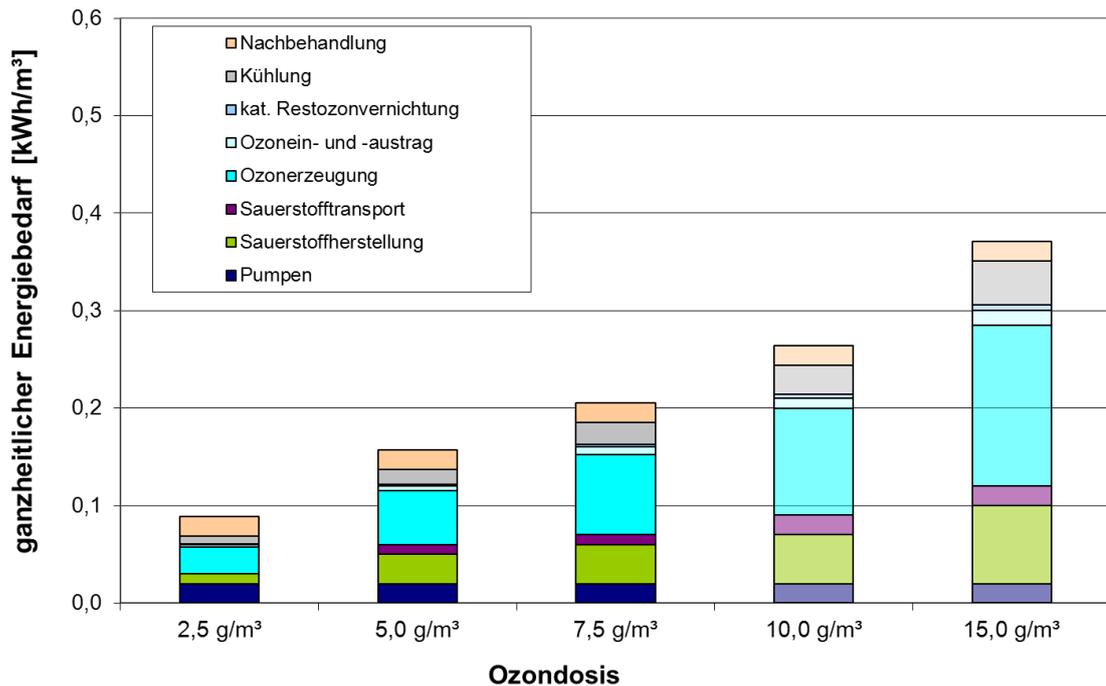
Zusammen mit dem berechneten Stromverbrauch auf der Kläranlage (siehe Kapitel 2.1) ergeben sich in Abhängigkeit der Ozondosis die in Bild 5-1 dargestellten Szenarien.



**Bild 5-1: Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis**

Der ganzheitliche Energiebedarf liegt zwischen 0,03 und 0,58 kWh/m³, im Mittel bei 0,22 kWh/m³. Im Vergleich zum Stromverbrauch auf der Kläranlage führt die Berücksichtigung von Sauerstoffherstellung und -transport zu einem Mehrenergiebedarf von 17 % bis 29 %.

Wie bereits für den Stromverbrauch auf der Kläranlage wurde in Bild 5-2 der ganzheitliche Energieverbrauch auf die einzelnen Schritte aufgeteilt, wobei nur die Ozondosis variiert wurde und ansonsten die Mittelwerte der Betrachtung aus Bild 5-1 angesetzt wurden.



**Bild 5-2: Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis**

Der Sauerstofftransport macht nur einen kleinen Anteil am ganzheitlichen Energiebedarf aus. Die Herstellung des Reinsauerstoffs ist hingegen ab einer Ozondosis von 5,0 g/m³ bereits der zweitgrößte Verbraucher nach der Ozonerzeugung und muss entsprechend berücksichtigt werden.

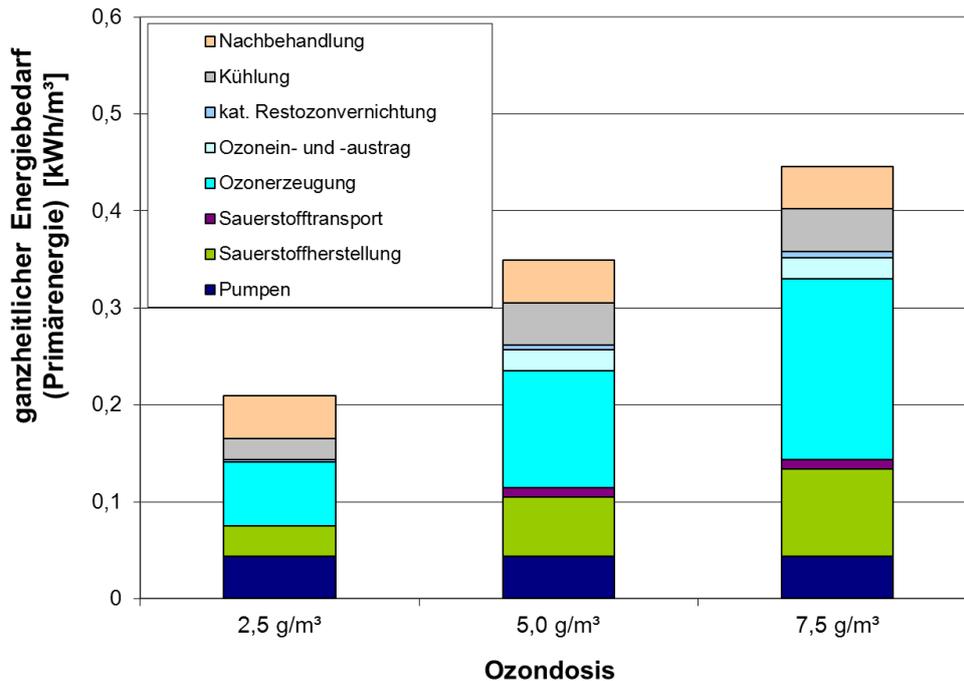
#### 5.1.1.2 Neue Erkenntnisse und Vergleich mit den großtechnischen Anlagen

Die in Phase II ermittelten Werte für den spezifischen Energieverbrauch der großtechnischen Anlagen auf der Kläranlage sind mit den entsprechenden Dosiermengen in Bild 4-31 dargestellt. Die gemessenen Werte liegen sehr gut im Einklang mit den Werten aus Phase I (vgl. Bild 2-1) für die entsprechenden Dosiermengen für das niedrige und das mittlere Szenario.

Neuere Werte von ABEGGLEN UND SIEGRIST (2012) geben einen Primärenergiebedarf von 0,22-0,33 kWh/m³ bei Dosiermengen zwischen 4 und 6 g/m³ Ozon an, ohne Berücksichtigung einer Sandfiltration (zusätzlicher Primärenergiebedarf von 0,12 kWh/m³). Diese Werte liegen höher als die hier aufgeführten Werte, was durch das Zurückrechnen auf Primärenergie zu erklären ist.

Der ganzheitliche Energiebedarf der Ozonung muss also entsprechend auf Primärenergie für den Stromverbrauch umgerechnet werden, da der maßgebliche Teil des Energieverbrauchs bei der Ozonung durch den Verbrauch von Strom bedingt wird. In Bild 5-3 sind die einzelnen Schritte der Ozonung bei mittleren Werten für unterschiedliche Dosiermengen aufgetragen. Im Gegensatz zu Bild 5-2 ist hier für die Pumpen, die Sauerstoffherstellung, die Ozonerzeugung, der Ozonein- und austrag, die Restozonvernichtung, die Kühlung sowie für die Nachbehandlung (0-0,05 kWh<sub>e</sub>/m³ vgl. (PINNEKAMP ET AL., 2011)) der Stromverbrauch auf den Primärenergiebedarf aus nichterneuerbaren Energien

umgerechnet worden ( $2,19 \text{ kWh}_{\text{primär}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ ). In Bild 5-3 ist der Primärenergiebedarf lediglich für die Dosiermengen an Ozon von  $2,5 - 7,5 \text{ g/m}^3$  dargestellt<sup>3</sup>, da die Auswertung der großtechnischen Versuchsanlagen darauf schließen lässt, dass die Dosiermengen in diesem Bereich eingegrenzt werden können. Mit der Umrechnung auf Primärenergie erhöhen sich die spezifischen Verbräuche der Ozonung um mehr als das Doppelte. Der nichterneuerbare Primärenergiebedarf liegt für das mittlere Szenario je nach Dosiermenge zwischen  $0,21$  und  $0,45 \text{ kWh/m}^3$  und damit in ähnlichen Bereichen wie in ABEGGLEN UND SIEGRIST (2012).



**Bild 5-3: Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs bei einer Ozonung mit Anlieferung von Flüssigsauerstoff in Abhängigkeit der Ozondosis inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom**

### 5.1.2 Herstellung von Reinsauerstoff vor Ort

Nach Angabe des Anlagenherstellers ITT WEDECO [in PINNEKAMP UND MERKEL 2008 und IVASHECHKIN 2006] ist eine Sauerstoffgewinnung vor Ort bei größeren Anlagen unwirtschaftlich. Keine der untersuchten großtechnischen Anlagen stellt den Reinsauerstoff vor Ort her, daher ist diese Betrachtung hier nur der Vollständigkeit halber angeführt.

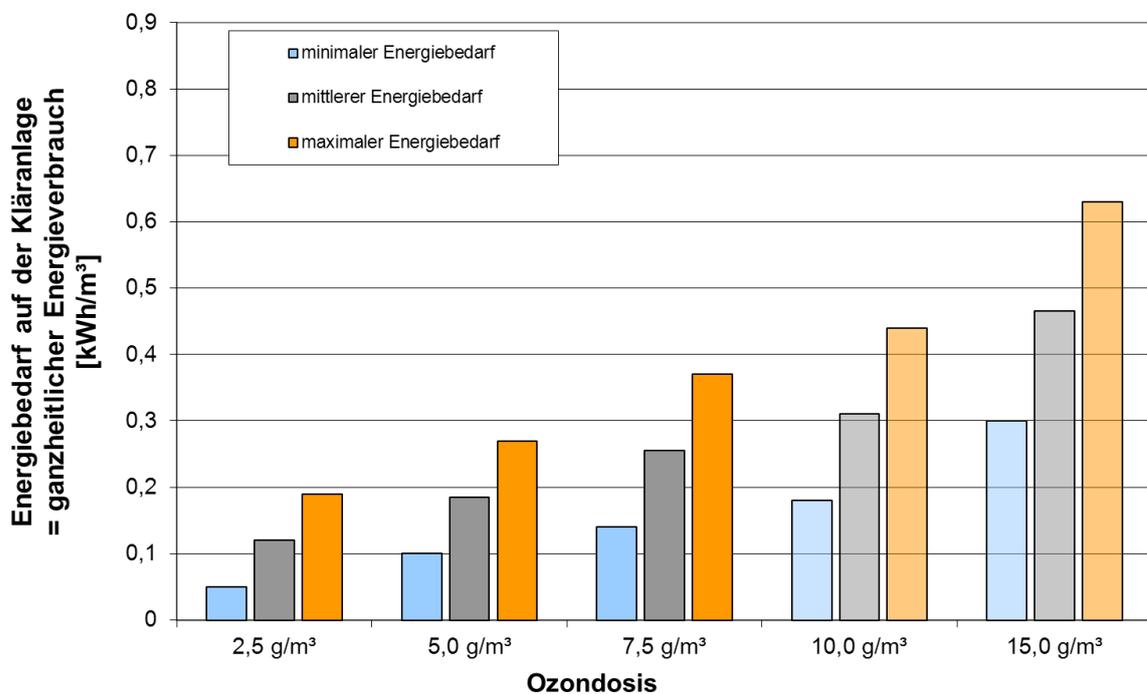
Würde der Reinsauerstoff vor Ort auf der Kläranlage hergestellt, muss diese Position zusätzlich zu dem in Kapitel 2.1 ermittelten Strombedarf auf der Kläranlage berücksichtigt

<sup>3</sup>In Bild 5-1 und Bild 5-2 sind die Energiebedarfswerte der großtechnisch nicht applizierten Dosiermengen von  $10$  und  $15 \text{ g/m}^3$  entsprechend transparent dargestellt.

werden. Außerhalb der Kläranlage fällt dann kein Energiebedarf<sup>4</sup> an und der Energiebedarf auf der Kläranlage entspräche dem ganzheitlichen Energiebedarf.

Für die Herstellung von Reinsauerstoff auf der Kläranlage werden 1,3 kWh/kg O<sub>2</sub> [BAHR ET AL., 2007] bei Verhältnissen von Sauerstoff zu Ozon von 8, 12 und 14 kgO<sub>2</sub>/kg O<sub>3</sub> angesetzt. Der Energiebedarf zur Ozonerzeugung wird mit 8 und 10 kWh/kg O<sub>3</sub> berücksichtigt.

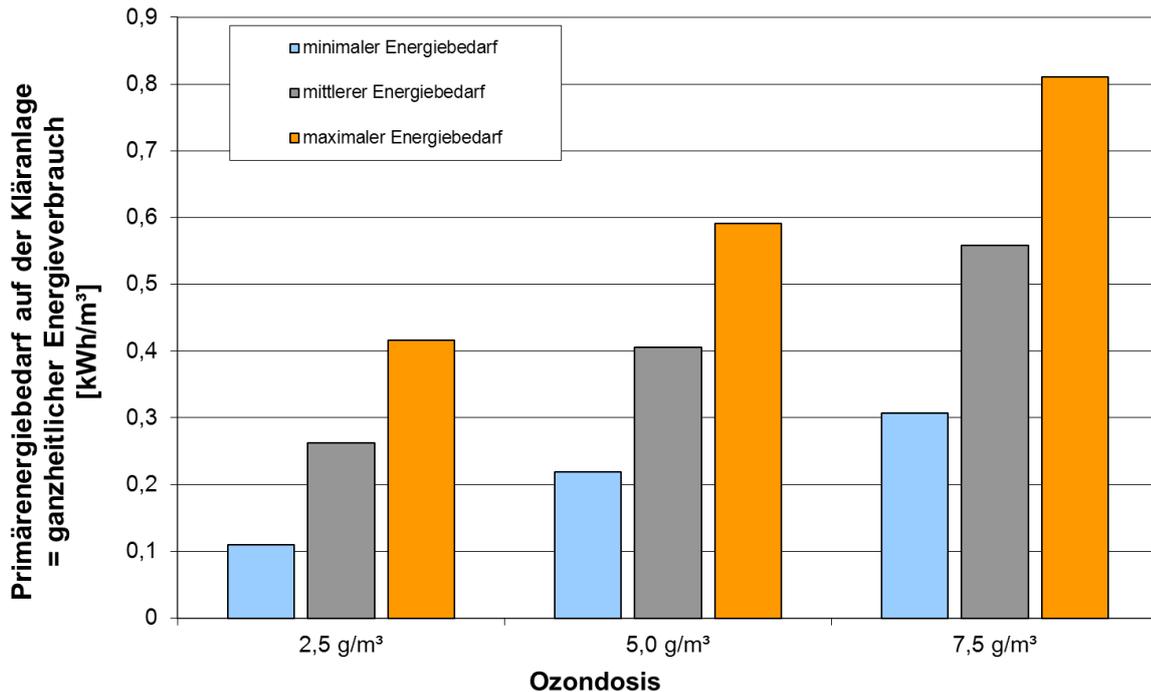
Für jede Ozondosis wurde wiederum ein minimales, mittleres und maximales Szenario zusammengestellt, die in Bild 5-4 zu sehen sind. Im Mittel liegt der Energiebedarf einer Ozonung bei der Herstellung von Reinsauerstoff vor Ort bei 0,26 kWh/m<sup>3</sup> und variiert zwischen 0,05 kWh/m<sup>3</sup> und 0,63 kWh/m<sup>3</sup>. Damit liegt er über dem Strombedarf auf der Kläranlage bei Anlieferung von Reinsauerstoff und auch über dem ganzheitlichen Energiebedarf bei Anlieferung von Reinsauerstoff.



**Bild 5-4: Minimaler, mittlerer und maximaler Energiebedarf auf der Kläranlage/ ganzheitlicher Energiebedarf bei einer Ozonung mit Bereitstellung des Sauerstoffs vor Ort in Abhängigkeit der Ozondosis**

Umgerechnet auf Primärenergie (vgl. 5.1.1.2), ergeben sich die in Bild 5-5 dargestellten Werte für die eingegrenzten Dosiermengen zwischen 2,5 und 7,5 g/m<sup>3</sup> beim mittleren Szenario. Der Primärenergiebedarf beläuft sich entsprechend auf ca. 0,1 bis 0,8 kWh/m<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> innerhalb der an dieser Stelle betrachteten Systemgrenzen



**Bild 5-5:** Minimaler, mittlerer und maximaler Primärenergiebedarf auf der Kläranlage/ ganzheitlicher Energiebedarf bei einer Ozonung mit Bereitstellung des Sauerstoffs vor Ort in Abhängigkeit der Ozondosis

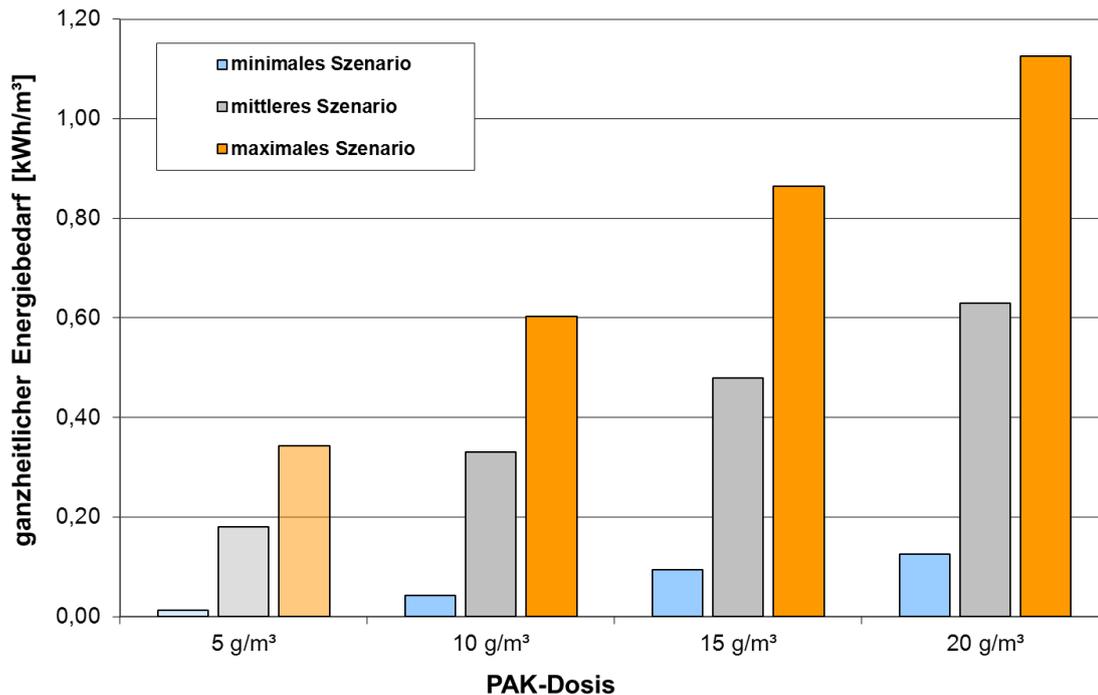
## 5.2 Adsorptive Verfahren

### 5.2.1 Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken

#### 5.2.1.1 Ergebnisse aus Phase I

Für die Betrachtung des ganzheitlichen Energiebedarfs einer Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken muss neben dem Energiebedarf auf der Kläranlage, der in Kapitel 2.2.1 vorgestellt wurde, der Energiebedarf für die Herstellung und den Transport der Aktivkohle berücksichtigt werden. Bei der Herstellung von PAK wird hauptsächlich thermische Energie in Form von Gas und Dampf eingesetzt. Der Bedarf an elektrischer Energie ist je nach Verfahren klein bis vernachlässigbar. Für die folgenden Darstellungen sind beide Energieformen zunächst zusammengefasst.

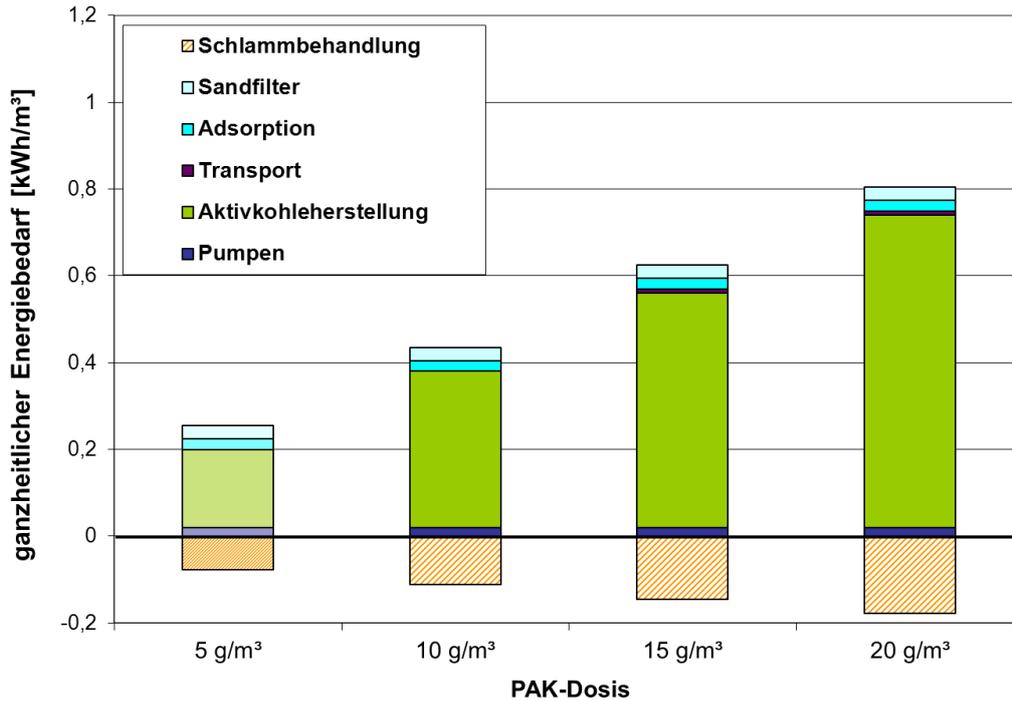
Die Werte für die Herstellung von PAK wurden in Phase I von GAK übernommen und betragen 13,7 kWh/kg [BAYER ET AL., 2005] für das minimale Szenario, 57,9 kWh/kg [MEIER, 1997] für das maximale Szenario und im Mittel 35,8 kWh/kg. Der Transport wurde per Schiff mit Angaben von BAUMANN UND TILLMANN (2004) angenommen. Anders als beim Energiebedarf auf der Kläranlage, spielt nun die Dosiermenge eine Rolle. In Bild 5-6 sind die Szenarien für Dosiermengen zwischen 5 und 20 g/m³ dargestellt.



**Bild 5-6: Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis**

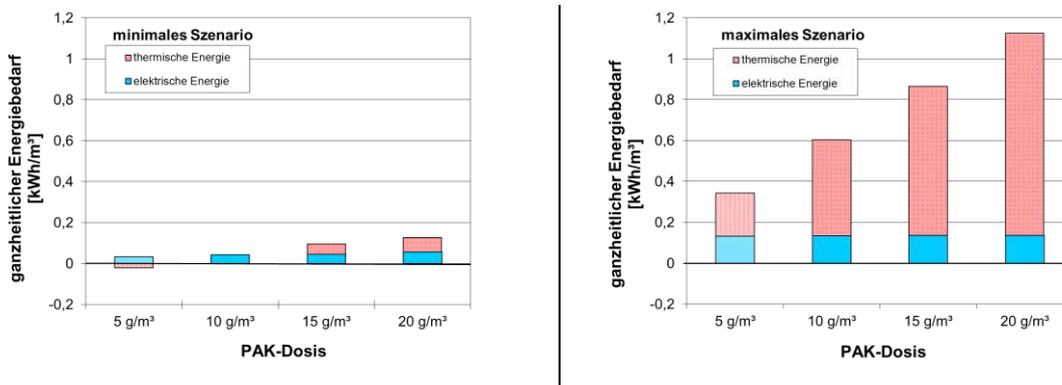
Die Werte für den ganzheitlichen Energiebedarf bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken liegen zwischen 0,01 kWh/m³ und 1,13 kWh/m³, wobei der Anteil für elektrische Energie bei 0,03 bis 0,14 kWh/m³ (zwischen 12 und über 100 %) und der Anteil für thermische Energie (inklusive Transport) bei -0,02 bis 0,99 kWh/m³ liegt. Während der thermische Anteil für die meisten Szenarien hoch ist und zwischen 53 % und 88 % liegt, wird die thermische Rückgewinnung aus der Schlammbehandlung in einem Szenario gleich groß und in einem anderen Szenario größer als der thermische Energiebedarf. Der Anteil für Herstellung und Transport der Aktivkohle liegt zwischen 69 % und 91 % des Energiebedarfs, wenn der thermische Energiegewinn auf der Kläranlage aus der Schlammbehandlung nicht berücksichtigt wird. Wird dieser berücksichtigt, ist der Anteil von Herstellung und Transport noch größer.

In Bild 5-7 ist der ganzheitliche Energieverbrauch auf die einzelnen Positionen aufgeteilt. Es wird deutlich, wie die Herstellung der Aktivkohle den ganzheitlichen Energieverbrauch dominiert. Allerdings verbirgt sich dahinter größtenteils thermische Energie. Variiert wurde nur die PAK-Dosis, während die anderen Werte im Mittel angesetzt wurden.



**Bild 5-7: Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis**

In Bild 5-8 wird für das minimale (links) und maximale Szenario (rechts) einer Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken noch mal zwischen thermischer und elektrischer Energie unterschieden.



**Bild 5-8: Elektrischer und thermischer Energiebedarf bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken für das minimale bzw. maximale Szenario**

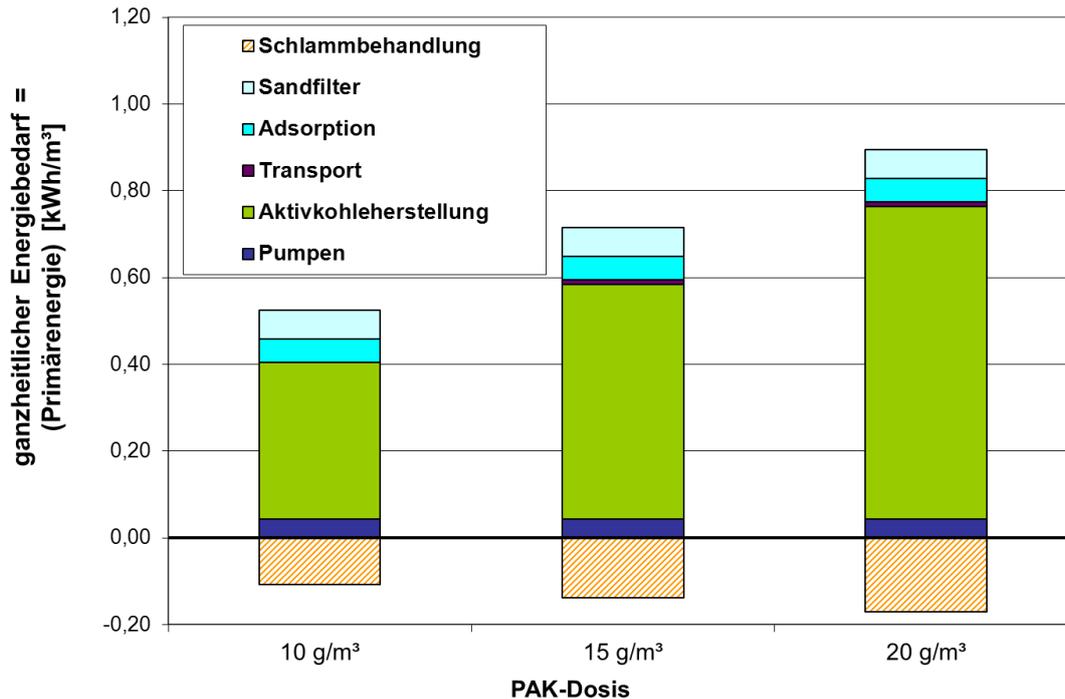
5.2.1.2 Neue Erkenntnisse und Vergleich mit den großtechnischen Anlagen

In ABEGLLEN UND SIEGRIST (2012) wird der Primärenergiebedarf für die Adsorption an PAK mit Werten zwischen 0,32-0,45 kWh/m³ für Dosiermengen zwischen 10 und 15 g/m³, ohne Filtration (Erhöhung des Primärenergiebedarfs um 0,12 kWh/m³) angegeben. Der Rückgewinn von Energie aus der Verbrennung der Kohle ist mitberücksichtigt, Transporte jedoch nicht. Diese Werte ordnen sich gut in das mittlere Szenario aus Phase I ein; hier kommt den Transporten nur ein geringfügiger Anteil am Gesamtenergiebedarf zu. Die Sandfiltration würde den gesamten Energiebedarf noch erhöhen, der Primärenergiebedarf der Sandfiltration wurde aber auch in Phase I nicht berücksichtigt. Der Energiebedarf auf

der Kläranlage für die Adsorption wird mit  $0,02 \text{ kWh/m}^3$  in ähnlichen Bereichen angesetzt. Für die Aktivkohleherstellung werden  $30 \text{ kWh/kg PAK}$  (also im Bereich des mittleren Szenarios aus Phase I) angesetzt. Zusätzlich wird festgehalten, dass die Werte jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden sind [ABEGGLEN UND SIEGRIST, 2012].

Die in Phase II ermittelten Werte für den spezifischen Energieverbrauch der großtechnischen Anlagen auf der Kläranlage sind mit den entsprechenden Dosiermengen in Bild 4-33 dargestellt. Der Strombedarf der Adsorptionsstufe ist unabhängig von der zugegebenen Dosis an Aktivkohle. Die Dosiermenge der Kohle wird lediglich bei der Schlammbehandlung (bei den Auswertungen nicht berücksichtigt) und der Kohleherstellung relevant. Bei günstigen Bedingungen kann der Mehrbedarf an Strom im Bereich von  $0,03 \text{ kWh}_e/\text{m}^3$  für die Adsorptionsstufe angesetzt werden. Die Werte der großtechnischen Anlagen ordnen sich gut in die Verbräuche des niedrigen und mittleren Verbrauchs auf der Kläranlage (ohne Schlammbehandlung) aus Phase I (vgl. 2.2.1) ein. Eine Eingrenzung der Dosiermenge erfolgt aufgrund der Auswertung der großtechnischen Anlagen auf  $10$  bis  $20 \text{ g/m}^3$  (siehe hierzu 8.1). Die Dosiermenge von  $5 \text{ g/m}^3$  ist deswegen in den Diagrammen aus Phase I entsprechend transparent dargestellt (siehe Bild 5-6, Bild 5-7 und Bild 5-8).

Die Umrechnung auf Primärenergie wird an dieser Stelle für die Komponenten des Strombedarfs durchgeführt und ist in Bild 5-9 für die Dosiermengen  $10$  bis  $20 \text{ g/m}^3$  beim mittleren Szenario dargestellt. Da der größte Anteil am ganzheitlichen Energieverbrauch bei der Adsorption an PAK durch die Aktivkohleherstellung bewirkt wird, ergeben sich hier, anders als bei der Ozonung, keine großen Unterschiede. Der Primärenergiebedarf liegt zwischen  $0,52$  und  $0,89 \text{ kWh/m}^3$ . Der zusätzliche Energiegewinn durch Schlammverbrennung liegt zwischen  $0,11$  und  $0,17 \text{ kWh/m}^3$ . Die Aktivkohleherstellung und der Transport werden nicht umgerechnet, da hier (zum überwiegenden Teil) thermische Energie benötigt wird. Für die Schlammbehandlung wird der Strombedarf auf Primärenergie umgerechnet, der überwiegende Anteil ist jedoch dem thermischen Energiegewinn aus der Verbrennung zuzuschreiben. Erneut wird an dieser Stelle auf die unsichere Datenbasis hinsichtlich der Aktivkohleherstellung hingewiesen

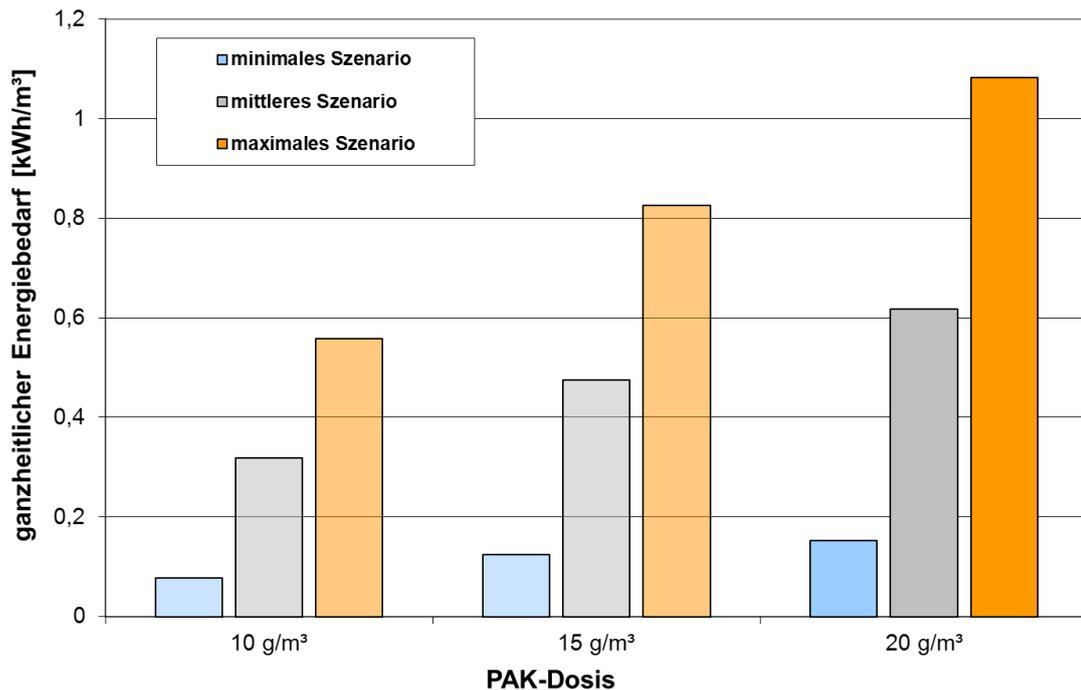


**Bild 5-9:** Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom

## 5.2.2 Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters

### 5.2.2.1 Ergebnisse aus Phase I

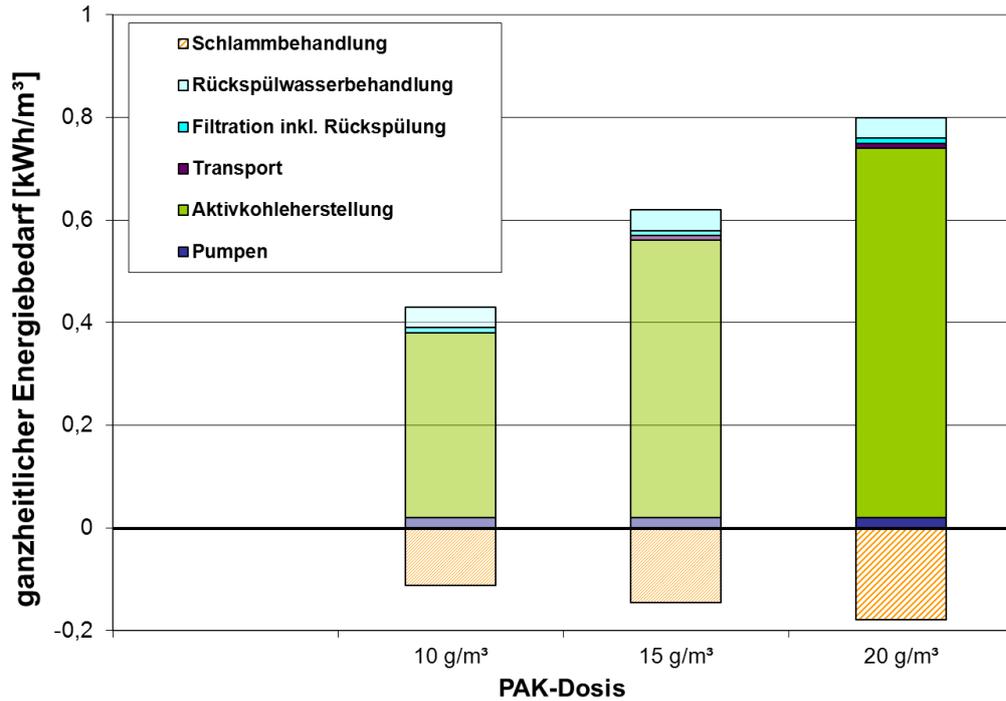
Analog zur Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken wird bei der Betrachtung des ganzheitlichen Energiebedarfs einer Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters vorgegangen. Neben dem Energiebedarf auf der Kläranlage, der in Kapitel 2.2.2 vorgestellt wurde, wird der Energiebedarf für die Herstellung und den Transport der Aktivkohle berücksichtigt. In Bild 5-10 sind die Szenarien für Dosiermengen zwischen 10 und 20 g/m³ dargestellt.



**Bild 5-10: Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters in Abhängigkeit der PAK-Dosis**

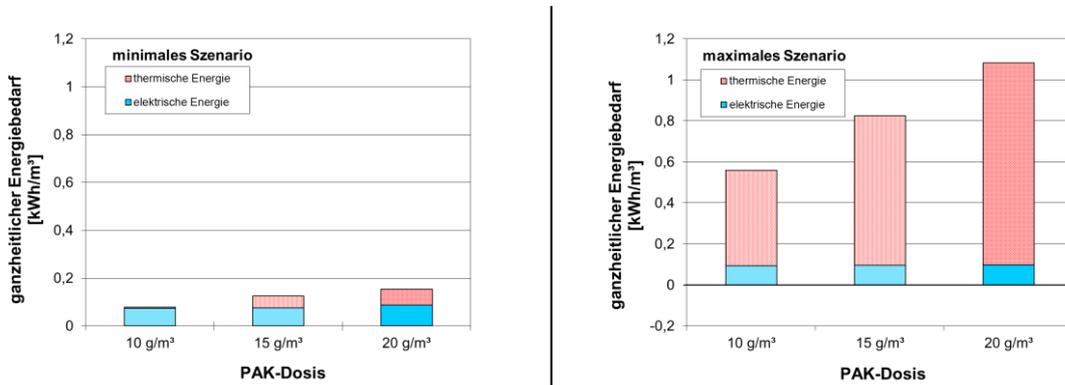
Die Werte für den ganzheitlichen Energiebedarf bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters liegen zwischen 0,08 kWh/m³ und 1,08 kWh/m³, wobei der Anteil für elektrische Energie bei 0,07 bis 0,09 kWh/m³ (zwischen 9 und über 94 %) und der Anteil für thermische Energie (inklusive Transport) bei 0,005 bis 0,99 kWh/m³ liegt. Der Anteil für Herstellung und Transport der Aktivkohle liegt zwischen 73 % und 92 % des Energiebedarfs, wenn der thermische Energiegewinn auf der Kläranlage aus der Schlammbehandlung nicht berücksichtigt wird. Wird dieser berücksichtigt, ist der Anteil von Herstellung und Transport noch größer.

In Bild 5-11 ist der ganzheitliche Energieverbrauch auf die einzelnen Positionen aufgeteilt. Es wird deutlich, wie stark die Herstellung der Aktivkohle den ganzheitlichen Energieverbrauch dominiert. Allerdings verbirgt sich dahinter größtenteils thermische Energie. Variiert wurde nur die PAK-Dosis, während die anderen Werte im Mittel angesetzt wurden.



**Bild 5-11: Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters in Abhängigkeit der PAK-Dosis**

In Bild 5-12 wird für das minimale (links) und maximale Szenario (rechts) einer Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters noch mal zwischen thermischer und elektrischer Energie unterschieden.



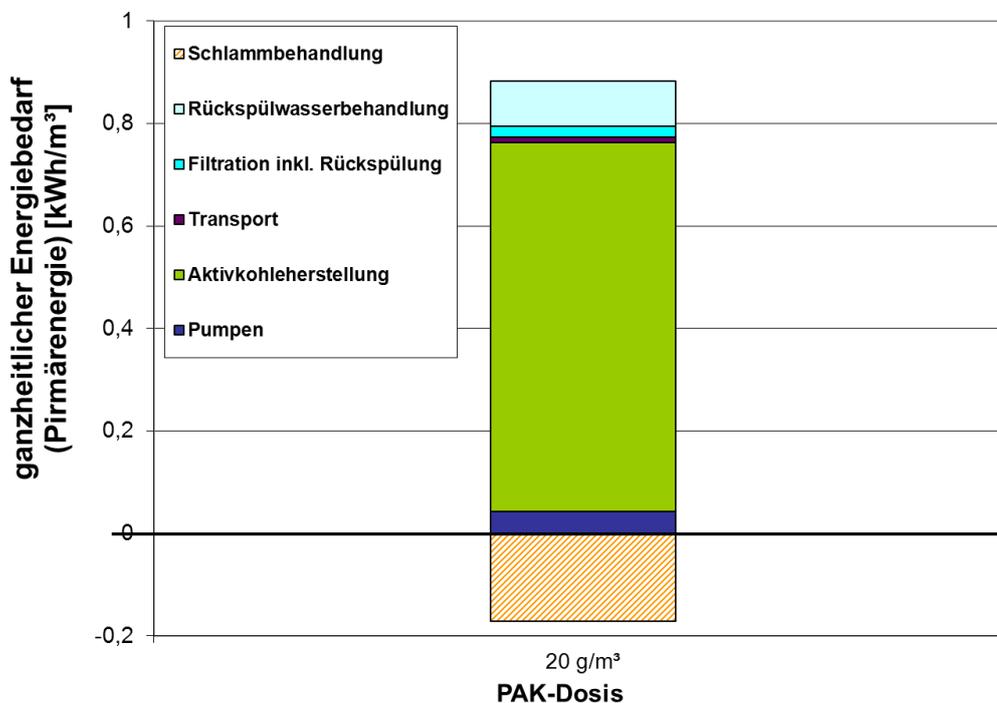
**Bild 5-12: Elektrischer und thermischer Energiebedarf bei Zugabe von PAK in den Flockungsraum eines Filters für das minimale bzw. maximale Szenario**

5.2.2.2 Neue Erkenntnisse und Vergleich mit den großtechnischen Anlagen

Die untersuchte großtechnische Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen wird mit einem Mehrverbrauch an Strom auf der Kläranlage von ca. 0,02-0,03 kWh/m³ im Vergleich zur konventionellen Filtrationsanlage festgehalten (vgl. 4.1.4). Diese Werte liegen etwas niedriger als das minimale Szenario aus Phase I, berücksichtigen jedoch auch nur den Mehrbedarf an Energie und nicht den Energiebedarf der eigentlichen, bereits vorhandenen Filtration. In Wuppertal führten die hier aufgeführten Dosiermengen auch zu einer zufriedenstellenden Elimination der Spurenstoffe. Bei einer Konzentration von

20 g/m<sup>3</sup> PAK in Verbindung mit einer Fällmitteldosierung von 0,1-0,2 g Fe/g PAK, war die spezifische Beladung der Kohle am höchsten [BORNEMANN ET AL., 2012], weswegen die anderen betrachteten Dosiermengen entsprechend transparent dargestellt sind.

Die Umrechnung auf Primärenergie wird an dieser Stelle für die Komponenten des Strombedarfs durchgeführt und ist in Bild 5-13 für die Dosiermenge 20 g PAK/m<sup>3</sup> beim mittleren Szenario dargestellt. Da der größte Anteil am ganzheitlichen Energieverbrauch bei der Adsorption an PAK durch die Aktivkohleherstellung bewirkt wird, ergeben sich hier keine großen Unterschiede. Der Primärenergiebedarf liegt bei 0,88 kWh/m<sup>3</sup>, der zusätzliche Energiegewinn durch Schlammverbrennung liegt bei 0,17 kWh/m<sup>3</sup>. Die Aktivkohleherstellung und der Transport werden nicht umgerechnet, da hier (zum überwiegenden Teil) thermische Energie benötigt wird. Für die Schlammbehandlung wird der Strombedarf auf Primärenergie umgerechnet, der überwiegende Anteil ist jedoch dem Energiegewinn aus der Verbrennung zuzuschreiben. Erneut muss hier auf die unsichere Datenbasis hinsichtlich der Aktivkohleherstellung hingewiesen werden.



**Bild 5-13: Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Zugabe von PAK in den Flockungsfilter für 20 g/m<sup>3</sup> PAK inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom**

### 5.2.3 Filtration über GAK

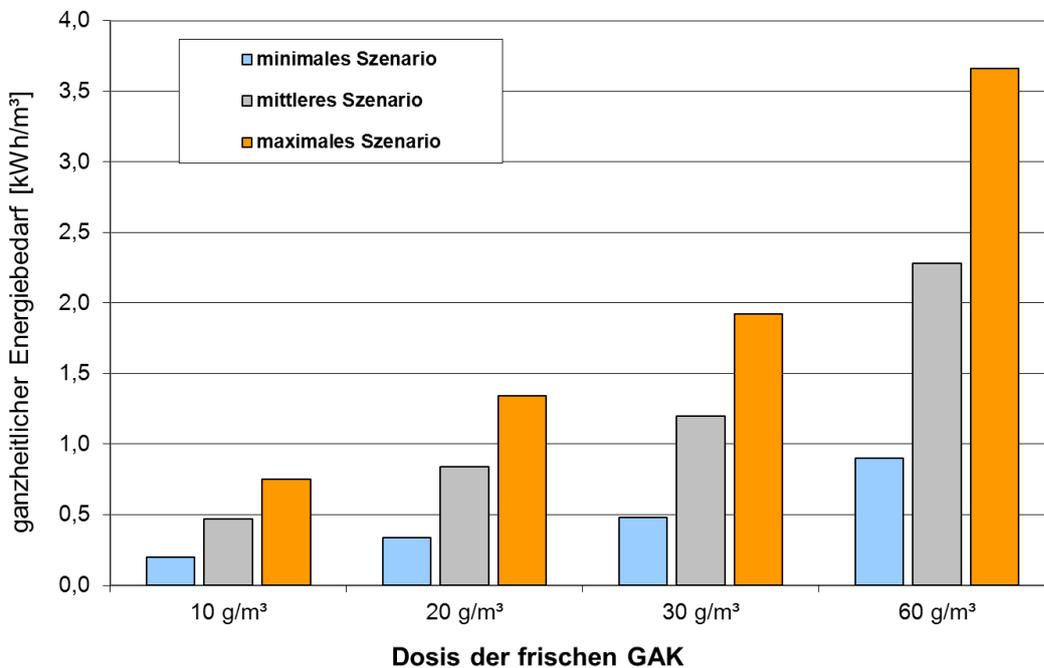
#### 5.2.3.1 Ergebnisse aus Phase I

Ebenfalls ist für die Betrachtung des ganzheitlichen Energiebedarfs einer Filtration über GAK neben dem Energiebedarf auf der Kläranlage, der in Kapitel 2.2.3 vorgestellt wurde, der Energiebedarf für die Herstellung und den Transport der Aktivkohle zu berücksichtigen. Alternativ kann die Aktivkohle auch regeneriert werden. Der Energiebedarf bei der Regeneration der Kohle ist wesentlich niedriger als bei der Herstellung von frischer Kohle. Bei der Herstellung und Regeneration von GAK wird hauptsächlich thermische

Energie in Form von Gas und Dampf eingesetzt. Der Bedarf an elektrischer Energie ist je nach Verfahren klein bis vernachlässigbar. Für die folgenden Darstellungen sind beide Energieformen zunächst zusammengefasst.

Für die Herstellung von GAK wurden 13,7 kWh/kg [BAYER ET AL., 2005], 57,9 kWh/kg [MEIER, 1997] und der Mittelwert von 35,8 kWh/kg für die Berechnungen angesetzt. Der Transport wurde per Schiff mit Angaben von BAUMANN UND TILLMANN (2004) angenommen.

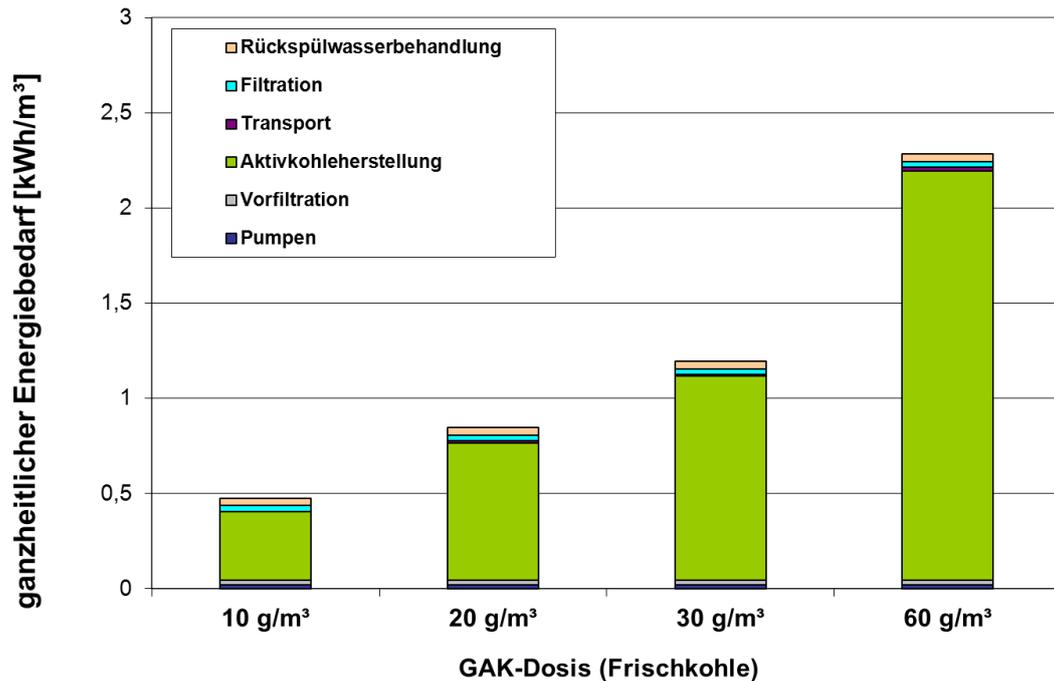
Um einen Vergleich mit den anderen Verfahren zu ermöglichen, wurde die äquivalente GAK-Dosis aus der Masse an GAK im Filterbett und dem über die Laufzeit des Filters filtrierten Abwasservolumen ermittelt. Die ermittelten Dosierungen liegen zwischen 10 und 60 g/m<sup>3</sup>. Für den Bezug auf Bettvolumina wird auf Tabelle 5-2 verwiesen. Die Szenarien zu diesen Werten sind in Bild 5-14 zu sehen.



**Bild 5-14: Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf (elektrisch und thermisch) bei Filtration über frische GAK**

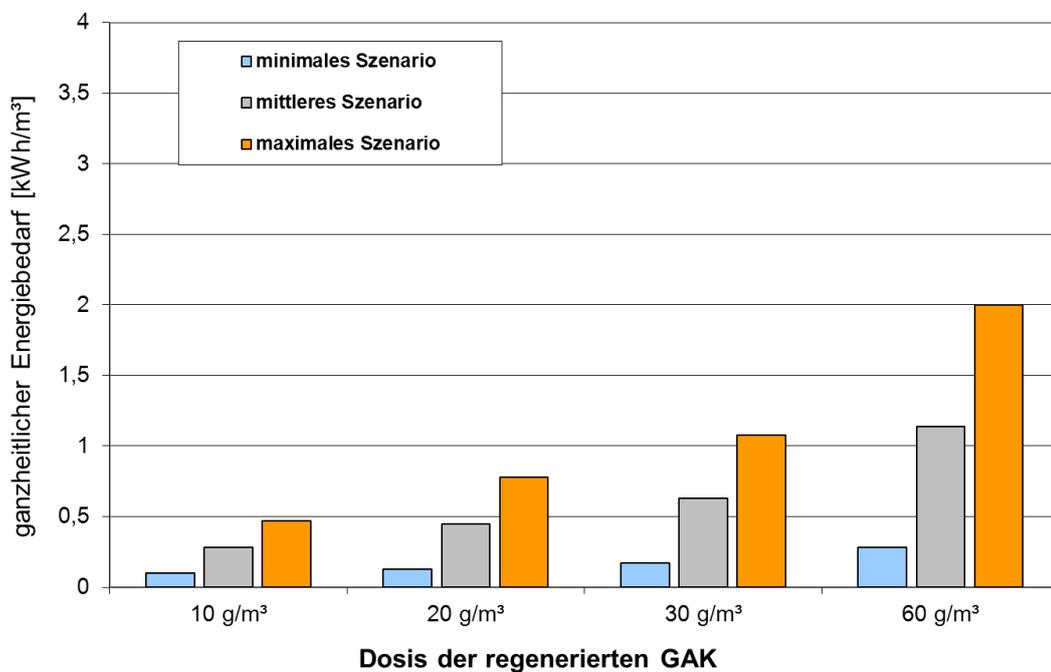
Die Werte für den ganzheitlichen Energiebedarf einer nachgeschalteten Filtration über frische GAK liegen zwischen 0,20 kWh/m<sup>3</sup> und 3,66 kWh/m<sup>3</sup>, wobei der Anteil für elektrische Energie bei 0,08 bis 0,17 kWh/m<sup>3</sup> (zwischen 5 und 40 %) und der Anteil für thermische Energie (inklusive Transport) bei 0,12 bis 3,49 kWh/m<sup>3</sup> liegt. Der Anteil für Herstellung und Transport der GAK liegt zwischen 70 % und 95 %.

In Bild 5-15 ist der ganzheitliche Energiebedarf beim mittleren Szenario auf die einzelnen Positionen aufgeteilt. Es wird deutlich, wie die Herstellung der Aktivkohle den ganzheitlichen Energiebedarf dominiert. Allerdings verbirgt sich dahinter zum größten Teil thermische Energie.



**Bild 5-15:** Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Filtration über frische GAK

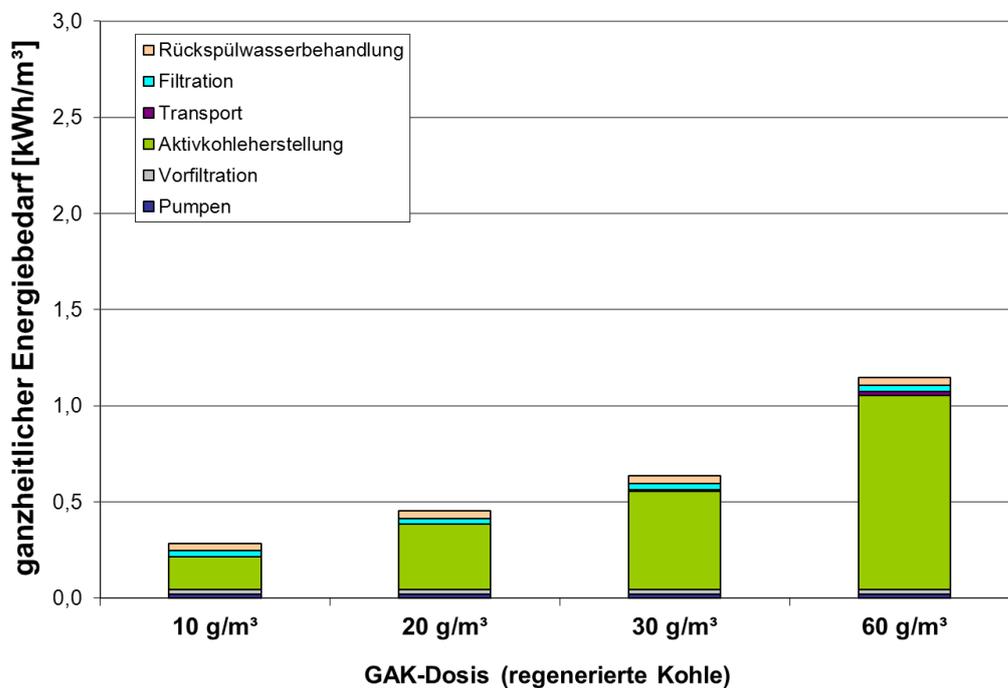
Für die Regeneration (inkl. Transport) der Aktivkohle werden 3,5 kWh/kg [MUÑOZ, 2006 nach HUTCHINS, 1975], 30,3 kWh/kg [MEIER, 1997] bzw. der Mittelwert 16,9 kWh/kg für die Berechnungen angesetzt. Die ermittelten Szenarien sind in Bild 5-16 dargestellt.



**Bild 5-16:** Minimaler, mittlerer und maximaler ganzheitlicher Energiebedarf (elektrisch und thermisch) bei Filtration über regenerierte GAK

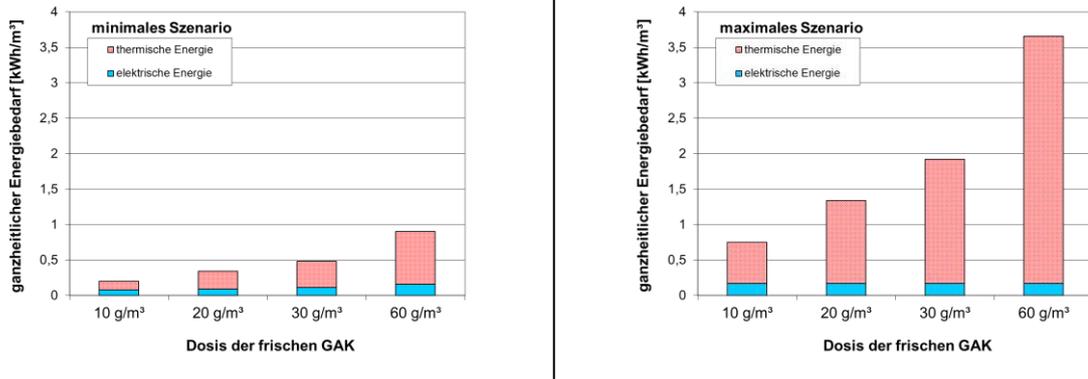
Die Werte liegen mit 0,1 kWh/m<sup>3</sup> bis 2,0 kWh/m<sup>3</sup> nur bei 37 % bis 69 % der Werte, die bei der ganzheitlichen Betrachtung der frischen GAK anfallen. Der Anteil für elektrische Energie liegt bei 0,06 bis 0,17 kWh/m<sup>3</sup> (zwischen 8,5 und 60 %) und der Anteil für thermische Energie bei 0,04 bis 1,83 kWh/m<sup>3</sup>. Für die Regeneration der Aktivkohle fällt nur thermische Energie an, dies ist auch der einzige thermische Anteil in der Prozesskette, daher liegt der Anteil für die Regeneration der Aktivkohle zwischen 40 % und 91,5 %.

In Bild 5-17 ist der ganzheitliche Energiebedarf beim mittleren Szenario auf die einzelnen Positionen aufgeteilt. Auch hier dominiert die Regeneration der Aktivkohle den ganzheitlichen Energiebedarf, wobei sich dahinter ausschließlich thermische Energie verbirgt.

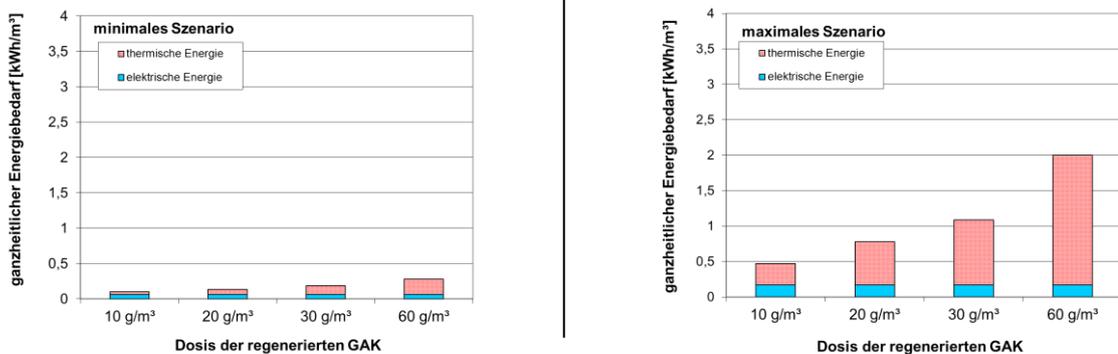


**Bild 5-17: Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Filtration über regenerierte GAK**

In den folgenden Darstellungen wird für das minimale und maximale Szenario der frischen (Bild 5-18) und der regenerierten (Bild 5-19) Aktivkohle noch mal zwischen thermischer und elektrischer Energie unterschieden.



**Bild 5-18: Elektrischer und thermischer Energiebedarf einer Filtration über frische GAK für das minimale bzw. maximale Szenario**



**Bild 5-19: Elektrischer und thermischer Energiebedarf einer Filtration über regenerierte GAK für das minimale bzw. maximale Szenario**

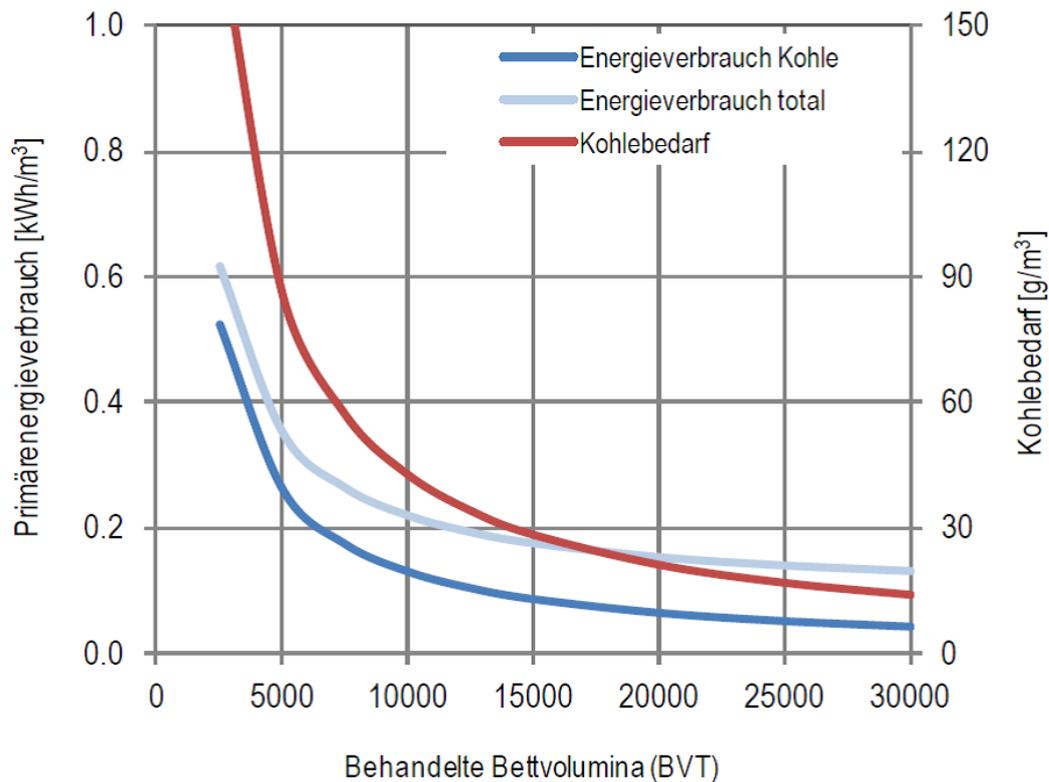
### 5.2.3.2 Neue Erkenntnisse und Vergleich mit den großtechnischen Anlagen

Bei der Bewertung des ganzheitlichen Energieverbrauchs ergibt sich die Schwierigkeit der Standzeit der Filtrationsanlagen, also der durchgesetzten Bettvolumina (BVT, m<sup>3</sup> behandelte Wassermenge/m<sup>3</sup> Aktivkohle) bis die Kohle ausgetauscht werden muss. Wohingegen bei der Ozonung und der Adsorption an PAK die Dosiermenge unmittelbar aus dem Verfahren hervorgeht, muss bei der Aktivkohlefiltration zunächst ein Ausbaurkriterium für die Kohle festgelegt werden. Hier können unterschiedliche Parameter, wie einzelne Spurenstoffe oder der CSB, und Rückhaltskriterien (Eliminationsgrade, Ablaufkonzentrationen) gewählt werden, ein eindeutiges Kriterium existiert jedoch (bisher) nicht. In BENSTÖM ET AL. (2014) werden beispielsweise die erreichbaren Bettvolumina der in Düren untersuchten drei GAK (vgl. Kapitel 3.5) für unterschiedliche Kriterien zum Ausbau angegeben. Die erreichbaren Bettvolumina sind hierbei stark von der jeweiligen Kohle und von dem jeweiligen Abbruchkriterium abhängig.

In ABEGGLEN UND SIEGRIST (2012) wird der Energieverbrauch und Kohlebedarf basierend auf den Grundlagen der Dimensionierung der Kläranlage Lage aufgeführt, siehe Bild 5-20. Hier wird bei einem Primärenergiebedarf von 110 MJ/kg Kohle (entsprechend 30,6 kWh/kg, also im Bereich des mittleren Szenarios aus Phase I) ab einer durchgesetzten Wassermenge von 5.000 BVT festgestellt, dass aufgrund der Möglichkeit

zur Regeneration die GAK energetisch günstiger als die nicht regenerierbare PAK ist. Der entsprechende spezifische Kohlebedarf liegt hier bei ca. 50 g/m<sup>3</sup> Abwasser und sinkt mit steigenden Bettvolumina. Die Regeneration wurde hier nach ESSER-SCHMITTMANN (2008) als nahezu energieneutral angesetzt. Diese Aussage ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet, da die Werte für die Herstellung der Kohle mit einer Unsicherheit verbunden sind, und auch der Spurenstoffrückhalt des Regenerats nicht vorhergesagt werden kann. Für die Reaktivierung werden bei der Berechnung 10 % Make-up Kohle angenommen.

**Bild 5-20: Primärenergiebedarf und Kohlebedarf eines GAK-Filters in Abhängigkeit der Filterstandzeit, ausgedrückt in Bettvolumina [BVT] [ABEGGLEN UND SIEGRIST, 2012]**



2012]

Weiterhin ist zwischen Regeneration (Desorption der adsorbierten Stoffe und Freilegung der Poren) und Reaktivierung (Schaffung neuer Poren) zu unterscheiden); letzteres Verfahren ist im Vergleich zur Regeneration deutlich energieintensiver. Da die hier verwendeten Werte zur Regeneration keine genaue Verfahrensbeschreibung beinhalten, können Divergenzen bei den Werten auch auf möglicherweise unterschiedliche Aufbereitungstechniken zurückzuführen sein. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass bei höheren durchgesetzten BVT die Möglichkeit der Regeneration nicht unbedingt mehr gegeben ist, da es sein kann, dass die Kohle dann vollständig erschöpft ist [NAHRSTEDT, 2014].

Für die untersuchten großtechnischen Anlagen wird ebenfalls unter Anbetracht der erreichbaren Bettvolumina die spezifische Dosiermenge an GAK ermittelt. Für die Kläranlage Düren-Merken wird dies jedoch nicht durchgeführt, da die Ergebnisse der dort großtechnisch untersuchten Filter aufgrund des hohen AFS-Gehaltes im Zulauf hinsichtlich der erzielbaren BVT nicht übertragbar sind [BENSTÖM ET AL., 2014]<sup>5</sup>.

In Tabelle 5-2 sind die ermittelten spezifischen Aktivkohledosierungen für die unterschiedlichen GAK-Filter auf dem Klärwerk Obere Lutter und in Gütersloh-Putzhagen aufgeführt. In dieser Laufzeit (5 Monate) wurden bei den Versuchen ca. 45 % des CSB zurückgehalten. Ein Rückhalt von Spurenstoffen wie Carbamazepin und Diclofenac wird durch Extrapolation der Versuchsergebnisse jedoch bis 20.000 BVT angenommen [NAHRSTEDT ET AL. 2013B].

Die sich aufgrund der Kohleschüttungen ergebenden Kohledosierungen liegen zwischen 33 und 57 g/m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser. Damit liegen die Werte in den oberen Dosiermengen aus Phase I. Umso mehr Bettvolumina bis zum Ausbau der Kohle durchgesetzt werden können, desto geringer ist die Dichte der spezifischen Kohledosierung. So ergäben sich für durchgesetzte 20.000 BVT in Gütersloh-Putzhagen beispielsweise spezifische Dosiermengen von 15 g/m<sup>3</sup> für den GA1 und 20 g/m<sup>3</sup> für den GA2, die sich entsprechend in die Werte aus Phase I eingliedern.

**Tabelle 5-2: Ausbaukriterien, ausgedrückt in BVT, für die Kläranlagen Obere Lutter und Gütersloh-Putzhagen und spezifische Aktivkohledosierung**

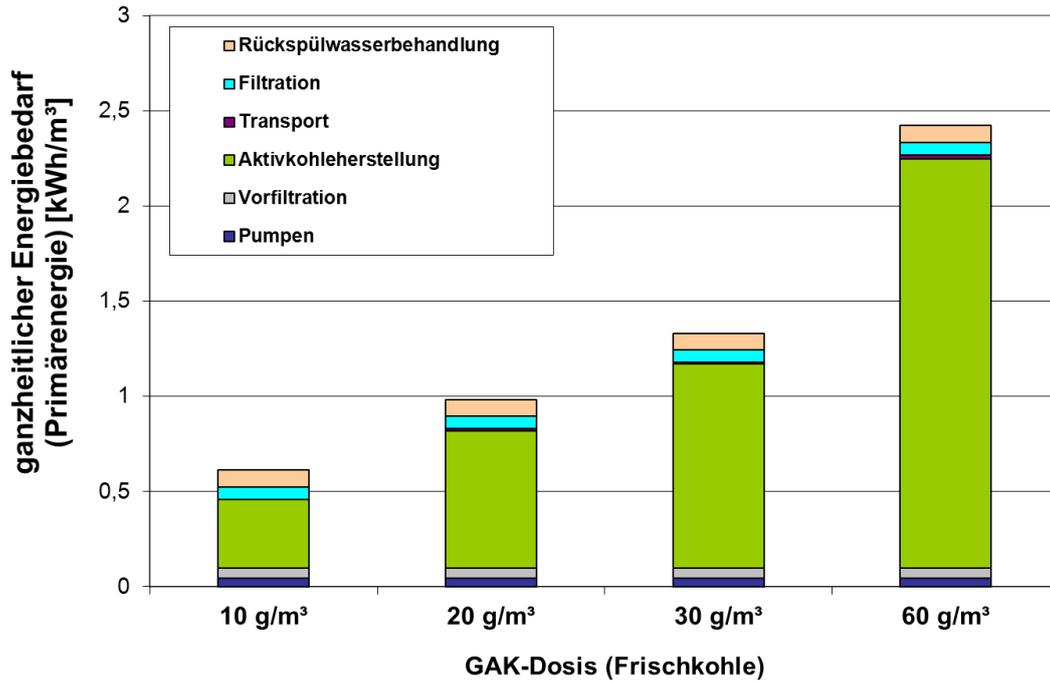
	<b>BVT Ausbau- kriterium [m<sup>3</sup> Wasser/m<sup>3</sup> GAK]</b>	<b>Schüttdichte Kohle [kg/m<sup>3</sup> GAK]</b>	<b>spez. Kohle- dosierung [g GAK/m<sup>3</sup> Wasser]</b>
<b>Obere Lutter GA3</b>	7.000	300	<b>43</b>
<b>Obere Lutter GA4</b>	9.000	300	<b>33</b>
<b>Obere Lutter GA5</b>	6.000	303	<b>51</b>
<b>Gütersloh- Putzhagen GA 1</b>	7.000	300	<b>43</b>
<b>Gütersloh- Putzhagen GA 2</b>	7.000	400	<b>57</b>

In Abhängigkeit der durchsetzbaren Bettvolumina können die spezifischen Kohledosiermengen im oberen Bereich der Dosiermengen aus Phase I von 30-60 g/m<sup>3</sup> Abwasser angesetzt werden. Je nach Abbruchkriterium können jedoch deutlich längere

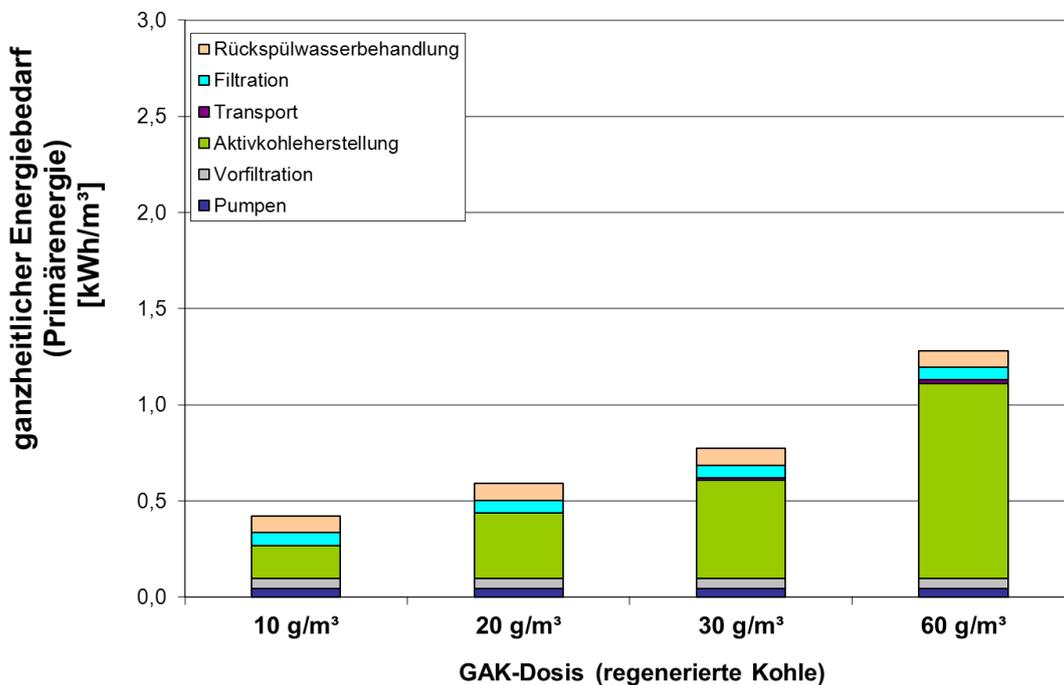
<sup>5</sup>Versuche mit einer dem Filter nachgeschalteten Adsorption in Düren zeigen aber, dass die Aktivkohlefiltration mit einer GAK feinerer Körnung bei einem weitgehend feststofffreiem Abwasser betrieblich möglich ist und die erreichbaren Bettvolumina auch durch eine höhere Kontaktzeit erhöht werden können [BENSTÖM ET AL., 2014].

Standzeiten, sprich höhere Bettvolumina, angenommen werden, die zu Dosiermengen von 15-20 g/m<sup>3</sup> Abwasser führen. Demnach können die Dosiermengen der Phase I weiterhin betrachtet werden.

Die Umrechnung auf Primärenergie wird an dieser Stelle für die Komponenten des Strombedarfs durchgeführt und ist in Bild 5-13 für die unterschiedlichen Dosiermengen von 10 bis 60 g/m<sup>3</sup> beim mittleren Szenario dargestellt. Da der größte Anteil am ganzheitlichen Energieverbrauch bei der Filtration über GAK durch die Aktivkohleherstellung bewirkt wird, ergeben sich hier keine großen Unterschiede. Der mittlere Primärenergiebedarf liegt zwischen 0,62 und 2,43 kWh/m<sup>3</sup> für frische GAK sowie zwischen 0,42 und 1,42 kWh/m<sup>3</sup> für regenerierte/reaktivierte GAK.



**Bild 5-21:** Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Filtration über frische GAK in Abhängigkeit der GAK-Dosis inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom



**Bild 5-22:** Aufteilung des ganzheitlichen Energiebedarfs (elektrisch und thermisch) bei Filtration über regenerierte GAK in Abhängigkeit der GAK-Dosis inklusive Umrechnung auf Primärenergie für Strom

### 5.3 Diskussion

Tabelle 5-3 fasst die ermittelten Werte für den ganzheitlichen Energiebedarf beim mittleren Szenario für die eingegrenzten Dosiermengen zusammen. Im Vergleich zu Phase I wurde hier der Energiebedarf, der dem Stromverbrauch zuzuschreiben ist, auf Primärenergie umgerechnet.

Damit 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 ist aufgrund der hohen „Dosiermengen“ der Filtration über frische GAK zuzuordnen. Deutliche Einsparungen können durch die Verwendung von Regenerat/Reaktivat 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.

An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass die Werte für die Aktivkohleherstellung weiterhin mit sehr großen Unsicherheiten zu betrachten sind und diese Werte nicht als Absolutwerte zu betrachten sind. Weiterhin wird bei der Aktivkohlenutzung ein Rohstoff (Kohle) genutzt, der selbst anderwärtig als Energielieferant genutzt werden könnte. Dieser Aspekt wurde an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da keine genauen Rohstoffe für die Aktivkohle bekannt sind und so kein konkreter Wert für die Energie festgehalten werden kann.

**Tabelle 5-3: Spezifischer ganzheitlicher Primärenergiebedarf der unterschiedlichen Verfahren zur Spurenstoffelimination**

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

## 6 CO<sub>2</sub>-Bilanzen

In Phase I wurden CO<sub>2</sub>-Bilanzen für eine nachgeschaltete Ozonung und eine Zugabe von PAK aufgestellt. Hierbei wurden der Energieverbrauch auf der Kläranlage, die Herstellung und der Transport der Inputstoffe und der Bau der Infrastruktur berücksichtigt.

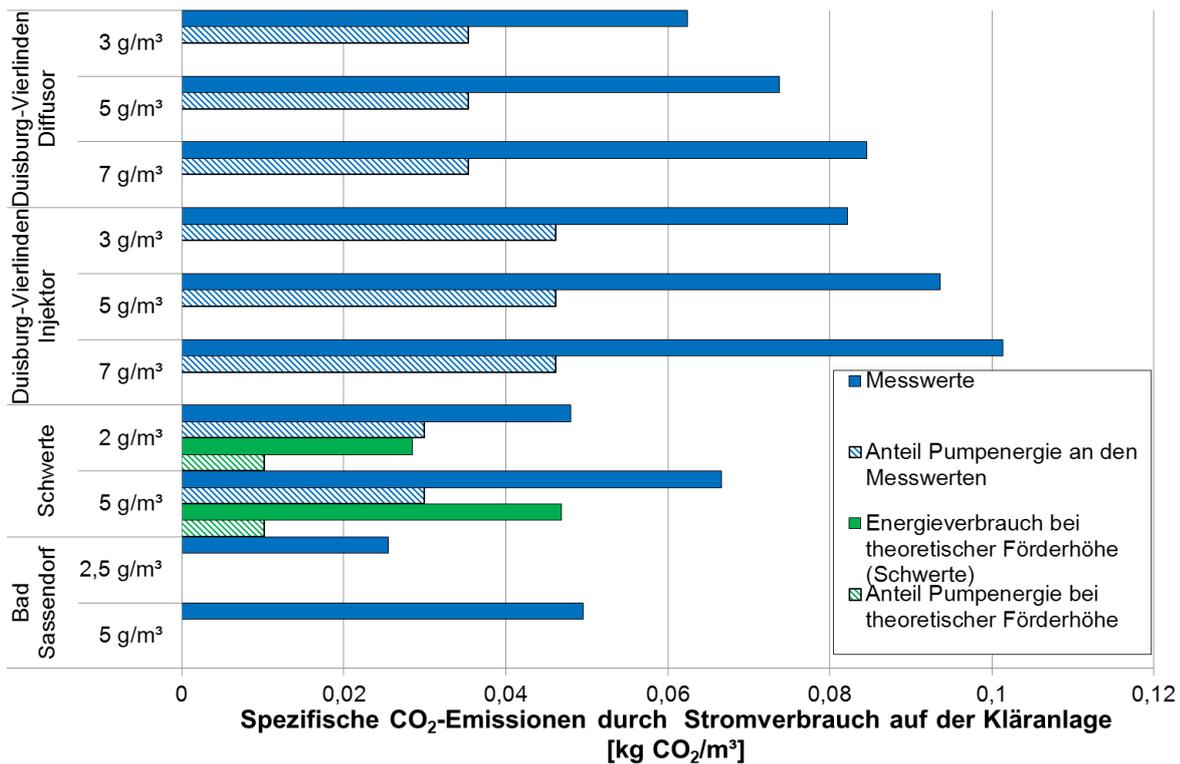
Der Energieverbrauch auf der Kläranlage konnte durch die Datenauswertung großtechnischer Anlagen aktualisiert werden. Für die anderen Komponenten ergeben sich, bis auf Ausnahme der Aktivkohleherstellung, keine neuen Erkenntnisse.

Der aus dem Strombedarf auf der Kläranlage resultierende CO<sub>2</sub>-Ausstoß kann mittels des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes des in Deutschland verwendeten Strommixes berechnet werden. In Phase I wurden hierfür 0,6 kg CO<sub>2</sub>/kWh [UMWELTBUNDESAMT, 2010] angesetzt. Im Zeitraum von 1990 bis 2010 ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Erzeugung einer Kilowattstunde Strom für den Endverbrauch ohne Berücksichtigung des Stromhandelssaldos um 26 % auf 0,546 kg CO<sub>2</sub>/kWh gesunken. Die vorläufigen Daten für 2011 ergeben 0,564 kg CO<sub>2</sub>/kWh und die Hochrechnungen für 2012 0,576 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Dieser Wiederanstieg ist trotz der massiven Förderung erneuerbarer Energien dem erhöhten Einsatz fossiler Brennstoffe zur Stromerzeugung zuzuschreiben. Wird der reine Strominlandsverbrauch betrachtet, liefern die Hochrechnungen für 2012 einen Wert von 0,601 kg CO<sub>2</sub>/kWh [UMWELTBUNDESAMT, 2013]. Deswegen wird an dieser Stelle weiterhin mit 0,6 kg CO<sub>2</sub>/kWh gerechnet.

### 6.1 CO<sub>2</sub>-Bilanz für eine nachgeschaltete Ozonung

#### 6.1.1 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der auf der Kläranlage benötigten Energie

Die Emissionen, die sich durch die auf der Kläranlage benötigte Energie (reiner Strombedarf) aus den in Kapitel 4 ausgewerteten großtechnischen Anlagen ergeben, sind in Bild 6-1 für die unterschiedlichen applizierten Dosiermengen an Ozon aufgeführt.



**Bild 6-1:** Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Stromverbrauch [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>] auf der Kläranlage der untersuchten großtechnischen Ozon-Anlagen

Zum Vergleich sind in Tabelle 6-1 die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen einer nachgeschalteten Ozonstufe aus der auf der Kläranlage benötigten Energie (reiner Strombedarf aus Phase I) (vgl. Bild 2-1) für die ausgewählten Dosiermengen an Ozon von 2,5 bis 7,5 g/m<sup>3</sup> aufgeführt.

**Tabelle 6-1:** CO<sub>2</sub>-Emissionen einer nachgeschalteten Ozonstufe aus der auf der Kläranlage benötigten Energie

	Ozondosis [g/m <sup>3</sup> ]		
	2,5	5,0	7,5
CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der auf der Kläranlage benötigten Energie [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]			
minimale Emissionen	0,01	0,03	0,04
mittlere Emissionen	0,05	0,08	0,10
maximale Emissionen	0,08	0,12	0,15

Die aus den ausgewerteten großtechnischen Anlagen berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen im Bereich zwischen ca. **0,02 und 0,1 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>** behandeltem Abwasser. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen bei höheren Dosiermengen an Ozon an. Die in Phase I ermittelten Werte decken sich aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Energieverbrauch und Emission auch hier mit den ermittelten Werten der großtechnischen Anlagen.

### 6.1.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Herstellung und Transport der Inputstoffe

Für den ganzheitlichen Energiebedarf wurden neben der auf der Kläranlage benötigten Energie die Herstellung und der Transport des Reinsauerstoffes berücksichtigt. Dies erfolgt nun auch für die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Herstellung des Reinsauerstoffes werden über den CO<sub>2</sub>-Ausstoß beim deutschen Strommix angesetzt (0,6 kg CO<sub>2</sub>/kWh [UMWELTBUNDESAMT, 2010]). Dabei wird angenommen, dass die Sauerstoffgewinnung nur elektrische Energie benötigt. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß für den Transport wird mittels der Angaben aus BAUMANN UND TILMANN (2004) ermittelt, welche auch schon für den Energiebedarf beim Transport in Kapitel 5.1.1.1 als Berechnungsgrundlage dienen. Hierbei wurden 0,176 g CO<sub>2</sub>/(kg\*km) für einen kleinen LKW und kurze Distanzen (hier 100 km), 0,136 g CO<sub>2</sub>/(kg\*km) für einen mittelgroßen LKW und regionale Verteilung (hier 250 km) und 0,05 g CO<sub>2</sub>/(kg\*km) für einen großen LKW und Verteilung über große Distanzen (hier 500 km) für den Transport des Sauerstoffes mit den Verhältnissen Sauerstoff zu Ozon von 10, 12,5 und 15 kg O<sub>2</sub>/kg O<sub>3</sub> verknüpft und für die jeweiligen Dosiermengen an Ozon von 2,5 und 7,5 g/m<sup>3</sup> ein minimales, ein mittleres und ein maximales Szenario gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

**Tabelle 6-2: Für Herstellung und Transport von Inputstoffen verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einer nachgeschalteten Ozonstufe**

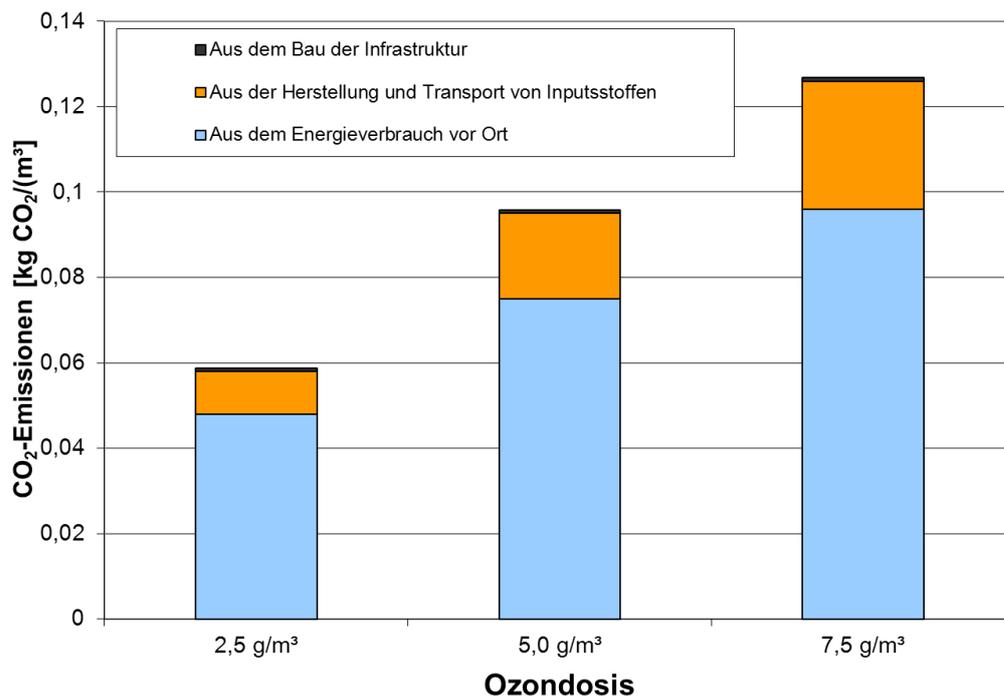
	Ozondosis [g/m <sup>3</sup> ]		
	2,5	5,0	7,5
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Herstellung des Reinsauerstoffes [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]</b>			
minimale Emissionen	0,004	0,008	0,012
mittlere Emissionen	0,009	0,018	0,027
maximale Emissionen	0,014	0,029	0,043
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Sauerstofftransport [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]</b>			
minimale Emissionen	0,000	0,001	0,001
mittlere Emissionen	0,001	0,002	0,003
maximale Emissionen	0,001	0,003	0,004
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Herstellung und Transport des Reinsauerstoffes [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]</b>			
<b>minimale Emissionen</b>	<b>0,004</b>	<b>0,009</b>	<b>0,013</b>
<b>mittlere Emissionen</b>	<b>0,010</b>	<b>0,020</b>	<b>0,030</b>
<b>maximale Emissionen</b>	<b>0,016</b>	<b>0,031</b>	<b>0,047</b>

### 6.1.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Bau der Infrastruktur

In PINNEKAMP ET AL. (2011) wurde ausführlich dargestellt, wie in Phase I des Projektes die CO<sub>2</sub>-Emission aus dem Bau der Infrastruktur mit Daten aus LARSEN ET AL. (2010) und UMWELTBUNDESAMT (2011) ermittelt wurde. Es ergab sich ein Wert von 0,8 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> was im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-Emission aus der auf der Kläranlage benötigten Energie und der Bereitstellung von Inputstoffen vernachlässigbar ist.

### 6.1.4 Summe der CO<sub>2</sub>-Emissionen für eine nachgeschaltete Ozonung

Die Summe der CO<sub>2</sub>-Emissionen einer nachgeschalteten Ozonung liegt für den Energieverbrauch vor Ort, die Herstellung und den Transport der Inputstoffe und dem Bau der Infrastruktur je nach Szenario und Ozondosis zwischen **0,017 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>** und **0,198 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>**. Für das mittlere Szenario ist eine graphische Darstellung in Bild 6-2 zu sehen. Da der Strombedarf auf der Kläranlage durch die in Phase I durchgeführten Berechnungen annähernd genau vorhergesagt werden kann, und im Falle der Ozonung ein linearer Zusammenhang zwischen Strombedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen besteht, wird an dieser Stelle auf weiterführende Berechnungen verzichtet.



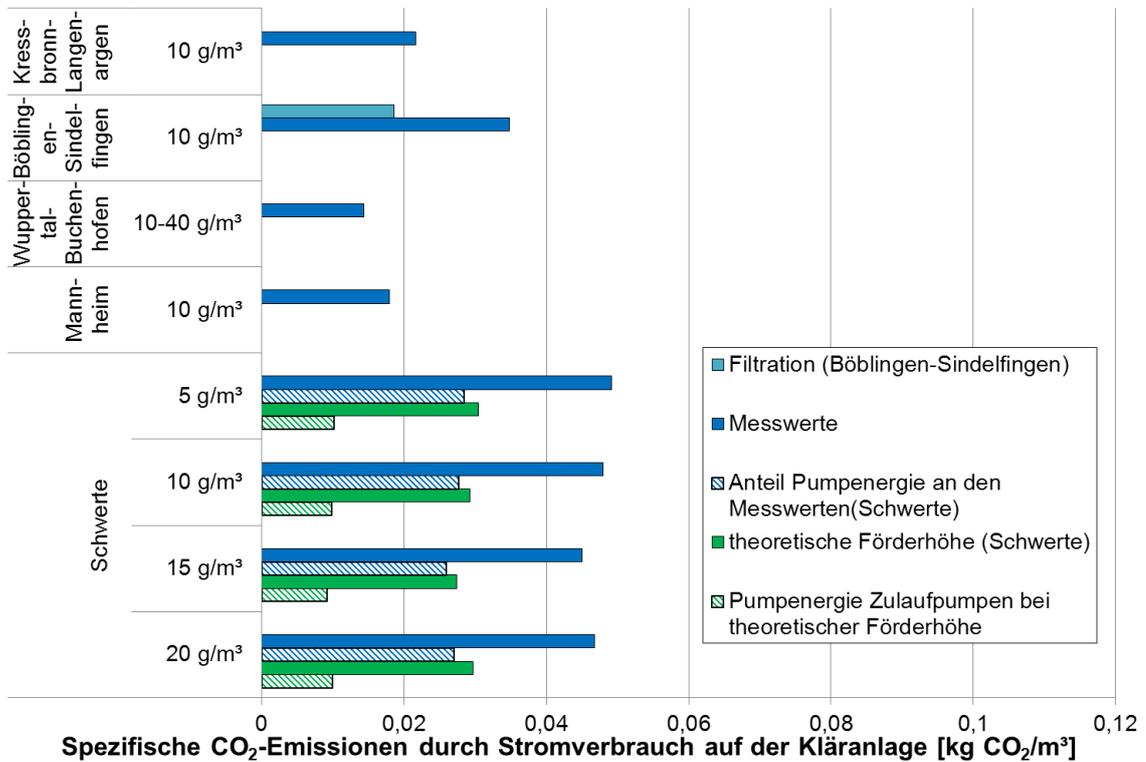
**Bild 6-2: CO<sub>2</sub>-Emissionen einer nachgeschalteten Ozonung in Abhängigkeit der Ozondosis (sonstige Bedingungen mit Mittelwerten angesetzt)**

## 6.2 CO<sub>2</sub>-Bilanz für eine PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken

### 6.2.1 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der auf der Kläranlage benötigten Energie

Die Emissionen, die sich durch die auf der Kläranlage benötigte Energie (reiner Strombedarf) aus den in Kapitel 4 ausgewerteten großtechnischen Anlagen ergeben, sind in Bild 6-3 für die unterschiedlichen applizierten Dosierungen aufgeführt. Da bei der Auswertung der großtechnischen Anlagen die Schlammbehandlung nicht berücksichtigt wurde, kann der gesamte Energieverbrauch der großtechnischen Anlagen als elektrische Energie angesetzt werden und mittels des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors des deutschen Strommixes umgerechnet werden. Zusätzlich zu der Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken ist die Zugabe in den Überstau des Flockungsfilters in Wuppertal-Buchenhofen mit aufgetragen.

Die Werte der großtechnischen Anlagen liegen im Bereich von **ca. 0,015 bis ca. 0,05 kg CO<sub>2</sub>/kg m<sup>3</sup>** Abwasser. Im Gegensatz zur Ozonung ist keine Abhängigkeit zwischen Dosiermenge und CO<sub>2</sub>-Emissionen festzustellen. Die geringfügigen Unterschiede bei den Dosiermengen in Schwerte sind darauf zurückzuführen, dass es sich um reale Messdaten handelt, die über längere Zeiträume ausgewertet wurden.



**Bild 6-3: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Stromverbrauch [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>] auf der Kläranlage der untersuchten großtechnischen PAK-Anlagen**

Zum Vergleich sind in Tabelle 6-3 die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen einer Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken aus der auf der Kläranlage benötigten Energie (Strombedarf sowie thermische und elektrische Energie bei der Schlammbehandlung aus Phase I (vgl. Bild 2-1) aufgeführt.

**Tabelle 6-3: CO<sub>2</sub>-Emissionen einer PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken aus der auf der Kläranlage benötigten Energie**

	PAK-Dosis [g/m <sup>3</sup> ]		
	10	15	20
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der auf der Kläranlage benötigten Energie [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]</b>			
minimale Emissionen	0,012	0,012	0,012
mittlere Emissionen	0,045	0,045	0,045
maximale Emissionen	0,078	0,078	0,078
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Schlammbehandlung (thermische und elektrische Energieformen berücksichtigt) [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]</b>			
Emissionen	0,010	0,013	0,018
<b>Summe der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der auf der Kläranlage benötigten Energie, inkl. Schlammbehandlung [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]</b>			
minimale Emissionen	0,025	0,030	0,034
mittlere Emissionen	0,058	0,063	0,067
maximale Emissionen	0,091	0,096	0,100

Auch hier können die Literaturwerte eine ausreichend präzise Vorhersage leisten, weswegen auf weitere Berechnungen verzichtet wird.

### 6.2.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Herstellung und Transport der Inputstoffe

Für den ganzheitlichen Energiebedarf wurden neben der auf der Kläranlage benötigten Energie die Herstellung und der Transport der Aktivkohle berücksichtigt. Dies erfolgt nun auch für die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch die Herstellung der Fäll- und Flockungsmittel kann demgegenüber vernachlässigt werden [PINNEKAMP ET AL., 2011].

In PINNEKAMP ET AL. (2011) wurde der CO<sub>2</sub>-Ausstoß für ein niedriges Szenario zu 3,9 kg CO<sub>2</sub>/kg und für ein hohes Szenario zu 13,3 kg CO<sub>2</sub>/kg ermittelt. Mit den gewählten Dosismengen ergeben sich die in Tabelle 6-4 oben aufgeführten Werte. Auf die Darstellung der in Phase I ebenfalls betrachteten Aktivkohle aus Kokosnussschalen wird an dieser Stelle verzichtet, da es noch keine Ergebnisse hinsichtlich der Eignung dieser Kohlearten zur Spurenstoffelimination aus Abwasser gibt.

**Tabelle 6-4: Für Herstellung und Transport von Inputstoffen verursachte CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einer nachgeschalteten PAK-Adsorption**

	PAK Dosis [g/m <sup>3</sup> ]		
	10	15	20
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der PAK-Herstellung und Transport [kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]</b>			
Niedriges Szenario nach Bayer et al. (2005)	0,04	0,06	0,08
Hohes Szenario nach Meier (1997)	0,13	0,20	0,27
Herstellerangabe 1	0,10	0,15	0,20
Herstellerangabe 2	0,07	0,11	0,15

In NAHRSTEDT ET AL. (2013B) wird der Carbon Footprint der auf dem Klärwerk Obere Lutter eingesetzten GAK (vgl. 6.3) erläutert. Die Pulverisierung der GAK wird wie in

Phase I und in LARSEN ET AL. (2010) als vernachlässigbar angesehen, so dass an dieser Stelle ein Abgleich der Werte des AOLs mit den Werten aus der Phase I stattfinden kann. In NAHRSTEDT ET AL. (2013B) liegen von zwei Herstellern Angaben zum Carbon Footprint der Kohleherstellung vor:

- Carbon Footprint einer für den Einsatz in Trinkwasserwerken typischen GAK: 10 kg CO<sub>2e</sub> / kg GAK
- Carbon Footprint der Herstellung einer GAK: 7,4 kg CO<sub>2e</sub> / kg GAK

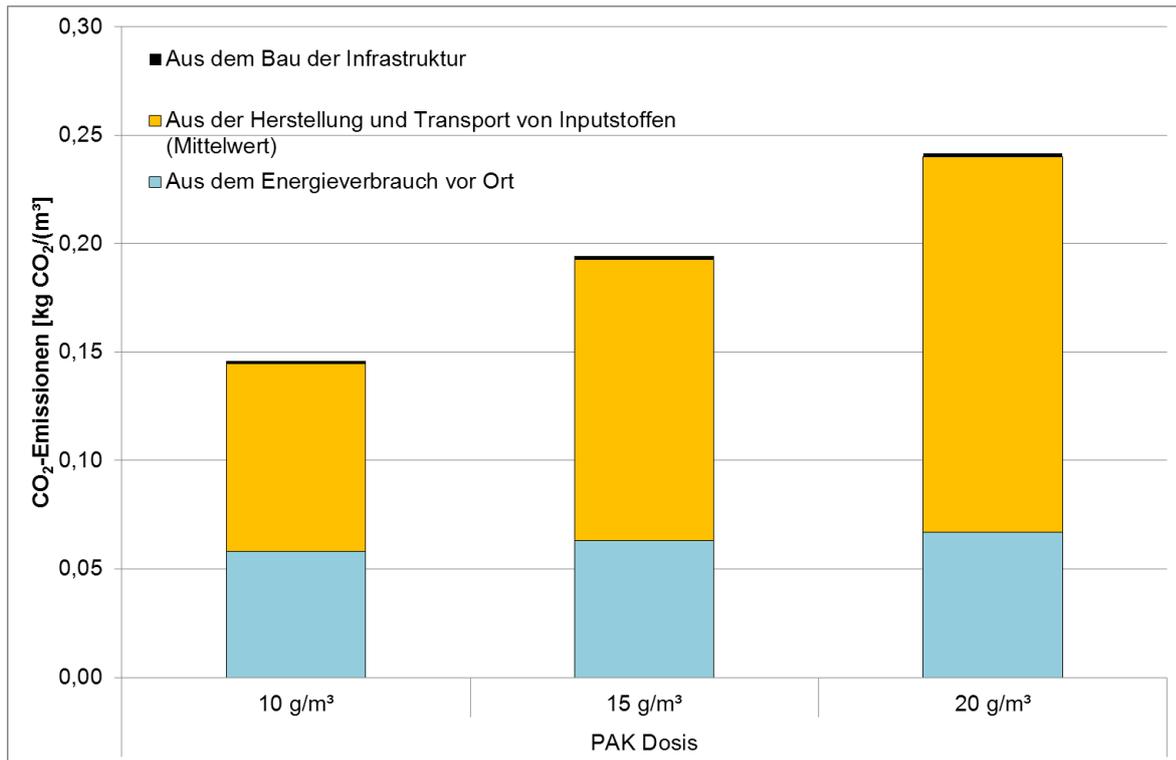
In Phase I wurden die im hohen bzw. niedrigen Szenario benötigten Rohmaterialien im Anhang IV zusammengetragen. Unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren der einzelnen Inputstoffe (Kohle, Dampf, Gas, Strom nach KNÖFEL 2008) sowie des Transports ließ sich ein spezifischer CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 13,3 kg CO<sub>2</sub>/kg Aktivkohle bei dem hohen Szenario und 3,9 kg CO<sub>2</sub>/kg Aktivkohle bei dem niedrigen Szenario berechnen. Die in NAHRSTEDT ET AL. (2013B) aufgeführten Werte reihen sich in diesen Bereichen ein. Die berechneten spezifischen CO<sub>2e</sub>-Emissionen nach den Herstellerangaben aus NAHRSTEDT ET AL. (2013B) sind ebenfalls in Tabelle 6-4 aufgeführt. Zu beachten bleibt, dass in NAHRSTEDT ET AL. (2013B) CO<sub>2</sub>-Äquivalente aufgeführt sind, wohingegen in Phase I reine CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen maßgeblich sind, und andere Treibhausgase wie N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> eine untergeordnete Rolle spielen, so dass beide verglichen werden können.

### 6.2.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Bau der Infrastruktur

Pro Kubikmeter Abwasser ergibt sich in Phase I eine spezifische CO<sub>2</sub>-Emission von ca. 0,0015 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> Abwasser mit Berücksichtigung der Becken. Sollte die PAK-Zugabe, wie in Wuppertal-Buchenhofen in den Überstau eines Filter erfolgen, würden diese Emissionen aufgrund weniger notwendiger baulichen Maßnahmen womöglich noch niedriger sein. Wie bei der Ozonung ist der Anteil an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen jedoch vernachlässigbar im Vergleich zu den Emissionen aus Energieverbrauch vor Ort und Inputstoffen.

### 6.2.4 Summe der CO<sub>2</sub>-Emissionen für eine PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken

Die Summe der CO<sub>2</sub>-Emissionen einer Zugabe von PAK in ein Kontaktbecken liegt für den Energieverbrauch vor Ort, die Herstellung und den Transport der Inputstoffe und dem Bau der Infrastruktur bei Ansetzen eines Mittelwertes für die vier Werte für die Aktivkohleherstellung und für das mittlere Szenario für den Energieverbrauch auf der Kläranlage zwischen 0,15 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> und 0,24 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Die entsprechende Aufteilung ist für unterschiedliche Dosiermengen an PAK in Bild 6-4 dargestellt. Bei Betrachtung der minimalen und maximalen Werte ergibt sich eine Bandbreite von **0,07 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> und 0,37 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>**. Da der Strombedarf der Adsorption an PAK auf der Kläranlage durch die in Phase I durchgeführten Berechnungen annähernd genau vorhergesagt werden und kann, wird an dieser Stelle auf weiterführende Berechnungen verzichtet.



**Bild 6-4:** CO<sub>2</sub>-Emissionen einer Zugabe von PAK in einem Kontaktbecken in Abhängigkeit der PAK-Dosis (sonstige Bedingungen mit Mittelwerten angesetzt)

### 6.3 Carbon Footprint der Filtration über GAK

In NAHRSTEDT ET AL (2013B) wird der Carbon Footprint (CF) der drei auf dem Klärwerk Obere Lutter untersuchten GAK (vgl. Kapitel 4.1.6) ermittelt. Die Bilanzierung erfolgt nach den Anforderungen der vier Phasen der Iso-Normen 14040 ff. anhand einer Ökobilanzierung.

Die untersuchten Adsorber sind:

- Adsorber GA3 mit Frischkohle, dynamischer Betrieb (an den Abfluss angepasst)
- Adsorber GA4 mit Frischkohle, Betrieb mit konstanter Filtergeschwindigkeit von 2 m/h
- Adsorber GA5 mit Reaktivat, Betrieb mit konstanter Filtergeschwindigkeit von 2 m/h



- Hersteller 1:
  - CF der Herstellung einer für den Einsatz in Trinkwasserwerken typischen GAK: 10 kg CO<sub>2e</sub> / kg GAK
  - Reaktivierung der erschöpften GAK einschließlich eines 10%-Anteils an Make-up-GAK: 2 kg CO<sub>2e</sub> / kg GAK
- Hersteller 2:
  - CF der Herstellung einer GAK: 7,4 kg CO<sub>2e</sub> / kg GAK
  - Reaktivierung der erschöpften GAK einschließlich eines 10%-Anteils an Make-up-GAK: 2,75 kg CO<sub>2e</sub> / kg GAK

Die Bilanzierung wurde mit den zweiten Herstellerangaben durchgeführt, da diese Kohle auf dem Klärwerk Obere Lutter eingebaut ist. Anstelle von 10 % Make-up Kohle für die Reaktivierung wurden aufgrund der Bilanzierung für die gebrauchte Kohle und das Reaktivat 23 % Make-up Kohle angesetzt, was zu einem CF von 3,42 kg CO<sub>2e</sub> / kg GAK führt [NAHRSTEDT ET AL., 2013B].

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Stromverbrauch des Adsorberbetriebs beinhalten folgende Teilprozesse:

- Förderung des Abwassers aus der Nachklärung durch die Adsorber bis zum Filtratauslass (Überfallkante) der Verfahrensstufe
- Spülung der Adsorber mit Kläranlagenablauf
- Luftspülung der Adsorber
- Förderung des schlammhaltigen Spülwassers von den Adsorbern zurück zum Zwischenpumpwerk und anschließend bis zum Ablaufbauwerk
- Regelung/Steuerung der Prozesse

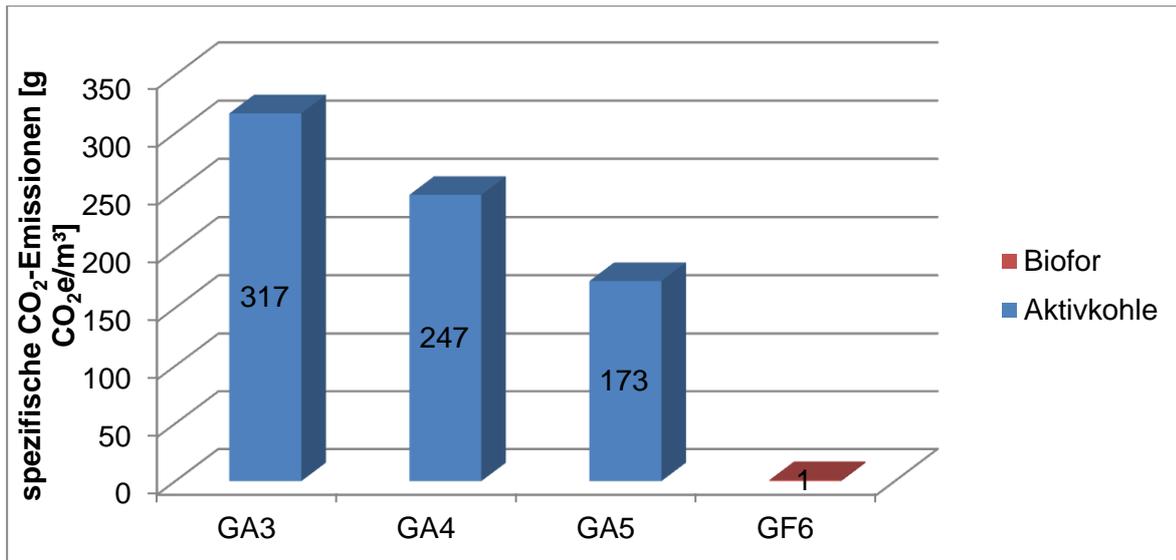
Hinzu kommt noch die Spülschlamm Entsorgung (Schlammbehandlung und -transport). Da weder Chemikalien noch sonstige Betriebsmittel für den Adsorberbetrieb notwendig sind, fließen in die CF-Bilanzierung nur die Energieverbräuche der einzelnen Teilprozesse ein. Für den Stromverbrauch werden 0,3287 kg CO<sub>2e</sub> / kWh angenommen, da 40 % des Strombedarfs durch Eigenerzeugung im BHKW (0,0058 kg CO<sub>2e</sub> / kWh) gedeckt werden können [NAHRSTEDT ET AL., 2013B].

Die entsprechenden Parameter für die Bilanzierung des CF sind in Tabelle 6-5 aufgeführt (siehe auch 4.1.6). Die drei Kohlen haben unterschiedliche Laufzeiten bis zum Erreichen der entsprechenden Sättigungsbeladung. Die Kohlefilter werden zweimal pro Woche zurückgespült, wohingegen der Biofilter 5-mal die Woche zurückgespült wird [NAHRSTEDT ET AL., 2013B].

**Tabelle 6-5: Parameter für die Bilanzierung des Carbon Footprints auf dem Klärwerk Obere Lutter (ach NAHRSTEDT ET AL., 2013B)**

	<b>GA3, Frischkohle dynamischer Betrieb</b> (mittlere Geschwindigkeit 3,6 m/h)	<b>GA4, Frischkohle konstanter Betrieb</b> (2 m/h)	<b>GA5, Reaktivat konstanter Betrieb</b> (2 m/h)	<b>GF6, Biolitfilter, kontinuierlich, dynamisch</b> (mittlere Geschwindigkeit 3,6 m/h) <b>Referenzfilter</b>
<b>Volumen Filterschüttung [m<sup>3</sup>]</b>	101	101	101	140
<b>Laufzeit pro Monat [Tage]</b>	22	22	22	30,5
<b>Laufzeit bis Erreichen Sättigungs- beladung [Monate]</b>	9,3	21,3	14,3	(9,3)
<b>Summe Adsorber- betrieb [kWh]</b>	24.363	33.033	23.028	44.628
<b>Durchgesetzte Bettvolumina [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup><sub>(GAK)</sub>]</b>	7.000	9.000	6.000	/
<b>durchgesetztes Abwasser [m<sup>3</sup>]</b>	707.000	909.000	606.000	989.800
<b>spez. Kohle- dosierung [g GAK/m<sup>3</sup> Wasser]</b>	43	33	51	/

Die berechneten spezifischen CF-Werte für die Herstellung bzw. Reaktivierung des Filtermaterials sind in Bild 6-6 dargestellt: Der höchste Carbon Footprint kommt der Frischkohle im GA3 zu; diese muss im Vergleich zur Frischkohle im GA4 schon 10 Monate früher ersetzt werden, setzt aber pro Jahr auch deutlich mehr Wasser durch. Die Adsorber GA4 und GA5 werden mit der gleichen Filtergeschwindigkeit betrieben, in GA5 befindet sich jedoch reaktivierte GAK. Die spezifischen Emissionen betragen hier 173 g CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup> im Vergleich zu 247 g CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup> bei der Frischkohle, was einer Einsparung von mehr als 30 % entspricht. Die geringeren durchgesetzten Bettvolumina bei der reaktivierten Kohle, die zu einem häufigeren Austausch der Kohle führen, schlagen hier kaum ins Gewicht. Der CF des Referenzfilters ist mit 1 g CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup> vernachlässigbar, da sich die Emissionen der Herstellung und des Transportes auf eine Standzeit von 25 Jahren verteilen [NAHRSTEDT ET AL., 2013B].



**Bild 6-6: Spezifischer Carbon Footprint der Herstellung bzw. Reaktivierung des Filtermaterials [nach NAHRSTEDT ET AL., 2013B]**

Die Treibhausgasemissionen, die durch den Betrieb des Adsorberbetriebs (Stromverbrauch)<sup>6</sup> bewirkt werden, sind in Tabelle 6-6 dargestellt und sind im Vergleich zu den Werten der Herstellung/Reaktivierung sehr gering. Den bedeutsamsten Anteil machen sie beim mit Reaktivat betriebenen GA5 aus, da hier insgesamt die niedrigsten CO<sub>2</sub>-Emissionen vorliegen. Der Unterschied zwischen dynamischer und konstanter Beschickung ist als gering einzustufen.

**Tabelle 6-6: Absolute und relative CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Adsorberbetrieb [nach NAHRSTEDT ET AL., 2013B]**

	<b>GA3, Frischkohle dynamischer Betrieb</b> (mittlere Geschwindigkeit 3,5 m/h)	<b>GA4, Frischkohle konstanter Betrieb</b> (2 m/h)	<b>GA5, Reaktivat konstanter Betrieb</b> (2 m/h)
<b>Spezifische Emission [g CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>]</b>	12	13	16
<b>Anteil am Gesamt-CF [%]</b>	3,7	5	9

Werden beide Emissionsarten addiert, ergeben sich folgende spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen: GA3: **0,329 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>**, GA4: **0,260 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>** und GA5 **0,186 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>**. Im Vergleich zu den konventionellen Filtern gehen die GAK-Filter also mit deutlich höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen einher. Allerdings findet in den konventionellen Filtern

<sup>6</sup> Der Anteil der Entsorgung des Spülschlammes ist vernachlässigbar.

auch kein nennenswerter Spurenstoffrückhalt statt, so dass immer die Vor- und Nachteile abgewogen werden müssen. Wird lediglich der CF betrachtet, ist eine konstante Betriebsweise gegenüber der dynamischen zu bevorzugen [NAHRSTEDT ET AL. 2013B]. Trotz geringerer Standzeiten und entsprechend häufigerem Austausch können durch die Anwendung von Reaktivat bedeutsame Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Dennoch sind weitere Carbon Footprint Bilanzierungen notwendig um die Ergebnisse aus Obere Lutter auf ihre Übertragbarkeit zu überprüfen.

## 6.4 Diskussion

In Tabelle 6-7 sind die berechneten Spannweiten der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Ozonung und der Zugabe von PAK für die eingegrenzte Dosiermenge sowie die ermittelten CF-Werte für die Filtration über GAK aus Obere Lutter aufgetragen.

**Tabelle 6-7: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der unterschiedlichen Verfahren zur Spurenstoffelimination**

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

Die berechneten Emissionen für die Ozonung und die Zugabe von PAK bewegen sich insgesamt in ähnlichen Bereichen, wobei der maximale Werte für die PAK den Maximalwert der Ozonung um nahezu den Faktor zwei überragt. Für beide Verfahren sind die Emissionen von der Dosierung abhängig; bei der Ozonung wird der Stromverbrauch für die Herstellung von Sauerstoff und Ozon durch die Ozondosis bestimmt, bei der Zugabe von PAK durch die Herstellung der Aktivkohle.

Der maximal für Obere Lutter berechnete Wert liegt mit 0,33 kg CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup> etwas niedriger als der maximale Wert für die PAK-Zugabe. Durch die Verwendung von Reaktivat/Regenerat können rund 30 % der Emissionen eingespart werden, auch wenn die Kohle häufiger ausgetauscht werden muss. Für die Werte der GAK muss berücksichtigt werden, dass hier 40 % Eigenstromerzeugung auf dem Klärwerk mitverrechnet wurden; trotzdem sind die Emissionen zur Herstellung der Aktivkohle maßgeblich für die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diese Werte deuten darauf hin, dass die Filtration über frische GAK mit dem höchsten Treibhausgaspotential einhergeht (vgl. NAHRSTEDT ET

AL., 2013B). Durch Verwendung von Reaktivat/Regenerat können erhebliche Mengen an CO<sub>2</sub> eingespart werden und das Verfahren der Filtration über GAK nähert sich den Verfahren der Ozonung und der Zugabe von PAK an.

Im Vergleich zu den Werten aus Phase I ergeben sich einige neue Erkenntnisse. Bei der Ozonung wird nahezu die gesamte CO<sub>2</sub>-Emission durch den Stromverbrauch zur Herstellung von Ozon und Sauerstoff 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden ohne vergleichbare Eliminationsleistungen hinsichtlich Spurenstoffe festgestellt/berechnet und sind demnach nicht direkt vergleichbar.

Im Vergleich zur konventionellen Abwasserreinigung die mit 0,145 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (0,246 kg CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup>) in REMY ET AL. (2011) aufgeführt ist, erfolgt eine nennenswerte Erhöhung durch die weitergehenden Verfahren. Für eine abschließende Bewertung der Treibhausgasemissionen sind jedoch weitere Bilanzierungen und weitere belastbare Daten zur Herstellung der Aktivkohle nötig. Durch Eigenstromerzeugung (vgl. Kapitel 8.6) auf der Kläranlage kann die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Ozonung erheblich verbessert werden; energiesparendere Herstellungs- und Reaktivierungsprozesse für Aktivkohle können die Emissionen der adsorptiven Verfahren vermindern.

## 7 Modellanlage

Ergänzend zu den vorangehend durchgeführten Auswertungen der großtechnischen Versuchsanlagen zur Spurenstoffelimination, wird nachfolgend eine tabellarische Bemessung und Ermittlung von energetischen Idealwerten gemäß des Gelbdruckes des Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013] für zwei Modellanlagen in unterschiedlichen Größenordnungen erstellt, welche jeweils eine zusätzliche vierte Reinigungsstufe erhalten. Die Auswahl und Auslegung der Modellanlagen erfolgt repräsentativ für das Land NRW, um Ableitungen für die Kläranlagenbetreiber bei der Entscheidung für eine vierte Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination zu ermöglichen.

### 7.1 Datengrundlage

Für die tabellarische Bemessung der Modellanlagen und die Festlegung der Größenordnungen erfolgt zunächst eine rein statistische Auswertung auf Basis der durch das LANUV erhobenen Daten zu den Kläranlagen in NRW [LANUV, 2013].

In einem zweiten Schritt werden auf der Basis dieser statistischen Auswertung und unter Zuhilfenahme der Aufzeichnungen der DWA in den Kläranlagennachbarschaften NRW [DWA, 2013] die verschiedenen Verfahrensstufen der Modellanlagen festgelegt.

Die in dem ersten Arbeitspaket „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] ermittelten Daten werden dabei berücksichtigt und als Grundlage in die Modellanlagen mit einfließen.

#### 7.1.1 Statistische Auswertung

Das LANUV führt in einer Datenbank [LANUV, 2013] detaillierte Informationen zu 645 Kläranlagen in NRW. Neben den Angaben zur Ausbaugröße enthält die Datenbank auch Informationen über die ausgewählten Verfahrensstufen. Diese Informationen wurden in tabellarischer Form aufbereitet und ausgewertet.

Der Aufbau der Modellanlagen erfolgt im ersten Schritt durch die statistische Auswertung der vorliegenden Daten zu den Kläranlagen in NRW, nach unterschiedlichen Kriterien.

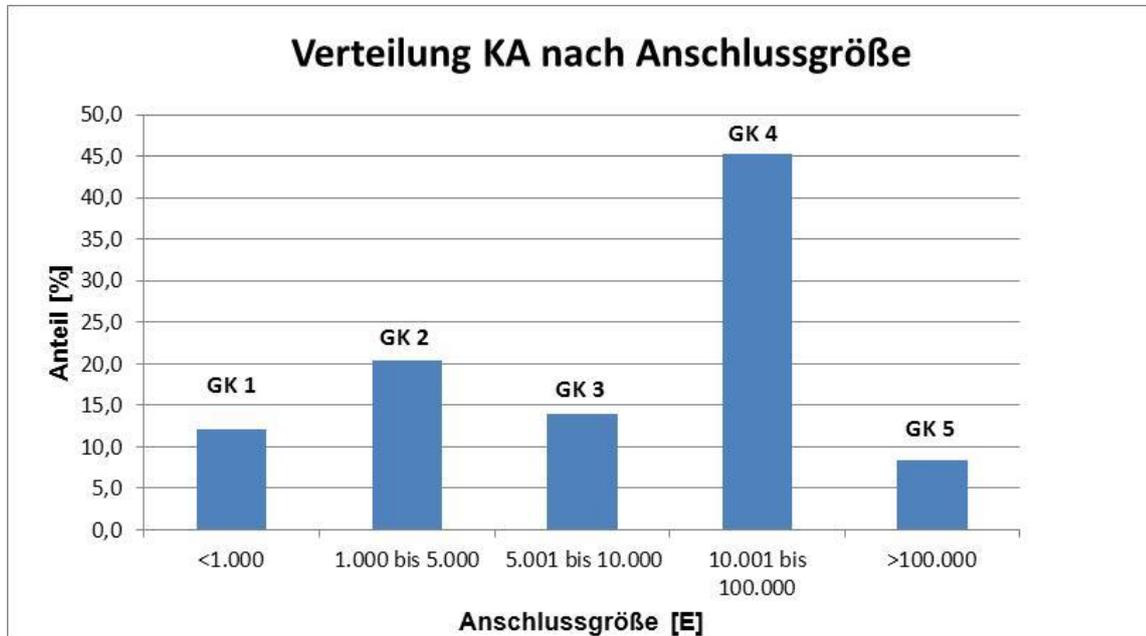
Für den Aufbau der Modellanlagen werden zwei Ansätze verfolgt:

1. **Häufigkeit nach Anschlussgröße:** zum einen wird eine Modellanlagengröße der Größenordnung gewählt, die anteilig in NRW die größte Anzahl (Anschlussgröße in Anlehnung an die Größenklassen) besitzt.
2. **Abwasserreinigungsleistung:** zum anderen wird eine Modellanlagengröße der Größenordnung gewählt, die anteilig in NRW die größte Abwasserreinigungsleistung besitzt.

Nachfolgend erfolgt zunächst die Betrachtung der Verteilung der Kläranlagen in NRW nach ihrer Anschlussgröße.

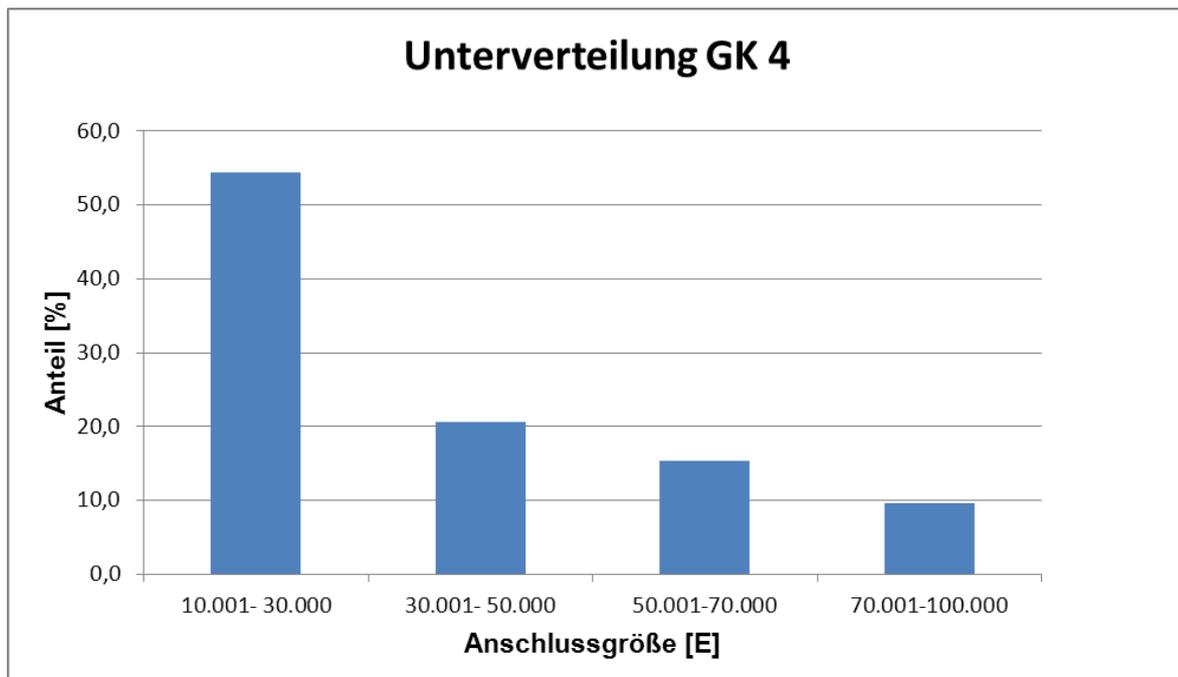
### 7.1.1.1 Statistische Auswertung – Häufigkeit nach Anschlussgröße

Nach Auswertung der Daten lässt sich - wie in folgender Abbildung grafisch dargestellt - erkennen, dass der größte Anteil der Kläranlagen in NRW (45 %) der Größenklasse 4 zu zuordnen ist. Die Spreizung dieser Größenklasse ist mit dem Bereich zwischen 10.001 E und 100.000 E jedoch sehr groß.



**Bild 7-1: Verteilung der Kläranlagen NRW nach Anschlussgröße (GK 1 bis 5)**

Aus diesem Grund ist es sinnvoll in einem zweiten Schritt eine feinere Unterteilung und damit weitergehende Detaillierung dieser Größenklasse vorzunehmen.

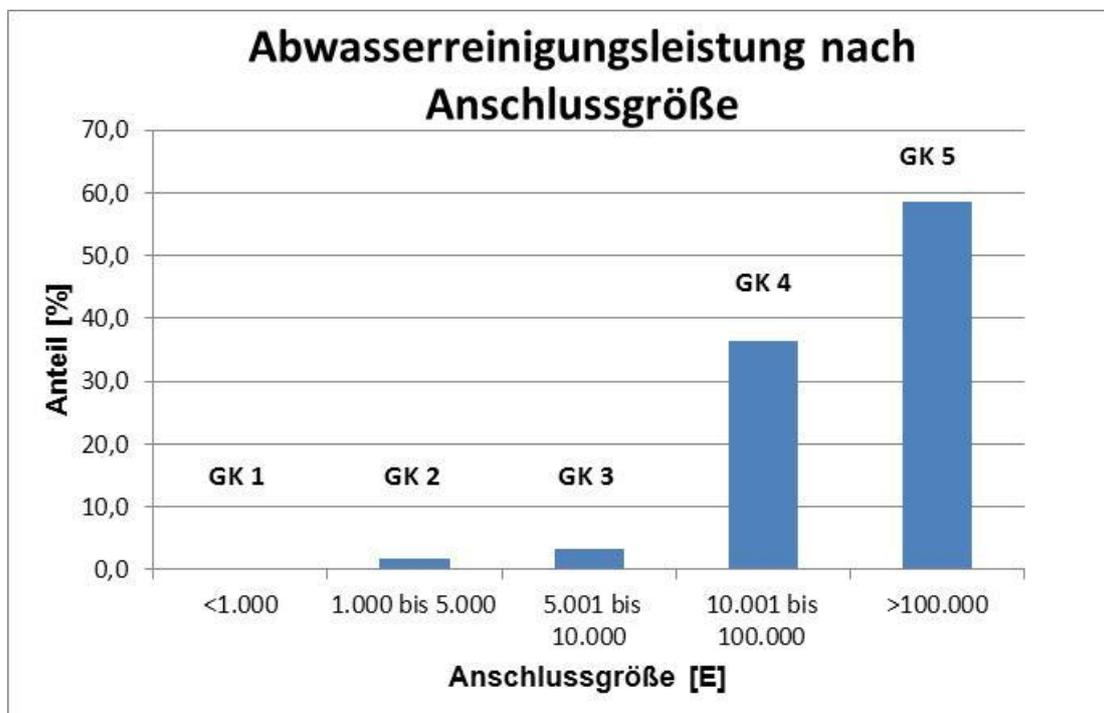


**Bild 7-2: Verteilung der Kläranlagen NRW der GK 4 nach Anschlussgröße**

Aus dieser detaillierteren Auswertung in Bild 7-2 ist ersichtlich, dass innerhalb der Größenklasse 4 die Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von 10.001 und 30.000 E den größten Anteil mit ca. 55 % an der Gesamtanlageanzahl der Größenklasse vier darstellen. Für die erste der beiden Modellanlagen wird daher ein Mittelwert von 20.000 E als Anschlussgröße festgelegt.

**7.1.1.2 Statistische Auswertung - Abwasserreinigungsleistung**

Betrachtet man die Abwasserreinigungsleistung der Kläranlagen in NRW, ergibt sich eine andere Verteilung. Wie zu erwarten, reinigen die Kläranlagen der Größenklasse 5 (> 100.000 E), obwohl deren Anzahl nur ca. 10 % aller Kläranlagen in NRW ausmacht (siehe Bild 7-1), das anteilig größte Abwasservolumen. Knapp 60 % des behandelten Abwassers in NRW wird in Anlagen mit einer Anschlussgröße über 100.000 E gereinigt. Nachfolgende Abbildung stellt die prozentuale Verteilung der Anlagen nach Anschlussgröße und Abwasserreinigungsleistung dar:

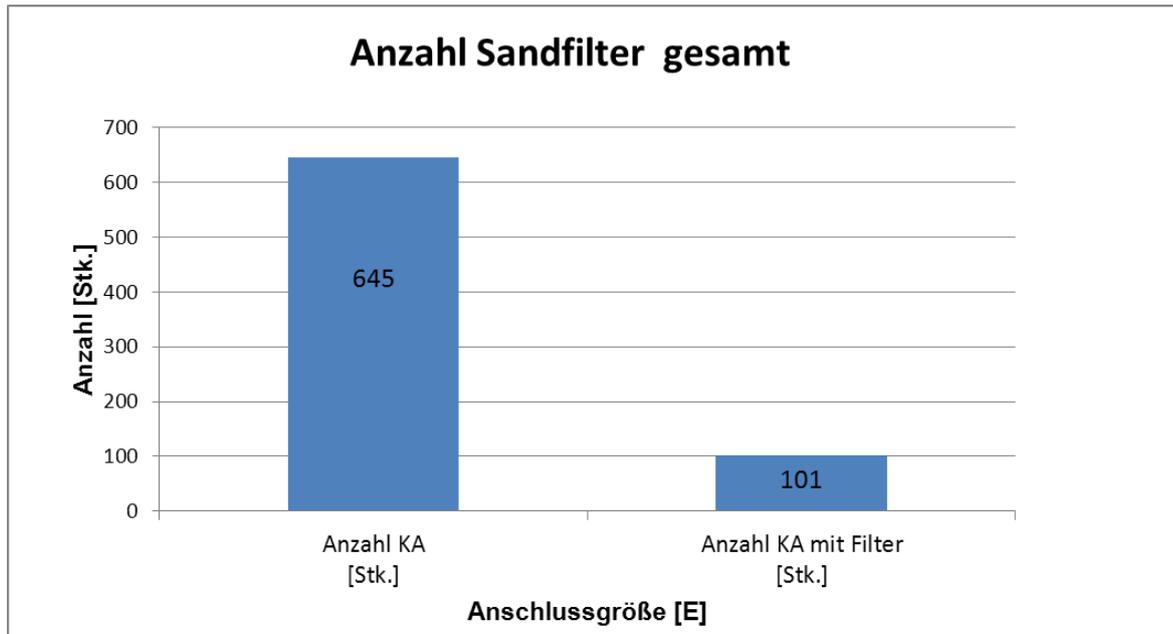
**Bild 7-3: Verteilung nach Abwasserreinigungsleistung**

Für die Bemessung der zweiten Modellanlage wird eine Anschlussgröße von 100.000 E festgelegt.

**7.1.2 Auswertung der Verfahrensstufen**

Nachdem die Anschlussgrößen zur Bemessung der Modellanlagen mit 20.000 E und 100.000 E festgelegt sind, werden die vom LANUV übermittelten Daten [LANUV, 2013] dahingehend ausgewertet, die Häufigkeit einzelner Verfahrensstufen zu ermitteln. Dabei wird bei der Auswertung ein Hauptaugenmerk auf das Vorhandensein einer Flockungsfiltration (Sandfilter) innerhalb der Kläranlagen, in Abhängigkeit der

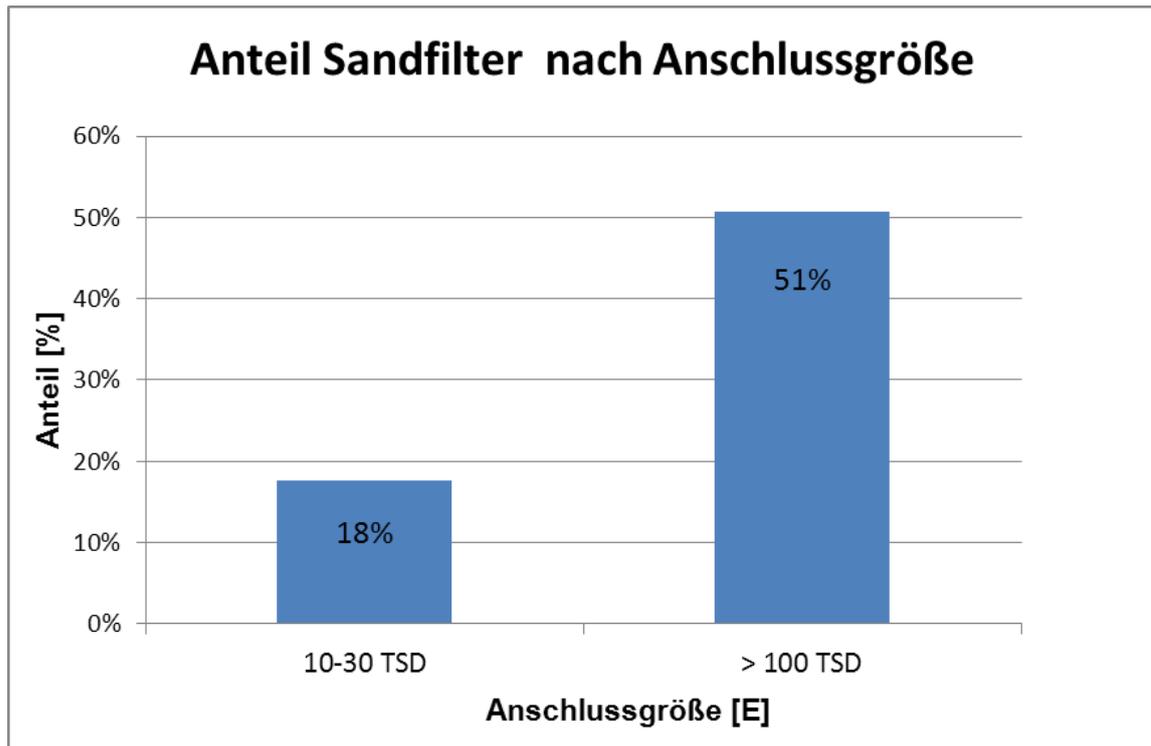
Anschlussgröße, gelegt. Ein eventuell bereits vorhandener nachgeschalteter Sandfilter muss bei der Betrachtung der vierten Reinigungsstufe zur Elimination von Spurenstoffen berücksichtigt werden, da für einige Behandlungsverfahren eine nachgeschaltete Filtration erforderlich ist. Somit hat in der Betrachtung der Auswahl des Verfahrens zur Spurenstoffelimination eine vorhandene Flockungsfiltration (z. B. Sandfilter) Einfluss auf die Verfahrensauswahl und den sich daraus ergebenden Energiebedarf. Die Auswertung der Daten [LANUV, 2013] zum Vorkommen von Sandfiltern ist in Bild 7-4 dargestellt:



**Bild 7-4: Anzahl der Kläranlagen NRW gesamt und mit Sandfilter**

Von den 645 Kläranlagen in NRW haben 101 bereits einen Sandfilter als nachgeschaltete Reinigungsstufe zur Flockungsfiltration. Nicht alle dieser Flockungsfiltrationen werden dauerhaft betrieben.

Da nicht der überwiegende Anteil der Kläranlagen in NRW mit einem Sandfilter ausgestattet ist, erfolgt im nächsten Schritt die Betrachtung der Verteilung der Sandfilter auf die vorab ausgewählten Anschlussgrößen für die beiden Modellanlagen. Dies führt zu dem, in Bild 7-5, dargestellten Ergebnis.



**Bild 7-5: Anteil der Kläranlagen NRW (Modellanlagengrößen) mit Sandfilter**

Für die beiden gewählten Modellanlagengrößen wird festgelegt, dass die Modellanlage für 100.000 E mit einem Sandfilter als eigener Reinigungsstufe in die Betrachtung des Energiebedarfs eingeht. Die Modellanlage für 20.000 E wird dagegen ohne vorhandenen Sandfilter betrachtet.

Die Aufgliederung der übrigen verfahrenstechnischen Reinigungsstufen ergibt sich aus der weiteren Auswertung der Daten der DWA. Durch das Handbuch „Nachbarschaften im DWA-Landesverband Nordrhein-Westfalen 2013“ [DWA, 2013] liegen für annähernd alle Kläranlagen in NRW Daten über die Größenordnung (Ausbaugröße) und Angaben über die jeweils eingesetzten Verfahren der Anlagen vor. Die Einschränkung „annähernd“ bezieht sich darauf, dass gegenüber der Auswertung des LANUV, in der 645 Kläranlagen erfasst sind, im Handbuch der Kläranlagennachbarschaften [DWA, 2013] dagegen lediglich 624 Kläranlagen enthalten sind. Das Buch der Kläranlagennachbarschaften wird trotz dieser Unschärfe als Basis für die verfahrenstechnische Festlegung der Modellanlagen herangezogen.

Nach tabellarischer Zusammenfassung der Daten können die Verfahrensstufen hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung in den einzelnen Größenklassen ausgewertet werden. Auf Grundlage dieser vorliegenden Auswertung werden die Entscheidungen für den verfahrenstechnischen Aufbau der Modellanlagen getroffen. In Bild 7-6 ist exemplarisch ein Beispiel für die Auswertung der Daten der DWA Nachbarschaften dargestellt.



**Tabelle 7-1: Auswertung Verfahrensstufen der DWA Nachbarschaften**

Verfahrensstufe	Ausbaugröße			
	100.000 - 150.000		10. 000 - 30.000	
	[stk]	[%]	[stk]	[%]
Anzahl Kläranlagen	35		178	
Anzahl Denitrifikation vorgeschaltet	27	77%	93	52%
Anzahl Denitrifikation intermittierend	4	11%	62	35%
Anzahl Nitrifikation	31	89%	154	87%
Anzahl Phosphorelimination biologisch u. chemisch	15	43%	84	47%
Anzahl Phosphorelimination chemisch	15	43%	62	35%
Anzahl Faulung	29	83%	70	39%
Anzahl BHKW	20	57%	37	21%
Anzahl Zentrifuge	19	54%	53	30%
Anzahl Filter	17	49%	22	12%

### 7.1.3 Systemgrenzen für die Energiebilanzierung

Ein wichtiges Kriterium für die nachfolgenden Berechnungen zum Energiebedarf der Modellanlagen und auch zur weitergehenden Bewertung der Vergleichbarkeit der Daten sind die Grenzen der zu betrachtenden Verfahrensstufen. Gerade im Hinblick auf die Entfernung von Spurenstoffen, egal durch welches Verfahren, ist festzulegen welche energetischen Prozesse Berücksichtigung in der Gesamtsumme der Betrachtung des Energiebedarfs finden. In Anlehnung an die Definition der Systemgrenzen nach [GUJER 2007] – ein abgegrenzter Teil der Welt – wird auch die Kläranlage im Hinblick auf ihren Energiebedarf als abgegrenzter Teil der Welt betrachtet. Diesem System können von außen Energien, Betriebsmittel etc. zugeführt und Produkte, Emissionen und ähnliches wieder abgegeben werden. Bilanziert wird lediglich der Bedarf innerhalb der definierten Systemgrenzen. Diese Systemgrenze wird im Hinblick auf die Modellanlagen als die örtliche Grenze der Kläranlage definiert.

Für die zu erstellenden Modellanlagen wird festgelegt, dass nur der Energiebedarf, der auch tatsächlich auf dem Gelände der Kläranlage anfällt, in die Betrachtung einfließt und berücksichtigt wird. Im Gegensatz zu den Untersuchungen im Bericht zum „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] werden daher keine Vorgänge und Energiebedarfsmengen betrachtet, die zwar direkt mit dem Reinigungsverfahren zusammenhängen, aber außerhalb der Kläranlage stattfinden. Als Beispiel ist hier die Herstellung von Ausgangsprodukten zu nennen. Sowohl die Herstellung von Pulveraktivkohle als auch von Reinsauerstoff (insofern dieser angeliefert und nicht auf der Kläranlage erzeugt wird) benötigt ein gewisses Maß an Energie, fällt aber nicht in Form von Energiekosten zu Lasten der Kläranlagenbetreiber. Auch der Energiebedarf für den Transport des Produktes zur Kläranlage wird in den nachfolgenden Kapiteln nicht berücksichtigt.

Weiterhin wird festgelegt, dass im Nachfolgenden nur der elektrische Energiebedarf der einzelnen Verfahrensstufen betrachtet wird.

## 7.2 Modellanlage für 100.000 E

Die Auslegung und Bemessung der Modellanlage für 100.000 E Anschlussgröße wird nachfolgend erläutert. Die Bemessung der einzelnen Verfahrensstufen erfolgt für eine Ausbaugröße von 130.000 E analog zum Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] wie vorangehend erläutert.

Für die Ermittlung und Bewertung des Energiebedarfs von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen ist es neben der Auslegung der vierten Reinigungsstufe auch erforderlich, die Ergebnisse in eine Relation zum Gesamtenergiebedarf der Kläranlage zu setzen. Dazu wird zunächst erläutert, welche Verfahrensstufen als Basis für die Modellanlage angesetzt werden und wie deren Energiebedarf ermittelt wird. Im Anschluss werden diese Ergebnisse bewertend zusammengefasst. An einigen Punkten hat die Wahl der vierten Reinigungsstufe auch rückwirkend Einfluss auf andere Bereiche der Modellanlage. Dies wird bei der Berechnung des Energiebedarfs berücksichtigt und erläutert.

### 7.2.1 Grundlagen der Modellanlage für 100.000 E

Die Grundlagen für die Auslegung der Modellanlage werden analog zum Bericht des ersten Arbeitspakets „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] angesetzt. Unter Berücksichtigung der in der Auswertung der Datengrundlage statistisch erarbeiteten Werte und der Detaillierung durch die verfahrenstechnische Festlegung anhand der Daten der DWA-Nachbarschaften [DWA, 2013], werden die Modellanlagen repräsentativ für das Land NRW ausgearbeitet.

Für die Auslegung und Bemessung wird neben den Angaben in Anlehnung an das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 [ATV-DVWK-A 131, 2000] auch die Auswertungen aus dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] als Grundlage angenommen.

#### 7.2.1.1 Wassermengen

Die Grundlagenansätze der Modellanlage für 100.000 E (Bemessung 130.000 E) mit vierter Reinigungsstufe werden aus der konventionell ausgelegten Modellanlage [MURL, 1999] übernommen. Die daraus folgenden Angaben für den spezifischen Schmutz- und Fremdwasseranfall werden nach Vorgaben des Handbuchs für Kläranlagen [MURL, 1999] übertragen und angepasst. Diese sind der Tabelle 7-2 zu entnehmen. Der maximale Mischwasserabfluss  $Q_{M,max}$  ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$Q_{M,max} = 2 \times Q^s / 14 + Q^f / 24 \left[ \frac{l}{s} \right]$$

Tabelle 7-2: Wassermengen Modellanlage 130.000 E

<u>Einwohnerwerte</u>		<b>Bemessung</b>
Einwohnerwerte	E	130.000 [E]
<u>Wassermengen</u>		
Schmutzwasseranfall	$q_s$	140 [l/(E·d)]
Fremdwasseranfall	$q_f$	35 [l/(E·d)]
Niederschlagswasser	$q_r$	70 [l/(E·d)]
Jahreswassermenge Trockenwetter	$Q_T$	8.303.750 [m <sup>3</sup> /a]
Jahreswassermenge Mischwasser	$Q_M$	11.625.250 [m <sup>3</sup> /a]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	18.200 [m <sup>3</sup> /d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	4.550 [m <sup>3</sup> /d]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,aM}$	9.100 [m <sup>3</sup> /d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	210,65 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	52,66 [l/s]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,aM}$	105,32 [l/s]
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,aM}$	263,31 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,aM}$	368,63 [l/s]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	22.750 [m <sup>3</sup> /d]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	31.850 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	413,77 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	31.850 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Mischwasserabfluss	$Q_{M,max}$	774,88 [l/s]

### 7.2.1.2 Konzentrationen und Frachten

Die Werte der einwohnerspezifischen Frachten werden gemäß den Vorgaben der ATV-DVWK-Arbeitsblattes 131 [ATV-DVWK-A 131, 2000] verwendet. Die maßgebenden Schmutz- und Nährstoffparameter, außer dem aus energetischer Sicht untergeordneten Phosphor, decken sich mit den Ansätzen des Handbuchs [MURL, 1999].

Nach Ermittlung der Wassermengen werden über einwohnerspezifische Frachten nach Vorgaben der [ATV-DVWK-A 131, 2000] die bemessungsrelevanten Konzentrationen bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 7-3 dargestellt.

Für die Anteile von Ammonium und organischem Stickstoff am Kjeldahl-Stickstoff (TKN) wird ein für kommunale Kläranlagen typisches Verhältnis von 7,5/3,5 angesetzt.

**Tabelle 7-3: Schmutzfrachten im Zulauf zur Modellanlage**

<b>Schmutzfrachten im Zulauf zur Kläranlage</b>		
einwohnerspezifische BSB <sub>5</sub> -Fracht	$B_{BSB, spez}$	60 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische CSB-Fracht	$B_{CSB, spez}$	120 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische TS-Fracht	$B_{TS, spez}$	70 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische TKN-Fracht	$B_{TKN, spez}$	11 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische P-Fracht	$B_{P, spez}$	1,8 [g/(E·d)]
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, BSB, Z}$	7.800 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, CSB, Z}$	15.600 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, TS, Z}$	9.100 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, TKN, Z}$	1.430 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, P, Z}$	234 [kg/d]

Da die Modellanlage für 100.000 E gemäß der statistischen Auswertung mit einer Faulung betrachtet wird, erfolgt über das zurückgeführte Zentratwasser aus der Faulung und den Entwässerungszentrifugen eine Rückbelastung an Stickstoff. Diese wird mit 15 % des TKN im Zulauf zur Kläranlage berücksichtigt. In der Tabelle 7-4 sind die Frachten im Zulauf der Belebung inkl. Rückbelastung dargestellt.

**Tabelle 7-4: Frachten im Zulauf Belebung inkl. Rückbelastung**

<b>Schmutzfrachten im Zulauf zur Belebung inkl. Rückbelastung</b>		
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d, BSB, ZB}$	6.006,00 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d, CSB, ZB}$	12.012,00 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d, TS, ZB}$	4.914,00 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d, TKN, ZB}$	1.539,85 [kg/d]
NH <sub>4</sub> -N-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d, NH_4, ZB}$	975,00 [kg/d]
org. N-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d, orgN, ZB}$	350,35 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d, P, ZB}$	203,58 [kg/d]

#### a. Struktureller Aufbau der Verfahrensstufen

Der Aufbau der Modellanlage wurde anhand einer typischen Kläranlage dieser Anschlussgröße nachgebildet. Es wurde dazu auf die Informationen der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] zurückgegriffen. Dabei wurde die Modellanlage mit 100.000 E sowohl mit der Reinigungsstufe Ozonung als auch mit Reinigung über Pulveraktivkohle separat berechnet.

Eine schematische Darstellung der Modellanlage mit Ozonung als vierte Reinigungsstufe findet sich in der nachfolgenden Abbildung. Die einzelnen Verfahrensstufen werden nachgebildet und in einen systematischen Zusammenhang gebracht. Anhand der grünen Markierungen sind die Energiedaten (siehe auch Kapitel 7.2.4) den Verfahrensstufen zu zuordnen.

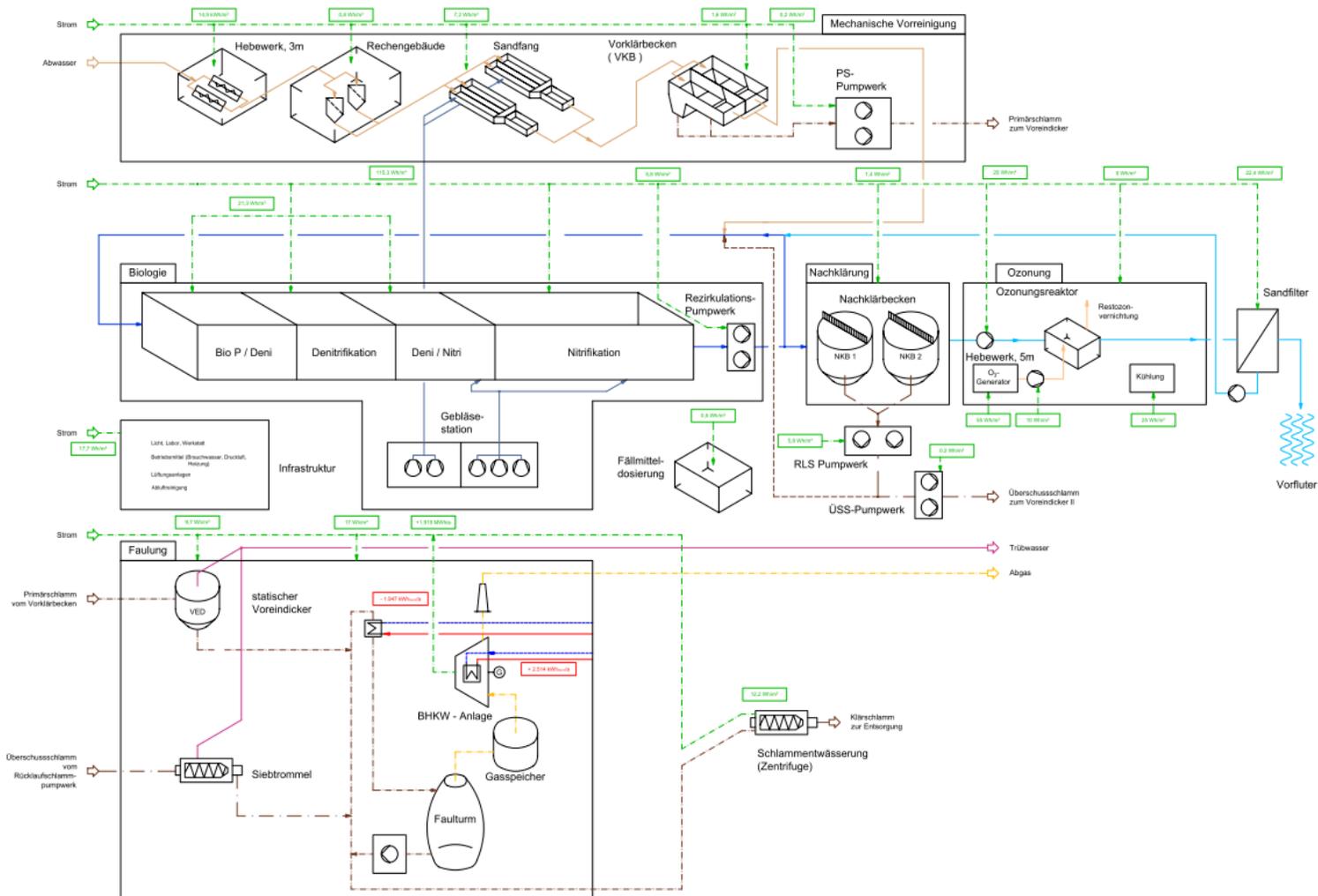


Bild 7-7: Modellanlage 100.000 E mit Ozonung

Im Nachfolgenden werden die einzelnen Verfahrensstufen, die Bestandteil der Modellanlage sind, kurz benannt und mit ihren wichtigsten Merkmalen und Verbrauchern dargestellt. Die Berechnungen zur Bemessung der einzelnen Verfahrensstufen befinden sich in Kapitel 2.

#### Zulaufhebwerk:

Das Hebewerk wird mit einer durchschnittlichen Förderhöhe von 3 m gewählt. Die Förderung des Abwassers erfolgt in Anlehnung an das Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] durch Schneckentrogpumpen.

#### Rechen:

Die Rechanlage ist zweistraßig vorgesehen und besteht aus zwei Rechen einschließlich Rechengutwäsche und –presse.

#### Sandfang:

Für die weitergehende mechanische Reinigungsstufe sind zwei belüftete Langsandfänge mit einem Volumen von je 240 m<sup>3</sup> vorgesehen. Diese sind jeweils ausgestattet mit einem Räumler, einer Sandentnahmepumpe und einem Sandwäscher.

#### Vorklärung:

Die Bemessung der Vorklärung erfolgt in Anlehnung an das Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999]. Gewählt wurden zwei Rechteckbecken mit einem Gesamtvolumen von 1.248 m<sup>3</sup>. Jedes Becken ist mit einem Räumler und einer zugehörigen Primärschlammpumpe ausgerüstet.

In der nachfolgenden Tabelle ist die Auslegung und Bemessung der Vorklärung dargestellt.

Tabelle 7-5: Bemessung der Vorklärung

<b><u>Einwohnerwerte</u></b>		<b>Bemessung</b>
Einwohnerwerte	E	130.000 [E]
<b><u>Wassermengen</u></b>		
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	22.750,00 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	1489,58 [m <sup>3</sup> /h]
Mischwasserabfluss Jahresmittel	$Q_M$	31.850,0 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Mischwasserabfluss nach Ausgleichsbecken	$Q_M$	2790 [m <sup>3</sup> /h]
<b><u>Volumen und Aufenthaltszeit</u></b>		
Aufenthaltszeit im Vorklärbecken	$t_R$	0,80 [h]
Oberflächenbeschickung	$q_A$	3,5 [m/h]
<b><u>Bemessungsergebnisse</u></b>		
erforderliches Volumen	$V_{VKB,erf}$	1192 [m <sup>3</sup> ]
erforderliche Beckenoberfläche	$A_{VKB,erf}$	426 [m <sup>2</sup> ]
<b><u>gewählte Abmessungen</u></b>		
Anzahl der Becken	n	2,00 [stk]
Länge Vorklärbecken	$l_{VKB}$	30,00 [m]
Breite Vorklärbecken	$b_{VKB}$	8,00 [m]
Tiefe Vorklärbecken	$h_{VKB}$	2,60 [m]
Volumen Vorklärbecken	$V_{VKB}$	1248 [m <sup>3</sup> ]
Oberfläche Vorklärbecken	$A_{VKB}$	480 [m <sup>2</sup> ]

**Belebung:**

Die Bemessung der Belebung und der Beckengrößen erfolgt nach Hochschulgruppenansatz [BÖHNKE, 1989]. Nach Auswertung der Angaben im Handbuch der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] wird für die Modellanlage 100.000 E ein Belebungsbecken mit vorgeschalteter Denitrifikation gewählt. Insgesamt sind 27 der 35 Kläranlagen dieser Größenordnung (siehe Tabelle 7-1) derartig ausgestattet.

Da die Modellanlage für 100.000 E mit einer Faulung ausgebildet ist, wird bei der Berechnung der Zulaufmengen auch die TKN Rückbelastung berücksichtigt. Die Stickstoffrückbelastung im Zulauf zur biologischen Stufe wird mit 15 % der TKN Fracht im Zulauf zur Vorklärung angesetzt. Die vollständigen Berechnungstabellen zum Hochschulgruppenansatz inkl. der Berechnungsparameter befinden sich in Kapitel 2. In folgender Tabelle sind lediglich die wesentlichen Berechnungen zur Ermittlung des erforderlichen Behandlungsvolumens zusammengefasst.

**Tabelle 7-6: Bemessung des erforderlichen Belegungsvolumens nach HSG für die Modellanlage mit 130.000 E Ausbaugröße**

<b><u>Berechnung der Beckenvolumina</u></b>		
zu nitrifizierende Stickstoffkonzentration	$N_{n,m}$	59,20 [mg/l]
Hilfsgröße P	P	215,06 [g/m <sup>3</sup> ]
Raumbeschickung	$q_R$	0,801 [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·d)]
erforderliches Gesamtvolumen der Belegung	V	<b>28.390</b> [m <sup>3</sup> ]
erforderliches aerobes Volumen der Belegung	$V_N$	<b>13.917</b> [m <sup>3</sup> ]
erforderliches anoxisches Volumen der Belegung	$V_D$	<b>14.473</b> [m <sup>3</sup> ]

Innerhalb der Belegung ist die Belüftung der größte Verbraucher. Weiterhin spielen die Rezirkulationspumpen, die Rührwerke und das Rücklaufschlammumpwerk eine wesentliche Rolle bei der Energiebedarfsermittlung.

#### Nachklärung:

Die Nachklärung besteht aus zwei Rundbecken mit einem Durchmesser von 40 m und einem Volumen von je 5.613 m<sup>3</sup>. Als energetische Verbraucher sind der Nachklärung die Überschussschlammumpen und die Räumler zugeordnet.

Im Folgenden werden zur Entfernung von Spurenstoffen als vierte Reinigungsstufe zwei Varianten betrachtet:

#### Ozonung (Variante A):

In der ersten Variante zur Entfernung von Spurenstoffen wird als vierte Reinigungsstufe die weitergehende Abwasserreinigung mittels Ozonung als Bestandteil der Modellanlage angesetzt. Die Ozonung setzt sich aus energetischer Sicht aus folgenden Hauptverbrauchern zusammen: Hebewerk, Ozongenerator, Ozoneintrag und anschließender Restozonvernichtung. Weiterhin muss Energie für die Kühlung aufgebracht werden. Die Energieverbräuche für die Gewinnung von Reinsauerstoff oder für den Sauerstofftransport werden in der Modellanlage nicht berücksichtigt (siehe Systemgrenzen in Kapitel 7.1.3) Die detaillierte Auslegung der Ozonung als vierte Reinigungsstufe wird im nachfolgenden Kapitel 7.2.2 erläutert.

#### Pulveraktivkohle (Variante B):

Als zweite Variante zur Entfernung von Spurenstoffen wird als vierte Reinigungsstufe die weitergehende Abwasserreinigung mittels Pulveraktivkohle betrachtet. Aus energetischer Sicht setzt sich die Verfahrensstufe aus folgenden Hauptverbrauchern zusammen. Das Abwasser aus der Nachklärung wird über ein Hebewerk in ein Kontaktbecken gehoben. Dort erfolgt die Zugabe der Pulveraktivkohle. Durch Rührwerke erfolgt der Eintrag von Energie zur Umwälzung. Die Pulveraktivkohle wird mehrmals im Kreis geführt, so dass nur ein geringer Teil an frischer Kohle zudosiert werden muss und die Kontaktzeit zwischen PAK und Abwasser unabhängig von der hydraulischen Aufenthaltszeit variiert werden kann. Eine entsprechende Menge an Überschussskohle muss entfernt werden und

kann in die Biologie zurückgeführt werden. Die Entnahme der PAK aus dem Gesamtsystem erfolgt mit dem Überschussschlamm.

Die Auslegung dieser Verfahrensstufe ist in Kapitel 7.2.3 genauer dargestellt.

#### Sandfilter:

Im Anschluss der vierten Reinigungsstufe, unabhängig ob diese durch Ozonung oder Pulveraktivkohle erfolgt, wird die Modellanlage 100.000 E mit einem Filter ausgerüstet. Es handelt sich um einen abwärts durchströmten 2-Schicht-Raumfilter. Dieser wird innerhalb der 100.000 E Modellanlage als separate Reinigungsstufe betrachtet und nicht als Bestandteil der vierten Reinigungsstufe, denn die statistischen Auswertungen haben gezeigt, dass der überwiegende Anteil der Kläranlagen in NRW mit mehr als 100.000 E Ausbaugröße bereits mit einem Sandfilter ausgestattet sind (siehe Bild 7-5). Daher wird der Sandfilter bei diesen Anlagen als bereits vorhandene Verfahrensstufe angesehen und nicht als zusätzlich, separat zu errichtender Anlagenteil. Hauptenergieverbraucher für den Betrieb der Filtration sind insbesondere die Beschickungspumpen, der Spülluftbedarf, die Spülwasserpumpen und die Spülwasserrückführung. Die Bestimmung des Energiebedarfs erfolgte nach Vorgabe des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999]. Zusätzlich erfolgte ein Abgleich mit den Ergebnissen des Abschlussberichtes „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011].

#### Fällmitteldosierung:

Als energetische Verbraucher der Fällmitteldosierung sind an dieser Stelle die Dosierpumpen zu benennen. Die Fällmitteldosierung ist jedoch in der energetischen Betrachtung der Gesamtanlage ein untergeordneter Punkt.

#### Voreindickung:

Innerhalb der Daten der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] liegen keine Angaben über die Einsatzhäufigkeit von Aggregaten zur Voreindickung vor. Aus Erfahrungswerten wird eine Verfahrensstufe für die Voreindickung ausgewählt. Diese wird zur Ermittlung des Energiebedarfs herangezogen.

Für die Voreindickung des Primärschlammes der Vorklärung wird daher in der Modellanlage ein statischer Eindicker gewählt.

Ein Abgleich mit dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] führt für die Voreindickung des Überschussschlammes zu der Wahl der maschinellen Voreindickung über Siebtrommeln.

#### Stabilisierung:

Entsprechend der Auslegung für die Modellanlage 100.000 E ist eine anaerob-mesophile Faulungsanlage mit einem Volumen von 4.300 m<sup>3</sup> zur Stabilisierung des Rohschlammes vorgesehen. Die Auswertung der Daten der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] zeigt, dass 29 von 35 Kläranlagen dieser Größenordnung mit einer solchen Faulungsanlage ausgestattet sind (siehe Tabelle 7-1).

Der Energiebedarf dieses Verfahrensschrittes entsteht im Wesentlichen bei der Rohschlammaufheizung und der Umwälzung.

#### Entwässerung

Als Entwässerungsverfahren wird nach Auswertung der DWA Nachbarschaftsdaten [DWA, 2013] eine Hochleistungsentwässerungszentrifuge gewählt. Diese wird innerhalb NRW auf den vorhandenen Kläranlagen am häufigsten eingesetzt (auf 19 von 35 Kläranlagen). Details der Auswertung befinden sich in Tabelle 7-1.

#### b. Anpassung nach DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013]

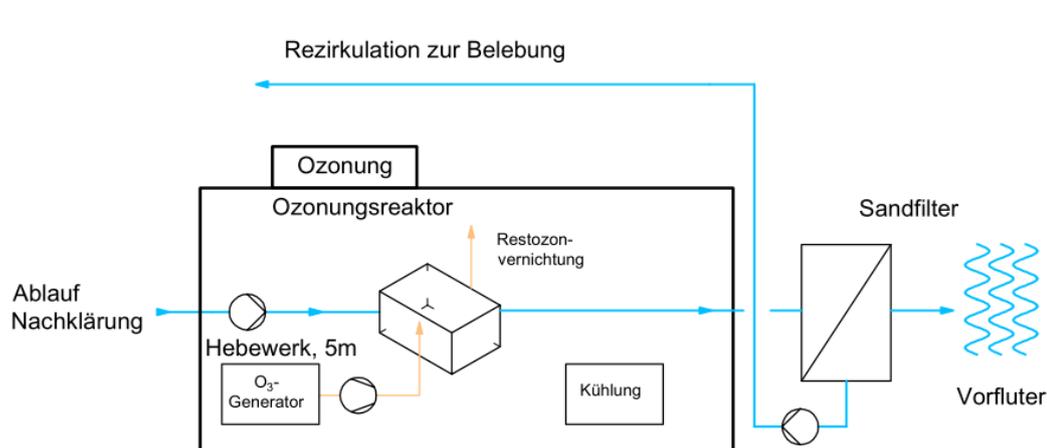
Im Gegensatz zu der im ersten Arbeitspaket „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] erstellten Modellanlage, die sich auch hinsichtlich des Energiebedarfes eng am Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] orientierte, wird die Modellanlage dieses Arbeitspakets an das neue DWA Arbeitsblatt A 216 [DWA-A 216, 2013] angelehnt.

In diesem Arbeitsblatt werden alle relevanten Verbraucher einer Kläranlage betrachtet und die jeweiligen anlagenspezifischen Idealwerte für den Stromverbrauch mit den zugehörigen Berechnungsansätzen auf dem aktuellen Stand der Technik dargestellt. Im Vergleich zum Energiehandbuch [MURL, 1999] ergeben sich einige Unterschiede. Im Wesentlichen sind das Angaben zu den Wirkungsgraden der einzelnen Aggregate, wie Pumpen oder Verdichter. Die relevanten Unterschiede innerhalb der Bestimmung des Energiebedarfs werden an den entsprechenden Stellen konkret dargestellt.

#### 7.2.2 Auslegung der Ozonung (Variante A)

Zur gezielten Entfernung von Spurenstoffen wird in der Modellanlage zunächst eine Ozonung als vierte Reinigungsstufe betrachtet. Die Ozonung wird auf Basis der Ergebnisse aus Phase I [AZ IV – 7 - 042 600 003 J, 2011] erstellt und in die Modellanlage eingebunden.

Verfahrenstechnisch folgt die Ozonung direkt im Anschluss der Nachklärung. Zunächst wird das Abwasser über ein Hebewerk auf das entsprechende Niveau der Ozonung gehoben. Das Ozon wird direkt vor Ort in einem Generator aus gelagertem Flüssigsauerstoff erzeugt. Das möglicherweise in der Abluft enthaltene Restozon wird durch eine Restozonvernichtung zerstört. Für die Restozonvernichtung und die Kühlung des Generators besteht ein zusätzlicher Energiebedarf. In der nachfolgenden Abbildung ist ein Prinzipschema der Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter beispielhaft dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen Ausschnitt von Bild 7-7.



**Bild 7-8: Schema Ozonung 100.000 E (Ausschnitt aus Bild 7-7)**

Alle maßgeblichen elektrischen Verbraucher sind nachfolgend aufgelistet:

- Hebewerk,
- Ozonerzeugung,
- Ozonein- und -austrag,
- Restozonvernichtung und
- Kühlung.

Eine der Ozonung nachgeschaltete Behandlung, wie im ersten Arbeitspaket „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] dargestellt, wird in der Modellanlage für 100.000 E nicht als Bestandteil dieser Verfahrensstufe gewertet, da die Nachbehandlung über den bei der größten Anzahl der Kläranlagen dieser Größenordnung bereits vorhandenen Sandfilter erfolgt. Dieser wird der Ozonung nachgeschaltet aber energetisch als selbstständige Reinigungsstufe betrachtet. Die Ermittlung des Energiebedarfs erfolgt daher losgelöst von der Verfahrensstufe der Spurenstoffelimination.

Im Abschlussbericht „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [PINNEKAMP ET AL., 2011] wurde für die Förderhöhe des Hebewerks in die Reinigungsstufe Ozonung eine Spannweite zwischen 0 m und 10 m betrachtet. In der Modellanlage wird die Förderhöhe zu einem mittleren Wert von 5 m angesetzt. Die dem Abwasser zugeführte Ozondosis wird in Anlehnung an Phase I mit zu einem mittleren Wert von 5,0 g/m<sup>3</sup> Abwasser gewählt.

Auch der Abgleich mit weiterer Literatur unterstützt die Wahl dieses Wertes. In bereits realisierten Pilotanlagen [TÜRK ET AL., 2013] werden Dosiermengen zwischen 3 g/m<sup>3</sup> (Pilotanlage Regensdorf) und 12,5 g/m<sup>3</sup> (Kläranlage Bad Sassendorf) angegeben. Die Spannweite des Energiebedarfs für die Ozonerzeugung in Abhängigkeit von der Dosiermenge liegt zwischen 8 und 14 kWh/kg O<sub>3</sub>. In den verglichenen großtechnischen Ozonanlagen (siehe Bild 4-31) aus den vorangegangenen Kapiteln kommen Dosiermengen zwischen 2,5 g/m<sup>3</sup> und 7 g/m<sup>3</sup> zum Einsatz. Für die Modellanlage wird eine Dosis von 5,0 g/m<sup>3</sup> gewählt. In der nachfolgenden Tabelle ist der Energiebedarf für die gewählte

Ozondosis von 5,0 g/m<sup>3</sup> in Abhängigkeit des spez. Energieverbrauchs für die Ozonerzeugung dargestellt.

**Tabelle 7-7: Energiebedarf bei Ozondosis 5,0 g/m<sup>3</sup>**

<b>Energiebedarf Ozonung</b> <b>[kWh/m<sup>3</sup>]</b>	
Ozonerzeugung [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	[kWh/m <sup>3</sup> ]
8,0	<b>0,04</b>
10,0	<b>0,05</b>
12,0	<b>0,06</b>
14,0	<b>0,07</b>

Die katalytische Restozonvernichtung hat nach den Ergebnissen aus Phase I [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] erst ab einer Dosismenge von 15,0 g/m<sup>3</sup> einen relevanten Einfluss auf den Energiebedarf dieser Verfahrensstufe. Für das gewählte Szenario kann die Restozonvernichtung energetisch daher vernachlässigt werden. Zur Kühlung des Generators wurde ein Kühlaggregat mit einem Energieverbrauch von 3 kWh/kg O<sub>3</sub> gewählt. Auch dies entspricht einem mittleren Wert nach Betrachtung der Daten aus Phase I. Bei der angesetzten Zugabedosis von 5,0 g/m<sup>3</sup> entspricht dies einem Energieverbrauch von 0,02 kWh/m<sup>3</sup>. Der gesamte Energieverbrauch der Ozonung als vierte Reinigungsstufe innerhalb der Modellanlage wird im Abschnitt 7.2.4.7 tabellarisch dargestellt.

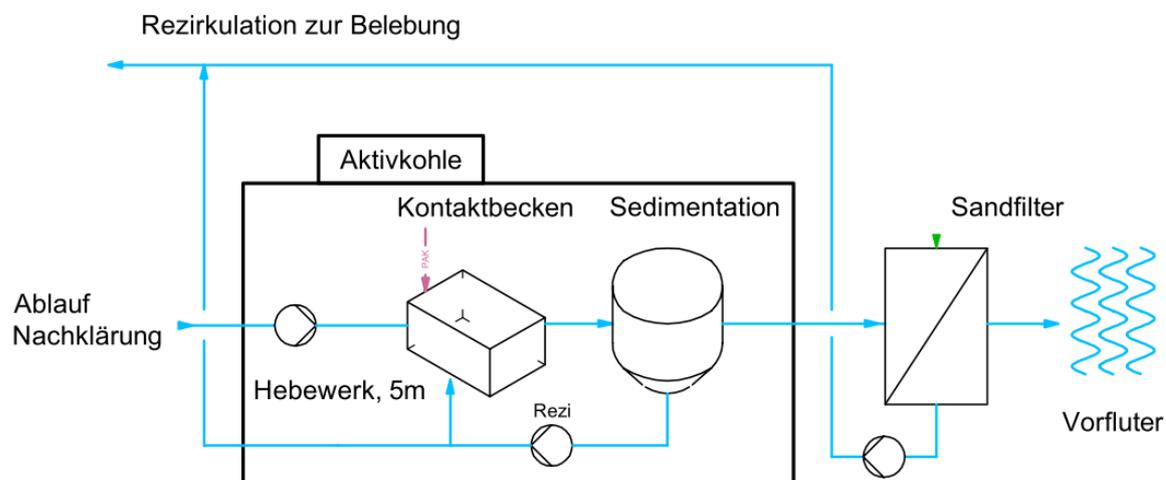
### 7.2.3 Auslegung der PAK (Variante B)

Für die Auslegung der Modellanlage mit 100.000 E wurde neben einer Ozonung als weitere Variante die Entfernung der Mikroschadstoffe über Pulveraktivkohle gewählt. Diese wird nach dem Ablauf der Nachklärung in einem Kontaktbecken zugegeben. Anschließend wird ein Absetzbecken zur Sedimentation nachgeschaltet. Der nachgeschaltete Sandfilter, auch hier als separate Reinigungsstufe betrachtet, hält die PAK-Rückstände zurück und wird in regelmäßigen Abständen rückgespült. Das Rückspülwasser und die abgezogene Überschussschlamme gelangen in die biologische Stufe, wodurch die Verweilzeit der Kohle im Gesamtsystem verlängert und die Beladung der PAK erhöht wird.

Die anfallende Überschussschlamme der Belebung steigert sich durch die dem Rezykulationsstrom in die Belebung hinzugefügte PAK, abhängig von der Dosiermenge, um etwa 5 % [ABEGGLEN UND SIEGRIST, 2012]. Dies hat Einfluss auf die elektrischen Verbraucher der nachfolgenden Verfahrensstufen, deren Energiebedarf abhängig von der Schlamme ist, wie z. B. die Überschussschlammumpfen.

Trotz des höheren Schlammanfalls innerhalb der Belebung wird nicht von einem weitergehenden Einfluss auf die Faulung bzw. Gasbildung ausgegangen, da die Aktivkohle keine Nährstoffe zur Methanbildung stellt. In der nachfolgenden Abbildung ist

ein Prinzipschema der PAK-Stufe mit nachgeschaltetem Sandfilter beispielhaft dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen Ausschnitt von Bild 7-7.



**Bild 7-9: Schema Aktivkohle 100.000 E (Ausschnitt aus Bild 7-7)**

Es ist festzuhalten, dass sich der Energiebedarf nur auf die Verfahrensschritte innerhalb der Kläranlage bezieht (siehe Kapitel 7.1.3 Systemgrenzen). Da die eigentliche Herstellung der Pulveraktive Kohle nicht direkt dem Verbrauch des Klärwerks zugeordnet werden kann, wird diese nicht in der Energiebilanz berücksichtigt. Lediglich die Bereiche Zugabe, Rühren und Rezirkulieren sowie das vorgeschaltete Hebewerk haben Einfluss auf den Energiebedarf. Durch die Ergebnisse in Phase I und Auswertung der Literatur [METZGER UND KAPP, 2005]; [TÜRK ET AL., 2013] wird eine Zugabedosis von  $10 \text{ g/m}^3$  Pulveraktive Kohle gewählt, um eine nach ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten hinreichende Elimination der bekannten Spurenstoffe zu gewährleisten. Diese Dosiermenge wurde auch auf den ausgewerteten großtechnischen Anlagen Schwerte, Mannheim und Böblingen-Sindelfingen zugegeben.

#### 7.2.4 Berechnung des Energiebedarfs

Für die Berechnung des Energiebedarfs wird, wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, die Modellanlage mit einer Anschlussgröße von 100.000 EW betrachtet. Nachfolgend wird der Energiebedarf aller maßgeblichen Verfahrensstufen ermittelt. Einflüsse des neu erschienenen DWA Arbeitsblattes A 216 [DWA-A 216, 2013] und die daraus resultierenden Abweichungen zu der bereits erstellten Modellanlage aus Phase I [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] bzw. dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] werden genauer erläutert.

Die Bereiche Wärme und BHKW werden nicht in der Gesamtbilanz berücksichtigt, da es innerhalb dieses Arbeitspakets vorrangig um den Energiebedarf der einzelnen Verbraucher der Spurenstoffelimination geht. In Kapitel 7.2.6 ist dennoch die mögliche Eigenerzeugung von Strom über die Klärgasverwertung im BHKW dargestellt und berechnet. Darüber hinaus erfolgt in Kapitel 8.6 eine Diskussion möglicher Kompensationsverfahren zur Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs eines Klärwerkes.

Die Wassermenge auf die der spezifische Energiebedarf bezogen wird, ist die anfallende tägliche Mischwassermenge im Jahresmittel. Sie ergibt sich aus der Summe von Schmutzwasser-, Fremdwasser- und Regenwasserabfluss im Jahresmittel und wird mit  $Q_{M,d,aM}$  abgekürzt. Für die Modellanlage mit einer Anschlussgröße von 100.000 E ergibt sich diese Wassermenge zu 24.500 m<sup>3</sup>/d.

**Tabelle 7-8: maßgebliche Wassermengen für die Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs für 100.000 E Modellanlage**

<u>Einwohnerwerte</u>		<u>Anschluss</u>
Einwohnerwerte	E	100.000 [E]
<u>Wassermengen</u>		
Schmutzwasseranfall	q <sub>s</sub>	140 [l/(E·d)]
Fremdwasseranfall	q <sub>f</sub>	35 [l/(E·d)]
Niederschlagswasser	q <sub>r</sub>	70 [l/(E·d)]
Jahreswassermenge Trockenwetter	Q <sub>T</sub>	6.387.500 [m <sup>3</sup> /a]
Jahreswassermenge Mischwasser	Q <sub>M</sub>	8.942.500 [m <sup>3</sup> /a]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>S,aM</sub>	14.000 [m <sup>3</sup> /d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>F,aM</sub>	3.500 [m <sup>3</sup> /d]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	Q <sub>R,aM</sub>	7.000 [m <sup>3</sup> /d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>S,aM</sub>	162,04 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>F,aM</sub>	40,51 [l/s]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	Q <sub>R,aM</sub>	81,02 [l/s]
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q <sub>T,aM</sub>	202,55 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>M,aM</sub>	283,56 [l/s]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q <sub>T,d,aM</sub>	17.500 [m <sup>3</sup> /d]
<b>täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel</b>	<b>Q<sub>M,d,aM</sub></b>	<b>24.500 [m<sup>3</sup>/d]</b>
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	Q <sub>T,2h,max</sub>	318,29 [l/s]
maximaler Mischwasserabfluss	Q <sub>M,max</sub>	596,06 [l/s]

#### 7.2.4.1 Hebewerke

Als Zulaufhebewerk wird eine Schneckentrogpumpe mit einer Förderhöhe von 3 m angenommen. Die Daten der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] und der übermittelten LANUV Dateien [LANUV, 2013] enthalten keine Angaben über Pumpentypen und Förderhöhen, so dass die Verfahrenstechnik in Anlehnung an das Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] gewählt wird. Der Energiebedarf des Hebewerks errechnet sich aus folgender Formel gemäß DWA Arbeitsblatt A 216 [DWA-A 216, 2013]:

$$E = \frac{Q \times h \times 2,7}{\eta_{ges}}$$

In nachfolgender Tabelle ist der Energiebedarf für das Hebewerk dargestellt. Für die Berechnung des Energiebedarfs wird ein Wirkungsgrad ( $\eta$ ) von 0,55 [-] gewählt und somit errechnet sich ein Energiebedarf von 1,33 kWh/(E·a).

**Tabelle 7-9: Energiebedarf Hebewerk, 100.000 E**

<b>Wassermengen</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>gewählt</b>
Einwohnerwerte	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>M,d,aM</sub>	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>Zulaufhebewerk</b>				
Wirkungsgrad	η	0,60 [-]	0,50 [-]	0,55 [-]
Förderhöhe	h	3,00 [m]	3,00 [m]	3,00 [m]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Durchfluss	Q	0,28 [m³/s]	0,28 [m³/s]	0,28 [m³/s]
Pumpenleistung	P	13,9 [kW]	16,7 [kW]	15,2 [kW]
Energieverbrauch absolut berechnet	E <sub>abs,HW</sub>	333,8 [kWh/d]	400,6 [kWh/d]	364,2 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,HW</sub>	13,6 [Wh/m³]	16,4 [Wh/m³]	14,9 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,HW</sub>	1,22 [kWh/(E·a)]	1,46 [kWh/(E·a)]	1,33 [kWh/(E·a)]

### 7.2.4.2 Rechen

Der Energiebedarf des Rechens ergibt sich aus folgender Formel:

$$E = e_{\text{spez}} \times EW_{\text{CSB}}$$

Im Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013] ist ein Wertebereich für den spezifischen Energiebedarf von  $e_{\text{spez}} = 0,05 - 0,1 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$  errechnet. Darin enthalten ist der Energiebedarf von Rechengutwäsche und –presse. Für den spezifischen Energiebedarf der Modellanlage ergibt sich ein Wert von  $0,08 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$ .

**Tabelle 7-10: Energiebedarf Rechen, 100.000 E**

<b>Wassermengen</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>gewählt</b>
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>M,d,aM</sub>	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>Rechen</b>				
spezifischer Energieverbrauch	e <sub>Spez</sub>	0,05 [kWh/(E·a)]	0,10 [kWh/(E·a)]	0,08 [kWh/(E·a)]
Einwohner nach CSB	EW	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Energieverbrauch absolut	E <sub>a,R</sub>	14 [kWh/d]	27 [kWh/d]	21 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,R</sub>	0,6 [Wh/m³]	1,1 [Wh/m³]	0,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,R</sub>	0,05 [kWh/(E·a)]	0,10 [kWh/(E·a)]	0,08 [kWh/(E·a)]

### 7.2.4.3 Sandfang

Innerhalb des Sandfangs setzt sich der Energiebedarf aus den Positionen Belüftung, Räumler, Entnahmepumpe und Wäscher zusammen.

Dabei lässt sich der Energiebedarf des größten Verbrauchers, der Sandfangebläse, wie folgt bestimmen:

$$E = \frac{Q_L \times h}{\eta_{\text{Geb}} \times 367}$$

Wie Tabelle 7-11 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergieverbrauch des Sandfangs in einem Bereich zwischen  $0,42$  und  $0,91 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$ . Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Verfahrensstufe Sandfang ein spezifischer Energiebedarf von  $0,64 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$ .

Tabelle 7-11: Energiebedarf Sandfang, 100.000 E

<b>Wassermengen</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>gewählt</b>
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>Sandfang</b>				
<b>Gebläse:</b>				
Anzahl Sandfang	$n_{SF}$	2 [stk]	2 [stk]	2 [stk]
Querschnittsfläche je SF	$A_{SF}$	7 [m²]	7 [m²]	7 [m²]
Länge Sandfang	$l_{SF}$	34 [m]	34 [m]	34 [m]
Volumen je Sandfang	$V_{SF}$	240 [m³]	240 [m³]	240 [m³]
Volumen gesamt	$V_{SF,ges}$	480 [m³]	480 [m³]	480 [m³]
Einblastiefe	$h_E$	2,7 [m]	2,7 [m]	2,7 [m]
Aufenthaltszeit	$t_{SF}$	10,0 [min]	10,0 [min]	10,0 [min]
Luftetrug nach Stein	$Q_{L,SF}$	0,5 [m³/(m³h)]	1,3 [m³/(m³h)]	0,9 [m³/(m³h)]
Gesamtluftbedarf	$Q_{L,SF,ges}$	240,0 [m³/h]	624,0 [m³/h]	432,0 [m³/h]
Rohrleitungsverluste angenommen	$\xi$	0,3 [m WS]	0,3 [m WS]	0,3 [m WS]
Wirkungsgrad	$\eta_{SF}$	62 [%]	55 [%]	60 [%]
mittlere Gebläseleistung	$P_{Gebel}$	2,8 [kW]	8,3 [kW]	5,3 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFG}$	68,3 [kWh/d]	200,3 [kWh/d]	127,1 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFG}$	2,8 [Wh/m³]	8,2 [Wh/m³]	5,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFG}$	0,25 [kWh/(E·a)]	0,73 [kWh/(E·a)]	0,46 [kWh/(E·a)]
<b>Räumer:</b>				
Anzahl der Räumer	$n_{Räumer}$	2,00 [stk]	2,00 [stk]	2,00 [stk]
Laufzeit	$t_{SFR}$	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]
Leistung Räumer	$P_{SFR}$	0,30 [kW]	1,00 [kW]	0,80 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFR}$	1,2 [kWh/d]	4,0 [kWh/d]	3,2 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFR}$	0,05 [Wh/m³]	0,16 [Wh/m³]	0,13 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFR}$	0,00 [kWh/(E·a)]	0,01 [kWh/(E·a)]	0,01 [kWh/(E·a)]
<b>Sandentnahmepumpe</b>				
Laufzeit	$t_{SFP}$	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]
Leistung Pumpe	$P_{SFP}$	8,00 [kW]	8,00 [kW]	8,00 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFP}$	16,0 [kWh/d]	16,0 [kWh/d]	16,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFP}$	0,7 [Wh/m³]	0,7 [Wh/m³]	0,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFP}$	0,06 [kWh/(E·a)]	0,06 [kWh/(E·a)]	0,06 [kWh/(E·a)]
<b>Sandgutwäscher</b>				
Laufzeit	$t_{SFw}$	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]
Leistung wäscher	$P_{SFw}$	15,00 [kW]	15,00 [kW]	15,00 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFW}$	30,0 [kWh/d]	30,0 [kWh/d]	30,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	1,2 [Wh/m³]	1,2 [Wh/m³]	1,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	0,11 [kWh/(E·a)]	0,11 [kWh/EWa]	0,11 [kWh/(E·a)]
<b>Summe Sandfang</b>				
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SF}$	115,55 [kWh/d]	250,32 [kWh/d]	176,33 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	4,72 [Wh/m³]	10,22 [Wh/m³]	7,20 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	0,42 [kWh/(E·a)]	0,91 [kWh/(E·a)]	0,64 [kWh/(E·a)]

#### 7.2.4.4 Vorklärung

Der Energiebedarf der Vorklärung ist maßgeblich von der Summe des Verbrauchs der Primärschlammumpen und der Räumer bestimmt.

Tabelle 7-12: Energiebedarf Vorklärung, 100.000 E

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,AM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Primärschlammanfall	$Q_{PS}$	180,0 [m³/d]	180,0 [m³/d]	180,0 [m³/d]
<b>PS Pumpwerk</b>				
Anzahl Pumpen	n	2 [stk]	2 [stk]	2 [stk]
Förderhöhe	h	4,00 [m]	4,00 [m]	4,00 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,70 [-]	0,30 [-]	0,45 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s]	9,81 [m/s]	9,81 [m/s]
Pumpenleistung	P	0,12 [kW]	0,27 [kW]	0,18 [kW]
Laufzeit	t	12 [h/d]	12 [h/d]	12 [h/d]
Energieverbrauch je Pumpe	$E_{abs,VKP}$	1,4 [kWh/d]	3,3 [kWh/d]	2,2 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VKP}$	15,6 [Wh/m³]	36,3 [Wh/m³]	24,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VKP}$	0,1 [Wh/m³]	0,3 [Wh/m³]	0,2 [Wh/m³]
<b>VKB Räume</b>				
Anzahl Räume	n	2 [stk]	2 [stk]	2 [stk]
Leistung Räume	P	0,3 [kW/Becken]	1,0 [kW/Becken]	0,8 [kW/Becken]
Laufzeit Räume	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Energiebedarf Räume	$E_{abs,VK,R}$	7,20 [kWh/d]	24,00 [kWh/d]	19,20 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VK,R}$	0,6 [Wh/m³]	2,0 [Wh/m³]	1,6 [Wh/m³]
<b>gesamt VKB</b>				
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VK}$	0,7 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VK}$	0,063 [Wh/(E·a)]	0,199 [Wh/(E·a)]	0,156 [Wh/(E·a)]

Wie der Tabelle 7-12 zu entnehmen ist, ergibt sich insgesamt ein spezifischer Gesamtenergieverbrauch für die Vorklärung in einem Bereich zwischen 0,063 und 0,199 kWh/(E·a). Durch die gewählten Annahmen ermittelt sich der spezifische Energiebedarf für die Verfahrensstufe Vorklärung zu 0,156 kWh/(E·a).

#### 7.2.4.5 Belebung

Innerhalb der klassischen Modellanlage ohne Berücksichtigung der vierten Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination stellt die Belüftung der Belebung den größten energetischen Verbraucher dar. Dabei ist der Energiebedarf im Wesentlichen abhängig von der einzutragenden Luftmenge und der daraus resultierenden Laufzeit der Gebläse.

**Tabelle 7-13: Energiebedarf Belüftung Belebung, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
Jahreswassermenge Mischwasser	$Q_M$	8.942.500 [m³/a]	8.942.500 [m³/a]	8.942.500 [m³/a]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Volumen Deni	$V_D$	14.473 [m³]	14.473 [m³]	14.473 [m³]
Volumen Nitri	$V_N$	13.917 [m³]	13.917 [m³]	13.917 [m³]
<b>Belüftung</b>				
Einblastiefe BB	$h_{E,BB}$	5,0 [m]	5,0 [m]	5,0 [m]
Grenzflächenfaktor	$\alpha_{BB}$	0,69 [-]	0,69 [-]	0,69 [-]
Luftdichte bei 20°C	$\rho$	1,2 [kg/m³]	1,2 [kg/m³]	1,2 [kg/m³]
Massenprozentanteil O <sub>2</sub> in Luft	$C_{O_2, Luft}$	23,14 [%]	23,14 [%]	23,14 [%]
erforderliche mittlere Sauerstoffzufuhr pro Tag	erf. $\alpha OC_d$	8.762 [kgO <sub>2</sub> /d]	8.762 [kgO <sub>2</sub> /d]	8.762 [kgO <sub>2</sub> /d]
erforderliche mittlere Sauerstoffzufuhr pro Stunde	erf. $\alpha OC_h$	365 [kgO <sub>2</sub> /h]	365 [kgO <sub>2</sub> /h]	365 [kgO <sub>2</sub> /h]
Sauerstoffbedarf für BB in Reinwasser	$OC_R$	12.700 [kgO <sub>2</sub> /d]	12.700 [kgO <sub>2</sub> /d]	12.700 [kgO <sub>2</sub> /d]
spez. Sauerstoffzufuhr	$OC_{L,h}$	21,00 g/Nm³/m	21,00 g/Nm³/m	21,00 g/Nm³/m
Luftbedarf BB pro Tag	$Q_{L,d, BB}$	121.000 [Nm³/d]	121.000 [Nm³/d]	121.000 [Nm³/d]
Gebälgedruck	$\Delta P$	6,00 [mWS]	6,00 [mWS]	6,00 [mWS]
Wirkungsgrad Gebläse	$\eta$	0,77 [-]	0,68 [-]	0,70 [-]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs, BB}$	2.569 [kWh/d]	2.909 [kWh/d]	2.826 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez, BB}$	104,9 [Wh/m³]	118,7 [Wh/m³]	115,3 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez, BB}$	9,4 [kWh/(E·a)]	10,6 [kWh/(E·a)]	10,3 [kWh/(E·a)]

Der spezifische Gesamtenergieverbrauch für die Belüftung der Belebung liegt in einem Bereich zwischen 9,4 und 10,6 kWh/(E·a), dargestellt in der Tabelle 7-13. Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Belüftung der Belebung ein spezifischer Energiebedarf von 10,3 kWh/(E·a).

Weiterhin werden der Belebung die Verbraucher Rezirkulationspumpen, Rührwerke und Rücklaufschlammumpen zugeordnet:

Tabelle 7-14: Energiebedarf restliche Verbraucher Belegung, 100.000 E

<b>Rezipumpen</b>				
Reziverhältnis	R	3,0 [-]	3,0 [-]	3,0 [-]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
zu fördernde Wassermenge	Q	73.500,0 [m³/d]	73.500,0 [m³/d]	73.500,0 [m³/d]
Förderhöhe	h	0,5 [m]	0,5 [m]	0,5 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	η	0,80 [-]	0,65 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,8 [m/s]	9,8 [m/s]	9,8 [m/s]
Pumpenleistung	P	5,2 [kW]	6,4 [kW]	6,0 [kW]
Laufzeit	t	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	E <sub>abs,RZ</sub>	125,2 [kWh/d]	77,0 [kWh/d]	71,5 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,RZ</sub>	10,2 [Wh/m³]	6,3 [Wh/m³]	5,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,RZ</sub>	0,9 [kWh/(E·a)]	0,6 [kWh/(E·a)]	0,5 [kWh/(E·a)]
<b>Rührwerke</b>				
Laufzeit	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Volumen zur Umwälzung Deni	V <sub>D</sub>	14.473 [m³]	14.473 [m³]	14.473 [m³]
spezifische Energie	E <sub>spez</sub>	1,5 [W/m³]	1,5 [W/m³]	1,5 [W/m³]
Energiebedarf im Becken	E <sub>Becken</sub>	21.709,8 [W]	21.709,8 [W]	21.709,8 [W]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,RW</sub>	521,03 [kWh/d]	521,03 [kWh/d]	521,03 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,RW</sub>	21,3 [Wh/m³]	21,3 [Wh/m³]	21,3 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,RW</sub>	1,9 [kWh/(E·a)]	1,9 [kWh/(E·a)]	1,9 [kWh/(E·a)]
<b>RLS Pumpwerk</b>				
Rücklaufverhältnis	RV	1,0 [-]	1,0 [-]	1,0 [-]
Geförderete Wassermenge	Q	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Förderhöhe	h	1,5 [m]	1,5 [m]	1,5 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	η	0,75 [-]	0,65 [-]	0,70 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpenleistung	P	5,6 [kW]	6,4 [kW]	6,0 [kW]
Laufzeit	t	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	E <sub>abs,RLS</sub>	66,8 [kWh/d]	77,0 [kWh/d]	71,5 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,RLS</sub>	5,5 [Wh/m³]	6,3 [Wh/m³]	5,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,RLS</sub>	0,49 [kWh/(E·a)]	0,56 [kWh/(E·a)]	0,52 [kWh/(E·a)]

Wie der Tabelle 7-14 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergieverbrauch für die restlichen Verbraucher der Belegung in einem Bereich zwischen 0,49 und 0,56 kWh/(E·a). Durch die gewählten Annahmen errechnet sich in Summe ein spezifischer Energiebedarf von 0,52 kWh/(E·a).

#### 7.2.4.6 Nachklärung

Der Energiebedarf der Nachklärung setzt sich aus dem Verbrauch der Überschussschlammumpen und der Räumern zusammen. Bei Betrachtung der Pumpen und der zu fördernden Schlammmenge ist festzuhalten, dass sich die Schlammmenge bei Einsatz von Pulveraktivkohle durch die Rezirkulation geringfügig erhöht. Es kann von einer Steigerung von etwa 5 % ausgegangen werden.

**Tabelle 7-15: Energiebedarf Nachklärung mit PAK, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
<b><u>Wassermengen</u></b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Anzahl Becken	n	2 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
<b><u>ÜSS Pumpwerk</u></b>				
Geförderete Schlammmenge (inkl. PAK)	$Q_{ÜSS}$	709 [m³/d]	709 [m³/d]	709 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Förderhöhe	h	4,0 [m]	4,0 [m]	4,0 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,8 [-]	0,6 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpenleistung	P	0,4 [kW]	0,5 [kW]	0,5 [kW]
Laufzeit	t	6,0 [h/d]	6,0 [h/d]	6,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	$E_{abs,ÜSS}$	2,4 [kWh/d]	3,2 [kWh/d]	2,8 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,ÜSS}$	0,2 [Wh/m³]	0,3 [Wh/m³]	0,2 [Wh/m³]
<b><u>NKB Räumler</u></b>				
Anzahl Räumler	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Wirkleistung Räumler	P	0,3 [kW/Becken]	1,0 [kW/Becken]	0,7 [kW/Becken]
Laufzeit Räumler	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut	$E_{Räumler,NKB}$	14 [kWh/d]	48 [kWh/d]	34 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB,R}$	0,6 [Wh/m³]	2,0 [Wh/m³]	1,4 [Wh/m³]
<b><u>gesamt NKB</u></b>				
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,8 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,6 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,070 [kWh/(E·a)]	0,199 [kWh/(E·a)]	0,143 [kWh/(E·a)]

Wie der Tabelle 7-15 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergieverbrauch für die Verbrauch der Nachklärung in einem Bereich zwischen 0,07 und 0,199 kWh/(E·a). Durch die gewählten Annahmen errechnet sich in Summe ein spezifischer Energiebedarf von 0,143 kWh/(E·a).

Im Falle einer Ozonung als vierte Reinigungsstufe erfolgt verfahrenstechnisch keinerlei Rückführung von Feststoffen in die Belebung. Die zu fördernde Schlammmenge erhöht sich daher nicht und der Energiebedarf der Überschussschlammumpfen fällt demnach geringer aus, als bei der Modellanlage mit Pulveraktivkohle.

**Tabelle 7-16: Energiebedarf Nachklärung mit Ozonung, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Anzahl Becken	n	2 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
<b>ÜSS Pumpwerk</b>				
Geförderete Schlammmenge	$Q_{ÜSS}$	699 [m³/d]	699 [m³/d]	699 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Förderhöhe	h	4,0 [m]	4,0 [m]	4,0 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,8 [-]	0,6 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpenleistung	P	0,4 [kW]	0,5 [kW]	0,5 [kW]
Laufzeit	t	6,0 [h/d]	6,0 [h/d]	6,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	$E_{abs,ÜSS}$	2,4 [kWh/d]	3,2 [kWh/d]	2,7 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,ÜSS}$	0,2 [Wh/m³]	0,3 [Wh/m³]	0,2 [Wh/m³]
<b>NKB Räumler</b>				
Anzahl Räumler	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Wirkleistung Räumler	P	0,3 [kW/Becken]	1,0 [kW/Becken]	0,7 [kW/Becken]
Laufzeit Räumler	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut	$E_{Räumler,NKB}$	14 [kWh/d]	48 [kWh/d]	34 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB,R}$	0,6 [Wh/m³]	2,0 [Wh/m³]	1,4 [Wh/m³]
<b>gesamt NKB</b>				
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,8 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,6 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,070 [kWh/(E·a)]	0,198 [kWh/(E·a)]	0,143 [kWh/(E·a)]

Wie der Tabelle 7-16 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergieverbrauch für die Nachklärung mit Ozonung in einem Bereich zwischen 0,07 und 0,198 kWh/(E·a). Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Nachklärung mit Ozonung ein spezifischer Energiebedarf von 0,143 kWh/(E·a).

Bei Betrachtung des spezifischen Gesamtenergieverbrauchs der Nachklärung hat die geringfügige Erhöhung des Energiebedarfs der Pumpen durch die erhöhte Schlammmenge beim Einsatz von PAK allerdings nahezu keinen Einfluss.

#### 7.2.4.7 Ozonung (Variante A)

Bei der Ozonung entsteht, wie bereits in Kapitel 7.2.2 erläutert, der Energieverbrauch durch das Heben des Abwassers, die Ozonerzeugung, den Eintrag und die Restozonvernichtung sowie den Einsatz eines Kühlaggregates.

Die einzelnen Verbrauchspositionen sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet. Die Ozondosis wird mit 5,0 g/m³ angesetzt. Dies entspricht einem mittleren Wert gemäß der in Phase I „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] untersuchten Bandbreite von 2,5 g/m³ bis 15,0 g/m³.

Bei der Betrachtung der angesetzten Abwassermenge ist zu berücksichtigen, dass für die vierte Reinigungsstufe lediglich der Trockenwetterzulauf behandelt und somit für den Energiebedarf angesetzt wird. Eine Behandlung des Regenwetterzulaufs wird analog zu den Beispielen aus der Recherche in Phase I „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] und den untersuchten Anlagen nicht vorgesehen.

Dies führt dazu, dass sich bei der Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs der vierten Reinigungsstufe Unterschiede bei den Bezugsgrößen Wassermenge und Einwohner pro Jahr ergeben.

Der spezifische Energiebedarf, bezogen auf Einwohner und Jahr, ermittelt sich aus der behandelten Abwassermenge und den Einzelenergiewerten der Verfahrensstufen, angegeben in Wh/m<sup>3</sup>. Der spez. Energiebedarf, bezogen auf die Wassermengen, setzt sich aus den Einzelangaben von Herstellern und Literatúrauswertung der Verfahrensstufen zusammen, die in den jeweiligen Tabellen dargestellt sind.

**Tabelle 7-17: Energiebedarf Ozonung, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q <sub>T,d,aM</sub>	17.500 [m <sup>3</sup> /d]	17.500 [m <sup>3</sup> /d]	17.500 [m <sup>3</sup> /d]
Förderhöhe	h	0,0 [m]	10,0 [m]	5,0 [m]
Energie Hebewerk 70% WG	E <sub>HW</sub>	0,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]	40,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]	20,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Ozonerzeugung	E <sub>O<sub>3</sub>,Erz</sub>	8 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	14 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	10 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]
Energiebedarf für Ozondosis 5,0 g/m <sup>3</sup>	E <sub>O<sub>3</sub>,5,0</sub>	40 [Wh/m <sup>3</sup> ]	70 [Wh/m <sup>3</sup> ]	55 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Ein und Austrag	E <sub>O<sub>3</sub>,I/O</sub>	0 [Wh/m <sup>3</sup> ]	20 [Wh/m <sup>3</sup> ]	10 [Wh/m <sup>3</sup> ]
katalytische Restozonvernichtung	E <sub>O<sub>3</sub>,Rest</sub>	0 [Wh/m <sup>3</sup> ]	10 [Wh/m <sup>3</sup> ]	0 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Kühlaggregat	E <sub>O<sub>3</sub>,Kühlung</sub>	10 [Wh/m <sup>3</sup> ]	50 [Wh/m <sup>3</sup> ]	20 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,Ozon</sub>	50,00 [Wh/m <sup>3</sup> ]	190,00 [Wh/m <sup>3</sup> ]	105,00 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,Ozon</sub>	3,19 [kWh/(E·a)]	12,14 [kWh/(E·a)]	6,71 [kWh/(E·a)]

Wie der Tabelle 7-17 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergieverbrauch für die Ozonung in einem Bereich zwischen 3,19 und 12,14 kWh/(E·a). Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Ozonung ein spezifischer Energiebedarf von 6,71 kWh/(E·a).

Es ist ersichtlich, dass innerhalb der Ozonung mit ca. 55 Wh/m<sup>3</sup> der spezifisch größte Anteil an Energie für die Erzeugung des Ozons verbraucht wird. Der Ein- und Austrag des Ozons sowie die Restozonvernichtung tragen in Summe nur geringfügig zum Energiebedarf bei.

#### 7.2.4.8 PAK (Variante B)

Für die Entfernung der Spurenstoffe mittels Pulveraktivkohle wird innerhalb der Modellanlage nur der Energiebedarf betrachtet, der auch tatsächlich auf der Kläranlage anfällt. Der Energiebedarf für die Herstellung oder den Transport der Pulveraktivkohle, wie im Bericht „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [PINNEKAMP ET AL., 2011] ermittelt, fließt nicht in die Energiebilanz mit ein.

Es wird davon ausgegangen, dass das Abwasser im Ablauf der Nachklärung zunächst durch ein Hebewerk ca. 5 m gehoben wird. Anschließend wird Energie für die Zugabe der Pulveraktivkohle in das Kontaktbecken, das Rühren und die Rezirkulation zurück in die Belebung benötigt.

Der nachfolgende Sandfilter wird für die Modellanlage mit 100.000 E als eigenständige Reinigungsstufe betrachtet und sein Energieverbrauch separat bestimmt (siehe Abschnitt 7.2.4.9).

Da pulverisierte Aktivkohle nicht vom Schlamm abgetrennt werden kann, wird die verbrauchte Kohle nach Rückführung in die Belebung mit dem Klärschlamm entnommen und entsorgt. Durch die Erhöhung der Schlammmenge ergibt sich somit in Folge ein Einfluss auf die relevanten Verbraucher der Schlammbehandlung wie z. B. Überschussschlammumpfen. Dies ist an entsprechender Stelle für den Verbrauch der jeweiligen Aggregate berücksichtigt und erläutert. Der Energiebedarf für die Zugabe von Fällmitteln und/oder Flockungshilfsmitteln ist durch die geringen verwendeten Mengen für die Gesamtbilanz nicht relevant und kann, wie bereits in Phase I [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011], vernachlässigt werden.

**Tabelle 7-18: Energiebedarf Pulveraktivkohle, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	17.500 [m <sup>3</sup> /d]	17.500 [m <sup>3</sup> /d]	17.500 [m <sup>3</sup> /d]
<b><u>Pulveraktivkohle</u></b>				
Förderhöhe	h	0,0 [m]	10,0 [m]	5,0 [m]
Energie Hebewerk 70% WG	$E_{HW}$	0,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]	40,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]	20,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energie für PAK Zugabe, Rühren, Rezirkulieren	$E_{HW}$	10,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]	40,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]	25,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez.PAK}$	10,00 [Wh/m <sup>3</sup> ]	80,00 [Wh/m <sup>3</sup> ]	45,00 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez.PAK}$	0,6 [kWh/(E·a)]	5,1 [kWh/(E·a)]	2,9 [kWh/(E·a)]
zusätzlich in BB rückgeführte Feststoffmenge 5%	$Q_{PAK}$	10,5 [m <sup>3</sup> /d]	10,5 [m <sup>3</sup> /d]	10,5 [m <sup>3</sup> /d]

Wie der Tabelle 7-18 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergieverbrauch für die Pulveraktivkohle in einem Bereich zwischen 0,6 und 5,1 kWh/(E·a). Die gewählten Annahmen ergeben in Summe für die Pulveraktivkohle einen spezifischen Energiebedarf der Verfahrensstufe PAK von 2,9 kWh/(E·a). Die Berechnung des Energiebedarfs bezieht sich analog zur Ozonung wiederum auf die Trockenwettermenge, wie bereits in den Erläuterungen zu Tabelle 7-17 beschrieben.

Aus den in Phase I [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] ermittelten Daten kann entnommen werden, dass der Energiebedarf innerhalb der Kläranlage nahezu unabhängig von der eingebrachten PAK-Dosis ist.

#### 7.2.4.9 Flockungsfiltration

Innerhalb des Abschlussberichtes aus Phase I [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] wurde für den Energiebedarf einer Sandfiltration ein Wert von rund 50 Wh/m<sup>3</sup> angesetzt. Die Informationen zum Energiebedarf von Flockungsfiltrationen im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] sind detaillierter und werden für die Berechnung der Modellanlage als Grundlage verwendet. Insgesamt setzt sich die Sandfiltration aus den Verbrauchern Beschickung, Fällmitteldosierung, Spülluft, Spülwasser und Schlammrückführung zusammen. Nachfolgend ist in Tabelle 7-19 der Energiebedarf der Sandfiltration tabellarisch dargestellt. In Summe ergibt sich ein spezifischer Gesamtenergiebedarf von 2,0 kWh/(E·a).

**Tabelle 7-19: Energiebedarf Filtration, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Abwassermenge	Q <sub>M,d</sub>	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>2 Schicht Raumfilter</b>				
Förderhöhe	h	3,0 [m]	3,0 [m]	3,0 [m]
Beschickungspumpe	E <sub>BP</sub>	15,0 [Wh/m³]	15,0 [Wh/m³]	15,0 [Wh/m³]
Flockungsmitteldosierung	E <sub>FM</sub>	0,20 [Wh/m³]	0,20 [Wh/m³]	0,20 [Wh/m³]
Spülluft	E <sub>SL</sub>	1,20 [Wh/m³]	1,20 [Wh/m³]	1,20 [Wh/m³]
Spülwasser	E <sub>SW</sub>	3,00 [Wh/m³]	3,00 [Wh/m³]	3,00 [Wh/m³]
Schlammwasserrückführung	E <sub>SR</sub>	3,00 [Wh/m³]	3,00 [Wh/m³]	3,00 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	22,40 [Wh/m³]	22,40 [Wh/m³]	22,40 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	2,00 [kWh/(E·a)]	2,00 [kWh/(E·a)]	2,00 [kWh/(E·a)]

#### 7.2.4.10 Voreindickung

Ähnlich wie bei der Nachklärung ist auch die Voreindickung eine Verfahrensstufe, deren Energiebedarf abhängig von der zugeführten Schlammmenge anzusetzen ist. Daher wird an dieser Stelle sowohl der Energiebedarf ohne erhöhte Schlammmenge (Ozonung) als auch mit erhöhter Schlammmenge (PAK) dargestellt:

**Tabelle 7-20: Energiebedarf Voreindickung mit Ozonung, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
ÜSS Menge täglich	Q <sub>ÜSS</sub>	699 [m³/d]	699 [m³/d]	699 [m³/d]
PS Menge täglich	Q <sub>PS</sub>	180 [m³/d]	180 [m³/d]	180 [m³/d]
<b>statische Eindickung PS</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,PS</sub>	0,05 [kWh/m³]	0,30 [kWh/m³]	0,15 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,PS</sub>	9,0 [kWh/d]	54,0 [kWh/d]	27,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,PS</sub>	0,4 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,1 [Wh/m³]
<b>Siebtrommel</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,ÜSS</sub>	0,20 [kWh/m³]	0,40 [kWh/m³]	0,30 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,ÜSS</sub>	139,8 [kWh/d]	279,6 [kWh/d]	209,7 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,ÜSS</sub>	5,7 [Wh/m³]	11,4 [Wh/m³]	8,6 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,VE</sub>	6,1 [Wh/m³]	13,6 [Wh/m³]	9,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,VE</sub>	0,3 [kWh/m³]	0,7 [kWh/m³]	0,5 [kWh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,VE</sub>	0,5 [kWh/(E·a)]	1,0 [kWh/(E·a)]	0,8 [kWh/(E·a)]

Wie der Tabelle 7-20 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergieverbrauch für die Voreindickung in einem Bereich zwischen 0,5 und 1,0 kWh/(E·a). Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Voreindickung ein spezifischer Energiebedarf von 0,8 kWh/(E·a).

Wie der Tabelle 7-21 zu entnehmen ist, ergibt sich bei der Rezirkulation der Pulveraktivkohle in die Belebung und der dadurch erhöhten Überschussschlammmenge ein minimal gesteigerter Energiebedarf der Siebtrommeln. Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Voreindickung ein spezifischer Energiebedarf von 0,8 kWh/(E·a).

**Tabelle 7-21: Energiebedarf Voreindickung PAK, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
ÜSS Menge täglich	Q <sub>ÜSS</sub>	709 [m³/d]	709 [m³/d]	709 [m³/d]
PS Menge täglich	Q <sub>PS</sub>	180 [m³/d]	180 [m³/d]	180 [m³/d]
<b>statische Eindickung PS</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,PS</sub>	0,05 [kWh/m³]	0,30 [kWh/m³]	0,15 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,PS</sub>	9,0 [kWh/d]	54,0 [kWh/d]	27,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,PS</sub>	0,4 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,1 [Wh/m³]
<b>Siebtrommel</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,ÜSS</sub>	0,20 [kWh/m³]	0,40 [kWh/m³]	0,30 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,ÜSS</sub>	141,9 [kWh/d]	283,8 [kWh/d]	212,8 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,ÜSS</sub>	5,8 [Wh/m³]	11,6 [Wh/m³]	8,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,VE</sub>	6,2 [Wh/m³]	13,8 [Wh/m³]	9,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,VE</sub>	0,3 [kWh/m³]	0,7 [kWh/m³]	0,5 [kWh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,VE</sub>	0,5 [kWh/(E·a)]	1,0 [kWh/(E·a)]	0,8 [kWh/(E·a)]

#### 7.2.4.11 Stabilisierung

Für die Stabilisierung des Rohschlammes, der sich aus Überschussschlamm der Belebung und Primärschlamm der Vorklärung zusammensetzt, wurde eine anaerobe Faulungsanlage mit einem Volumen von 4.300 m³ ausgelegt.

Je nachdem welches Verfahren zur Elimination der Spurenstoffe in der Modellanlage betrachtet wird, ändert sich, wie bereits erläutert, die Schlammmenge geringfügig.

Wie der Tabelle 7-22 zu entnehmen ist, liegt der Energiebedarf nach DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013] und „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] zwischen 1,6 und 2,3 kWh/m³ Faulschlamm bzw. zwischen 14 und 20 Wh/m³ Abwasser. Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Faulung mit Ozonung ein spezifischer Energiebedarf von 1,46 kWh/(E·a).

**Tabelle 7-22: Energiebedarf Faulung 100.000 E mit Ozonung**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Rohschlammmenge	Q <sub>RS</sub>	200 [m³/d]	200 [m³/d]	200 [m³/d]
Faulbehältervolumen	V <sub>F</sub>	4.300 [m³]	4.300 [m³]	4.300 [m³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t <sub>bem</sub>	20 [d]	20 [d]	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t <sub>mittel</sub>	27 [d]	27 [d]	27 [d]
<b>Gesamt</b>				
Energieverbrauch anaerob mesophil spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	1,6 [kWh/m³]	2,3 [kWh/m³]	2,0 [kWh/m³]
Energieverbrauch anaerob mesophil spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	320,0 [kWh/d]	460,0 [kWh/d]	400,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	14 [Wh/m³]	20 [Wh/m³]	17 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	1,17 [kWh/(E·a)]	1,68 [kWh/(E·a)]	1,46 [kWh/(E·a)]

Für die Modellanlage mit Pulveraktivkohle als gewählte vierte Reinigungsstufe wird die Schlammmenge der Faulung um 5 % erhöht. Wie in der Tabelle 7-23 dargestellt, erhöht sich durch die gesteigerte Schlammmenge der spezifische Energiebedarf (elektrisch) um 1,0 kWh/(E·a) auf insgesamt 18 kWh/(E·a) für die gewählten Annahmen.

**Tabelle 7-23: Energiebedarf Faulung 100.000 E mit PAK**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Rohschlammmenge	$Q_{RS}$	210 [m <sup>3</sup> /d]	210 [m <sup>3</sup> /d]	210 [m <sup>3</sup> /d]
Faulbehältervolumen	$V_F$	4.300 [m <sup>3</sup> ]	4.300 [m <sup>3</sup> ]	4.300 [m <sup>3</sup> ]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	$t_{bem}$	20 [d]	20 [d]	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	$t_{mittel}$	27 [d]	27 [d]	27 [d]
<b>Gesamt</b>				
Energieverbrauch anaerob mesophil spezifisch	$E_{spez,F}$	1,6 [kWh/m <sup>3</sup> ]	2,3 [kWh/m <sup>3</sup> ]	2,0 [kWh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch anaerob mesophil spezifisch	$E_{spez,F}$	336,0 [kWh/d]	483,0 [kWh/d]	420,0 [kWh/d]
Energieverbrauch gesamt spezifisch	$E_{spez,F}$	15 [Wh/m <sup>3</sup> ]	21 [Wh/m <sup>3</sup> ]	18,0 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch gesamt spezifisch	$E_{spez,F}$	1,23 [kWh/(E·a)]	1,76 [kWh/(E·a)]	1,53 [kWh/(E·a)]

#### 7.2.4.12 Entwässerung

Die Entwässerung des ausgefaulten Schlammes erfolgt in der Modellanlage über eine Hochleistungszentrifuge. Diese ist nach Auswertung der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] auf 19 der 35 Kläranlagen (siehe Tabelle 7-1) in dem betrachteten Bereich zwischen 100.000 – 150.000 E vorhanden. Nach aktuellen Angaben im Arbeitsblatt der DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013] beträgt der Energieverbrauch von Hochleistungszentrifugen zwischen 1,3 und 1,8 kWh/m<sup>3</sup> entwässertem Faulschlamm bzw. zwischen 10,6 und 14,7 Wh/m<sup>3</sup> Abwasser. Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Entwässerung ein spezifischer Energiebedarf von 1,1 kWh/(E·a).

**Tabelle 7-24: Energiebedarf Entwässerung 100.000 E mit Ozonung**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Faulschlammmenge	$Q_{FS}$	200 [m <sup>3</sup> /d]	200 [m <sup>3</sup> /d]	200 [m <sup>3</sup> /d]
<b>Hochleistungszentrifuge</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	$E_{spez,Ent}$	1,3 [kWh/m <sup>3</sup> ]	1,8 [kWh/m <sup>3</sup> ]	1,5 [kWh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,Ent}$	260 [kWh/d]	360 [kWh/d]	300 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ent}$	10,6 [Wh/m <sup>3</sup> ]	14,7 [Wh/m <sup>3</sup> ]	12,2 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ent}$	0,95 [kWh/(E·a)]	1,31 [kWh/(E·a)]	1,10 [kWh/(E·a)]

Für die Modellanlage mit Pulveraktivkohle als gewählte vierte Reinigungsstufe erhöht sich aufgrund der um 5 % erhöhten Schlammmenge der spezifische Energieverbrauch um 0,05 kWh/(E·a) auf insgesamt 1,15 kWh/(E·a) für die gewählten Annahmen.

**Tabelle 7-25: Energiebedarf Entwässerung 100.000 E mit PAK**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Faulschlammmenge	$Q_{FS}$	210 [m <sup>3</sup> /d]	210 [m <sup>3</sup> /d]	210 [m <sup>3</sup> /d]
<b>Hochleistungszentrifuge</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	$E_{spez,Ent}$	1,3 [kWh/m <sup>3</sup> ]	1,8 [kWh/m <sup>3</sup> ]	1,5 [kWh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,Ent}$	273 [kWh/d]	378 [kWh/d]	315 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ent}$	11,1 [Wh/m <sup>3</sup> ]	15,4 [Wh/m <sup>3</sup> ]	12,9 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ent}$	1,00 [kWh/(E·a)]	1,38 [kWh/(E·a)]	1,15 [kWh/(E·a)]

#### 7.2.4.13 Infrastruktur

Die energetischen Verbraucher der Infrastruktur setzen sich aus den wesentlichen Bestandteilen Betriebsmittel, Lüftung, Betriebsgebäude und Abluftreinigung zusammen. Bezogen auf den Gesamtverbrauch der Modellanlage kommt diesen Verbrauchern eine

untergeordnete Bedeutung zu. Der Anteil des Energiebedarfs beträgt 1,6 kWh/(E·a). Eine ausführliche Erläuterung der einzelnen Verbraucher erfolgt im Rahmen der Erstellung der Modellanlage nicht.

**Tabelle 7-26: Energiebedarf Infrastruktur 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
<b>Infrastruktur</b>				
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>Betriebsgebäude</b>				
Licht, Labor Werkstatt	$E_a$	50 [kWh/d]	50 [kWh/d]	50 [kWh/d]
Licht, Labor Werkstatt	$E_{Spez}$	0,18 [kWh/(E·a)]	0,18 [kWh/(E·a)]	0,18 [kWh/(E·a)]
<b>Betriebsmittel</b>				
Brauchwasser	$E_a$	70 [kWh/d]	70 [kWh/d]	70 [kWh/d]
Brauchwasser	$E_{Spez}$	0,26 [kWh/(E·a)]	0,26 [kWh/(E·a)]	0,26 [kWh/(E·a)]
Druckluft	$E_a$	13 [kWh/d]	13 [kWh/d]	13 [kWh/d]
Druckluft	$E_{Spez}$	0,05 [kWh/(E·a)]	0,05 [kWh/(E·a)]	0,05 [kWh/(E·a)]
Heizung	$E_a$	100 [kWh/d]	100 [kWh/d]	100 [kWh/d]
Heizung	$E_{Spez}$	0,37 [kWh/(E·a)]	0,37 [kWh/(E·a)]	0,37 [kWh/(E·a)]
<b>Lüftungsanlagen</b>				
	$E_a$	40 [kWh/d]	40 [kWh/d]	40 [kWh/d]
	$E_{Spez}$	0,15 [kWh/(E·a)]	0,15 [kWh/(E·a)]	0,15 [kWh/(E·a)]
<b>Abluftreinigung</b>				
	$E_a$	160 [kWh/d]	160 [kWh/d]	160 [kWh/d]
	$E_{Spez}$	0,58 [kWh/(E·a)]	0,58 [kWh/(E·a)]	0,58 [kWh/(E·a)]
Energieverbrauch absolut	$E_a$	433 [kWh/d]	433 [kWh/d]	433 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{Spez}$	17,7 [Wh/m³]	17,7 [Wh/m³]	17,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez}$	1,6 [kWh/(E·a)]	1,6 [kWh/(E·a)]	1,6 [kWh/(E·a)]

## 7.2.5 Gesamter Energiebedarf Modellanlage

Nachdem alle wesentlichen Verbraucher bezüglich ihres Energiebedarfs für die Modellanlage mit 100.000 E dargestellt sind, erfolgt im Anschluss eine zusammenfassende Gegenüberstellung der einzelnen Verfahrensstufen zum Gesamtenergiebedarf der Anlage mit Ozonung bzw. Pulveraktivkohle.

### 7.2.5.1 Ozonung (Variante A)

Zuerst wird die Modellanlage mit Ozonung als vierte Reinigungsstufe und nachgeschaltetem Sandfilter betrachtet. In nachfolgender Tabelle wird der spezifische Energiebedarf sowohl in Abhängigkeit der Abwassermenge als auch zu den angeschlossenen Einwohnern berechnet. Zusätzlich wird der prozentuale Anteil der jeweiligen Verfahrensstufe am Gesamtverbrauch dargestellt:

**Tabelle 7-27: Gesamtenergiebedarf Modellanlage 100.000 E mit Ozonung**

Verbraucher	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Anteil am Gesamtbedarf [%]
Zulaufhebewerk	14,86	1,33	5%
Rechen	0,84	0,08	0%
Sandfang	7,20	0,64	2%
Vorklärung einschl. PS Pumpwerk	1,75	0,16	1%
Belüftung BB	115,35	10,31	35%
Rührwerke	21,27	1,90	6%
RLS Pumpwerk	5,84	0,52	2%
Rezipumpe	5,84	0,52	2%
Nachklärung inkl. ÜSS PW	1,59	0,14	0%
Fällmittelzugabe	0,50	0,04	0%
Voreindickung	9,66	0,77	3%
Stabilisierung	17,14	1,46	5%
Entwässerung	12,24	1,10	4%
Flockungsfilter	22,40	2,00	7%
Ozonung	105,00	6,71*	23%
Infrastruktur	17,67	1,59	5%
<b>Summe:</b>	<b>359,15</b>	<b>29,28</b>	<b>100%</b>
* bezogen auf Trockenwetterzulauf			

In Summe ergibt sich ein Gesamtbedarf der Modellanlage mit Ozonung von etwa 359 Wh/m<sup>3</sup> bzw. 29,3 kWh/(E·a). Es ist erkennbar, dass die vierte Reinigungsstufe ausgeführt als Ozonung mit 23 % den zweitgrößten Anteil am Verbrauch der Gesamtanlage ausmacht. Erwartungsgemäß ist die Belüftung der Belebung der größte Verbraucher. Ihr sind rund 35 % des Gesamtenergieverbrauchs zuzuschreiben.

Der Energiebedarf der Modellanlage bezieht sich grundsätzlich auf den Mischwasserzulauf im Jahresmittel. In der vierten Reinigungsstufe wird jedoch aus Gründen der vorhandenen Spurenstoffkonzentration lediglich die Trockenwettermenge behandelt. Die spezifischen Energieverbrauchswerte der Einzelverbraucher liegen in Wh/m<sup>3</sup> vor, was zunächst unabhängig vom Mischwasser- oder Trockenwetterzulauf ist. Die Umrechnung in kWh/(Ea) erfolgt dann anschließend über die tatsächlich behandelte Wassermenge. Dies ist bei den herkömmlichen Verfahrensstufen der Kläranlage der tägliche Mischwasserabfluss im Jahresmittel ( $Q_{M,d,aM}$ ), für die vierte Reinigungsstufe aber der tägliche Trockenwetterabfluss im Jahresmittel ( $Q_{T,d,aM}$ ). Daher ergibt sich für die vierte Reinigungsstufe ein Wert, der nicht direkt in Relation zu den anderen Energiebedarfszahlen gesetzt werden kann.

Sowohl bei dem Hebewerk als auch bei der Ozonung werden mittlere Ansätze für die Berechnung des Energiebedarfs gewählt. Bei den übrigen Verfahrensstufen werden hinsichtlich Wirkungsgrad und spez. Energiebedarf die Idealwerte der Tabellen des DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013] angesetzt.

### 7.2.5.2 PAK (Variante B)

Der Gesamtenergieverbrauch der Modellanlage mit Einsatz von Pulveraktivkohle als vierte Reinigungsstufe ist in folgender Tabelle dargestellt. Der Gesamtenergieverbrauch beläuft sich in Summe auf etwa 301 Wh/m<sup>3</sup> bzw. 25,5 kWh/(E·a).

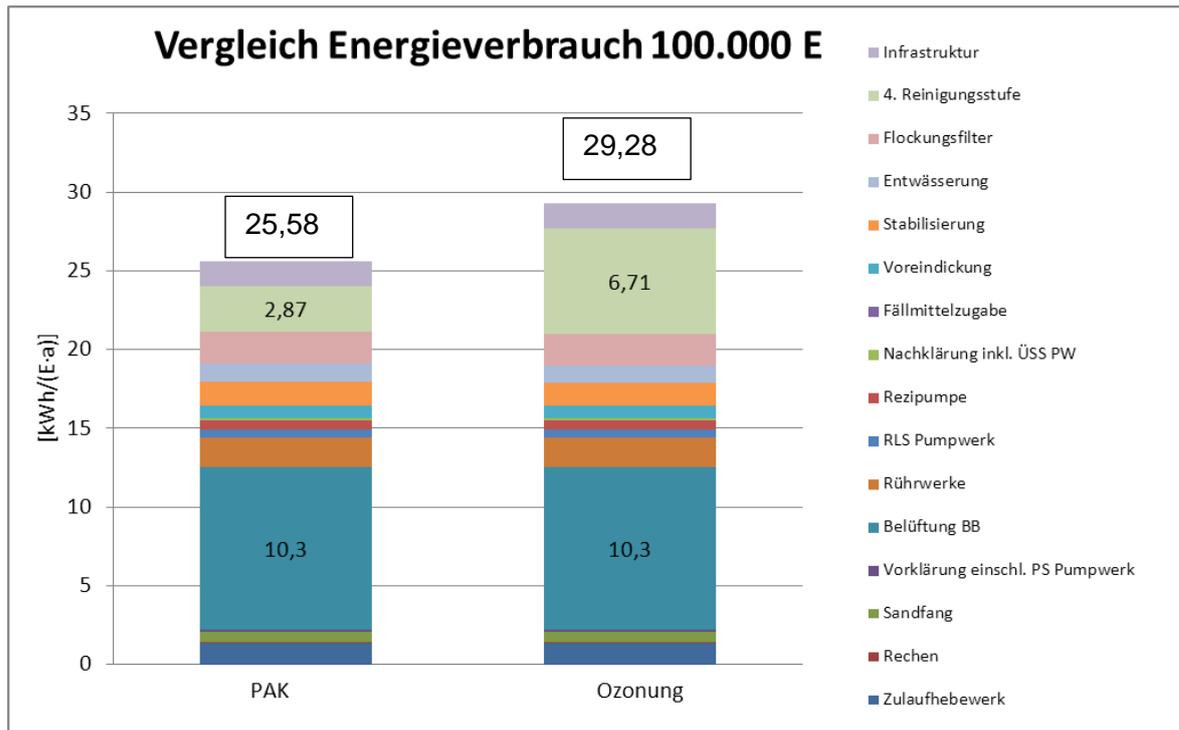
**Tabelle 7-28: Gesamtverbrauch Modellanlage 100.000 E mit PAK**

Verbraucher	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Anteil am Gesamtbedarf [%]
Zulaufhebwerk	14,86	1,33	5%
Rechen	0,84	0,08	0%
Sandfang	7,20	0,64	3%
Vorklärung einschl. PS Pumpwerk	1,75	0,16	1%
Belüftung BB	115,35	10,3	40%
Rührwerke	21,27	1,90	7%
RLS Pumpwerk	5,84	0,52	2%
Rezipumpe	5,84	0,52	2%
Nachklärung inkl. ÜSS PW	1,60	0,14	1%
Fällmittelzugabe	0,50	0,04	0%
Voreindickung	9,79	0,78	3%
Stabilisierung	18,00	1,53	6%
Entwässerung	12,86	1,15	4%
Flockungsfilter	22,40	2,00	8%
Aktivkohle	45,00	2,87*	11%
Infrastruktur	17,67	1,59	6%
<b>Summe:</b>	<b>300,75</b>	<b>25,58</b>	<b>100%</b>
* bezogen auf Trockenwetterzulauf			

Im Gegensatz zur Ozonung fällt der Anteil des Energiebedarfs der Verfahrensstufe der Pulveraktivkohle mit nur 11 % am Gesamtenergieverbrauch auf der Kläranlage nicht so deutlich ins Gewicht. Die Belüftung der Belebung stellt mit 40 % den deutlich größten Verbraucher der Anlage dar.

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, bezieht sich der Energiebedarf der Modellanlage grundsätzlich auf den Mischwasserzulauf. Da in der vierten Reinigungsstufe lediglich der Trockenwetterzulauf behandelt wird, reduziert sich der rechnerische Energiebedarf in dieser Verfahrensstufe bei den Bezugsgrößen Einwohner und Jahr entsprechend.

Eine grafische Gegenüberstellung des Energiebedarfs der beiden 100.000 E Modellanlagen in Unterscheidung nach eingesetztem Reinigungsverfahren zur Spurenstoffelimination ist in Bild 7-10 dargestellt:



**Bild 7-10: Vergleich des Energieverbrauchs zwischen PAK und Ozonung, 100.000 E**

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Anlage mit Ozonung als vierte Reinigungsstufe einen deutlich höheren Energiebedarf auf der Kläranlage aufweist als die Anlage mit Pulveraktivkohle. Dies resultiert weitestgehend aus den zu Beginn definierten Systemgrenzen. Da der Energiebedarf für die Herstellung des Ausgangsstoffs (im wesentlichen PAK) nicht zu Lasten der Kläranlage geht, ergibt sich eine große Spreizung bei den Ergebnissen des Energiebedarfs der beiden Reinigungsverfahren. Eine konkrete Darstellung der einzelnen Einflussfaktoren befindet sich in Kapitel 7.4.

### 7.2.6 Energieerzeugung durch das BHKW

Da die Modellanlage mit einer anaeroben Faulung ausgestattet ist, entsteht während der Faulprozesses Klärgas, das durch den Einsatz eines Blockheizkraftwerks in Wärme und Strom umgesetzt werden kann. Der selbst erzeugte und nutzbare Strom kann die Energiebilanz einer Kläranlage erheblich verbessern. Für die Berechnung der Stromerzeugung wird von einem spezifischen Klärgasanfall von etwa  $450 \text{ l}/(\text{kg}_{\text{OTR}})$  ausgegangen. Diese Annahme lässt sich durch Literaturwerte bspw. aus dem „Taschenbuch der Stadtentwässerung“ [IMHOFF, 1999] bestätigen. Es wird dort für Faulraumtemperaturen zwischen  $25 \text{ °C}$  und  $30 \text{ °C}$  ein spezifischer Klärgasanfall von  $440\text{-}480 \text{ l}/(\text{kg}_{\text{OTR}})$  angegeben. Der gewählte Wert liegt demnach in diesem Bereich. Die Berechnung für eine mögliche Stromerzeugung durch Klärgas und die Auslegung des Blockheizkraftwerkes ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

**Tabelle 7-29: Energieerzeugung durch ein Blockheizkraftwerk**

		<b>Anschluss</b>
Einwohner	E	100.000 [E]
Schlammmenge	$\sigma_{TS,RS}$	5.200 [kg <sub>ottr</sub> /d]
spezifischer Klärgasanfall	$Q_{gas, spez}$	450 l/(kg <sub>ottr</sub> )
Gasproduktion Faulung, Tagesmittelwert	$Q_{Gas}$	2.340 [m <sup>3</sup> /d]
elektrischer Wirkungsgrad BHKW	$\eta_{el}$	0,39 [-]
thermischer Wirkungsgrad BHKW	$\eta_{th}$	0,46 [-]
Heizwert Faulgas	$H_U$	6,4 [kWh/Nm <sup>3</sup> ]
mittlere elektrische Leistung	$P_{el, mitt}$	243 [kW]
Faktor Leistungsverminderung Teillastbetrieb	$\eta_{Teillast}$	10 [%]
Stromerzeugung pro Tag	$Q_{el, d}$	5.257 [kWh/d]
Wärmeerzeugung pro Jahr	$Q_{W, a}$	2.514 [MWh/a]
Stromerzeugung pro Jahr	$Q_{el, a}$	1.919 [MWh/a]
Energieerzeugung spezifisch	$E_{spez}$	215 [Wh/m <sup>3</sup> ]

Für die Modellanlage mit 100.000 E könnten somit theoretisch rund 1.920 MWh/a an selbsterzeugter elektrischer Energie dem Gesamtenergiebedarf gegenübergestellt werden, was einer spezifischen Energieerzeugung von ca. 215 Wh/m<sup>3</sup> entspricht. Zusätzlich zum erzeugten Strom können rund 2.514 MWh/a an Wärmeenergie zur Beheizung der Faulung und Betriebsgebäude bereitgestellt werden.

Diese Berechnung fließt nicht in die späteren energetischen Gesamtbetrachtungen mit ein, ist aber der Vollständigkeit halber und auch als wesentlicher Unterschied zwischen den beiden herangezogenen Größenordnungen der Modellanlagen zu nennen, da die kleine Anlage mit 20.000 E ohne Faulung und anschließender Gasverwertung ausgebildet ist.

## 7.3 Modellanlage für 20.000 E

### 7.3.1 Grundlagen Modellanlage für 20.000 E

#### 7.3.1.1 Wassermengen

Nach gleicher Vorgehensweise wie die Modellanlage mit 100.000 E wird auch die Anlage für 20.000 E bemessen. Um die Anschlussgröße von 20.000 E zu realisieren, erfolgt die Bemessung der einzelnen Verfahrensstufen auf eine Ausbaugröße von rund 26.000 E.

Unterschiede und relevante Abweichungen sowohl in der Verfahrenstechnik, als auch in den Eingangsdaten, werden an den jeweiligen Stellen erläutert und dargestellt.

Auf eine in allen Punkten detaillierte Darstellung wie bei der Modellanlage für 100.000 E wird an dieser Stelle verzichtet. Die entsprechenden Tabellen sind Kapitel 4 zu entnehmen. In der nachfolgenden Tabelle sind die Wassermengen der Modellanlage für die Ausbaugröße von 26.000 E (Anschlussgröße: 20.000 E) dargestellt:

**Tabelle 7-30: Wassermengen Modellanlage 26.000 E**

<u>Einwohnerwerte</u>		<b>Bemessung</b>
Einwohnerwerte	E	26.000 [E]
<u>Wassermengen</u>		
Schmutzwasseranfall	$q_s$	125 [l/(E·d)]
Fremdwasseranfall	$q_f$	62,5 [l/(E·d)]
Niederschlagswasser	$q_r$	70 [l/(E·d)]
Jahreswassermenge Trockenwetter	$Q_T$	1.779.375 [m <sup>3</sup> /a]
Jahreswassermenge Mischwasser	$Q_M$	2.443.675 [m <sup>3</sup> /a]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	3.250 [m <sup>3</sup> /d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	1.625 [m <sup>3</sup> /d]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,aM}$	1.820 [m <sup>3</sup> /d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	37,62 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	18,81 [l/s]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,aM}$	21,06 [l/s]
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,aM}$	56,42 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,aM}$	77,49 [l/s]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	4.875 [m <sup>3</sup> /d]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	6.695 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	109,09 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	6.695 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Mischwasserabfluss	$Q_{M,max}$	199,36 [l/s]

Gegenüber der Modellanlage mit 100.000 E weichen die anzusetzenden Mengen für Fremd- und Schmutzwasseranfall für eine Modellanlage mit 20.000 E nach Vorgabe des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] ab.

### 7.3.1.2 Konzentrationen und Frachten

Da die 20.000 E Modellanlage keine Faulung aufweist und der Schlamm innerhalb der Belebung aerob stabilisiert wird, wird kein stickstoffreiches Zentrat aus der Schlammmentwässerung zurück in den Zulauf der Anlage gefördert. Die Bestimmung der Konzentrationen und Frachten erfolgt somit ohne Berücksichtigung einer Stickstoffrückbelastung. In der nachfolgenden Tabelle sind die Frachten der Modellanlage für die Anschlussgröße 20.000 E dargestellt:

**Tabelle 7-31: Frachten der 20.000 E Anlagen**

<b><u>Schmutzfrachten im Zulauf zur Kläranlage</u></b>		
einwohnerspezifische BSB <sub>5</sub> -Fracht	$B_{BSB, spez}$	60 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische CSB-Fracht	$B_{CSB, spez}$	120 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische TS-Fracht	$B_{TS, spez}$	70 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische TKN-Fracht	$B_{TKN, spez}$	11 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische P-Fracht	$B_{P, spez}$	1,8 [g/(E·d)]
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, BSB, Z}$	1.560 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, CSB, Z}$	3.120 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, TS, Z}$	1.820 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, TKN, Z}$	286 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d, P, Z}$	47 [kg/d]

### 7.3.1.3 Struktureller Aufbau der Verfahrensstufen

Der Aufbau der Modellanlage wird anhand einer möglichst typischen Kläranlage dieser Anschlussgröße nachgebildet (siehe Erläuterungen in Abschnitt 4). Dabei wird ebenfalls auf die Informationen der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] zurückgegriffen. Generell besteht die Modellanlage 20.000 E mit Ozonung aus folgenden Verfahrensstufen:

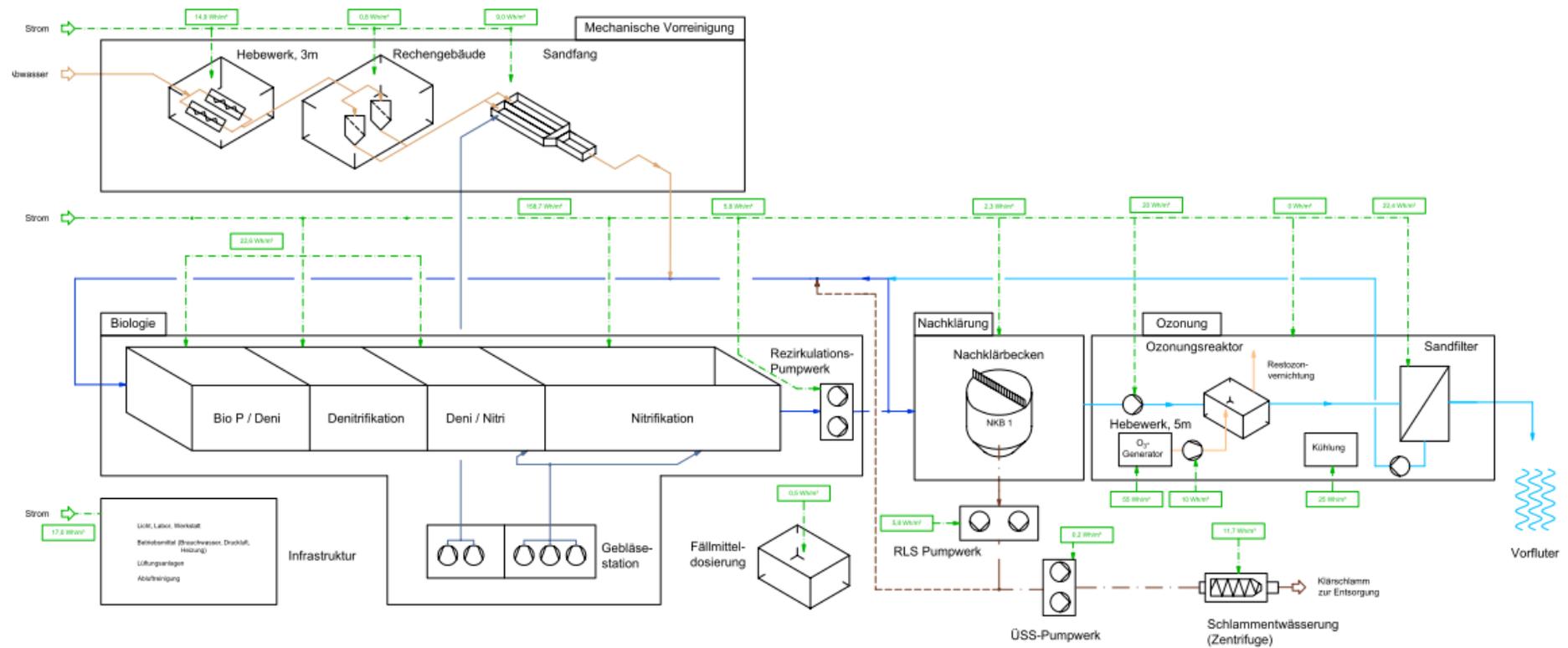


Bild 7-11: Schema der 20.000 E Anlage mit Ozonung

Zulaufhebwerk:

Das Hebewerk wird analog zur Modellanlage 100.000 E mit einer durchschnittlichen Förderhöhe von 3 m gewählt. Die Förderung des Abwassers erfolgt in Anlehnung an das Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MURL, 1999] ebenfalls durch Schnecken-tropfpumpen.

Rechen:

Die Rechenanlage besteht neben dem Rechen aus der Rechengutwäsche und –presse.

Sandfang:

Für die weitergehende mechanische Reinigungsstufe ist ein belüfteter Langsandfang mit einem Volumen von 120 m<sup>3</sup> vorgesehen. Ausgestattet ist dieser mit einem Räumler, einer Sandentnahmepumpe und einem Sandwäscher.

Belebung:

Die Bemessung der Belebung und der Beckengrößen erfolgt nach Hochschulgruppenansatz (HSG) [BÖHNKE, 1989]. Nach Auswertung der Angaben im Handbuch der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] wird ein Belebungsbecken mit vorgeschalteter Denitrifikation gewählt. Da die Modellanlage mit 26.000 E Ausbaugröße ohne Faulung ausgebildet ist, wird keine Rückbelastung durch Stickstoff angesetzt. Da es sich bei dieser Modellanlage um eine aerobe Stabilisierung handelt, muss allerdings das Schlammalter innerhalb des Belebungsbeckens mit 25 Tagen angesetzt werden. Die vollständigen Berechnungstabellen zum Hochschulgruppenansatz inkl. aller Berechnungsparameter befinden sich in Kapitel 4. In nachfolgender Tabelle ist die Bemessung des erforderlichen Belebungsvolumens für die Modellanlage mit 26.000 E Ausbaugröße dargestellt.

**Tabelle 7-32: Bemessung des erforderlichen Belebungsvolumens nach HSG für die Anlage mit 26.000 E Ausbaugröße**

<b><u>Berechnung der Beckenvolumina</u></b>		
zu nitrifizierende Stickstoffkonzentration	$N_{n,m}$	49,73 [mg/l]
Hilfsgröße P	P	313,27 [g/m <sup>3</sup> ]
Raumbeschickung	$q_R$	0,421 [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·d)]
erforderliches Gesamtvolumen der Belebung	V	11.567 [m <sup>3</sup> ]
erforderliches aerobes Volumen der Belebung	$V_N$	<b>8.330</b> [m <sup>3</sup> ]
erforderliches anoxisches Volumen der Belebung	$V_D$	<b>3.237</b> [m <sup>3</sup> ]

Nachklärung:

Die Nachklärung wird durch ein Rundbecken mit einem Durchmesser von 28 m und einem Volumen von 2.705 m<sup>3</sup> gebildet. Als maßgebliche energetische Verbraucher sind in der Nachklärung die Überschussschlamm-pumpen und der Räumler anzusetzen.

Im Folgenden werden zur Entfernung von Spurenstoffen als vierte Reinigungsstufe zwei Varianten betrachtet:

### Ozonung (Variante A):

Die Ozonung wird in der Modellanlage mit 20.000 E nahezu identisch zur Modellanlage mit 100.000 E berücksichtigt. Mit dem wesentlichen Unterschied, dass die nachfolgende Reinigung mit einer Filtration nicht als bereits bestehende separate Verfahrensstufe der Kläranlage, sondern als Bestandteil der Ozonung angesetzt wird. Auch für diese Modellanlage werden für die Betrachtung des Energiebedarfs nur die Faktoren berücksichtigt, die sich direkt auf der Kläranlage befinden (siehe Kapitel 7.1.3). Dies sind die Aggregate Hebewerk, Ozongenerator, Ozoneintrag, Restozonvernichtung und Kühlung. Alle transportrelevanten Aspekte für Sauerstofflieferung oder auch die Gewinnung des Reinsauerstoffs fließen nicht in die Bilanz mit ein.

Die detaillierte Auslegung der Ozonung als vierte Reinigungsstufe wird im nachfolgenden Kapitel 7.3.2 erläutert.

### Pulveraktivkohle (Variante B):

Um die Abtrennung der Pulveraktivkohle vom Abwasserstrom zu gewährleisten, muss entweder ein Sedimentationsbecken vorhanden sein oder das Volumen der Nachklärung so groß bemessen sein, dass dieses zusätzlich als Absetzbecken fungieren kann. Im Gegensatz zur Modellanlage mit 100.000 E Anschlussgröße wird die vierte Reinigungsstufe mit Pulveraktivkohle bei der Modellanlage mit 20.000 E nicht mit einem zusätzlichen Sedimentationsbecken ausgestattet. Als Praxisbeispiel wird der Aufbau der Kläranlage Schwerte (siehe auch 3.2) herangezogen. Die Zugabe erfolgt, wie bei der Modellanlage mit 100.000 E, in ein Kontaktbecken. Die anfallende beladene PAK wird vollständig mit dem Abwasserstrom im freien Gefälle in die Belebungsstufe rezirkuliert oder der Nachklärung zugegeben. Das Belebungsvolumen bzw. die Nachklärung müssen für diesen Anwendungsfall ausreichend groß bemessen sein.

Um einen eventuellen Abtrieb von PAK in die Vorflut zu verhindern, wird ein Flockungsfilter der Nachklärung nachgeschaltet, auch wenn dies für die Vergleichsanlage Schwerte nicht zutreffend ist. Die Berücksichtigung des Flockungsfilters erfolgt zudem, um eine Vergleichbarkeit des Modellanlagenaufbaus gegenüber der Ozonung sicherzustellen.

Der Sandfilter wird bei der Modellanlage 20.000 E explizit als Bestandteil der vierten Reinigungsstufe betrachtet und auch energetisch dieser Verfahrensstufe zugeordnet, da er zusätzlich zu installieren ist.

### Entwässerung:

Als Entwässerungsverfahren wird nach Auswertung der DWA Nachbarschaftsdaten [DWA, 2013] eine Hochentwässerungszentrifuge gewählt. Diese sind innerhalb NRW auf den vorhandenen Kläranlagen der gleichen Größenordnung wie die Modellanlage am häufigsten eingesetzt.

## 7.3.2 Auslegung der Ozonung (Variante A)

Da bei der Modellanlage 20.000 E nach Auswertung der Daten der DWA-Nachbarschaften [DWA, 2013] festgestellt wurde, dass eine Flockungsfiltration bei der

Mehrzahl der Anlagen nicht vorhanden ist, wird diese als nachgeschaltete Reinigungsstufe der vierten Reinigungsstufe energetisch zugeordnet und geht in den Energiebedarf der Ozonung ein.

Insgesamt setzt sich die Verfahrensstufe der Ozonung somit aus dem Hebewerk, dem Ozongenerator inkl. Kühlung, dem Ozoneintrag, der anschließenden Restozonvernichtung und dem Sandfilter zusammen. Die Energiefaktoren für die Gewinnung des Reinsauerstoffs oder für den Sauerstofftransport werden auch in der 20.000 E Modellanlage nicht berücksichtigt.

Für die Modellanlage 20.000 E werden die Annahmen für Förderhöhe und Ozondosis aus der Modellanlage 100.000 E übernommen. Die Berechnungen sind in der Anlage 5 ausführlich beschrieben. Die Berechnungen zum Energiebedarf erfolgen in gleicher Weise wie in Kapitel 7.2.4 zur Modellanlage 100.000 E dargestellt.

### 7.3.3 Auslegung der PAK (Variante B)

Ein vorgeschaltetes Hebewerk fördert das Abwasser aus der Nachklärung auf das Niveau der vierten Reinigungsstufe. Die Zugabe der PAK erfolgt, wie bereits auch bei der 100.000 E Modellanlage, in das Kontaktbecken. Da, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, nach Auswertung der Daten der DWA-Nachbarschaften [DWA, 2013] festgestellt wurde, dass eine Flockungsfiltration bei der Mehrzahl der Anlagen dieser Größenordnung nicht vorhanden ist, wird bei der Modellanlage 20.000 E der Sandfilter zur Nachbehandlung des gereinigten Abwassers energetisch der vierten Reinigungsstufe zugeordnet.

Aus dem Filter abgezogenes Spülwasser wird mit PAK beladen zurück in die Belebungsstufe gefördert. Daher ergibt sich auch in der Modellanlage 20.000 E eine erhöhte Menge an Überschussschlamm innerhalb der Belebung. Dies hat, wie bereits dargestellt, Einfluss auf die nachfolgenden Verfahrensstufen, wobei der Einfluss auf den Energiebedarf vernachlässigbar klein ist.

Die eingesetzte Dosis an Pulveraktivkohle wird auch für die Modellanlage 20.000 E mit  $10 \text{ g/m}^3$  angesetzt.

Bei der Auswahl der Verfahrensstufen der Modellanlage 20.000 E wird auf das Sedimentationsbecken verzichtet, wie in Kapitel 7.3.1.3 dargestellt.

Für die Modellanlage 20.000 E werden die Annahmen für Förderhöhe und Dosiermenge aus der Modellanlage 100.000 E übernommen. Die Berechnungen sind in der Anlage 5 ausführlich beschrieben. Die Berechnungen zum Energiebedarf erfolgen in gleicher Weise wie in Kapitel 7.2.4 zur Modellanlage 100.000 E dargestellt.

### 7.3.4 Berechnung des Energiebedarfs

Der Energiebedarf der Verfahrensstufen der Modellanlage 20.000 E werden analog zu denen der Modellanlage 100.000 E berechnet. Es wird daher an dieser Stelle auf die erneute ausführliche Darstellung der einzelnen Verfahrensschritte verzichtet (siehe Anlage 5).

Die Bereiche Hebewerk und mechanische Vorreinigung weisen keine wesentlichen Abweichungen bei der Auswahl der Aggregate und der Berechnung des Energieverbrauchs auf. Nachfolgend werden daher nur die Verfahrensstufen dargestellt, in denen eine abweichende Aggregateauswahl oder Berechnung gegenüber der Modellanlage 100.000 E festgelegt werden.

Die Wassermenge, die für die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs verwendet wird, ist analog zur Modellanlage mit 100.000 E die Summe aus Schmutzwasser-, Fremdwasser- und Regenwasserabfluss und ergibt sich zu 5.150 m<sup>3</sup>/d.

**Tabelle 7-33: maßgebliche Wassermengen zur Bestimmung des Energiebedarfs für Modellanlage 20.000 E**

<u>Einwohnerwerte</u>		<b>Anschluss</b>
Einwohnerwerte	E	20.000 [E]
<b><u>Wassermengen</u></b>		
Schmutzwasseranfall	q <sub>s</sub>	125 [l/(E·d)]
Fremdwasseranfall	q <sub>f</sub>	62,5 [l/(E·d)]
Niederschlagswasser	q <sub>r</sub>	70 [l/(E·d)]
Jahreswassermenge Trockenwetter	Q <sub>T</sub>	1.368.750 [m <sup>3</sup> /a]
Jahreswassermenge Mischwasser	Q <sub>M</sub>	1.879.750 [m <sup>3</sup> /a]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>S,aM</sub>	2.500 [m <sup>3</sup> /d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>F,aM</sub>	1.250 [m <sup>3</sup> /d]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	Q <sub>R,aM</sub>	1.400 [m <sup>3</sup> /d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>S,aM</sub>	28,94 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>F,aM</sub>	14,47 [l/s]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	Q <sub>R,aM</sub>	16,20 [l/s]
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q <sub>T,aM</sub>	43,40 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>M,aM</sub>	59,61 [l/s]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q <sub>T,d,aM</sub>	3.750 [m <sup>3</sup> /d]
<b>täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel</b>	<b>Q<sub>M,d,aM</sub></b>	<b>5.150 [m<sup>3</sup>/d]</b>
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	Q <sub>T,2h,max</sub>	83,91 [l/s]
maximaler Mischwasserabfluss	Q <sub>M,max</sub>	153,36 [l/s]

#### 7.3.4.1 Belüftung Belebung

In der Modellanlage 20.000 E stellt die Belüftung der Belebung ebenfalls einen der größten Energieverbraucher der Kläranlage dar. Im Gegensatz zur Modellanlage 100.000 E wird für diese Modellanlage anstelle der Turboverdichter der Einsatz von Drehkolbengebläse zur Prozessluftherzeugung festgelegt. Diese haben einen geringeren Wirkungsgrad als die Turboverdichter, bei gleichzeitig niedrigeren Investitionskosten. Gemäß DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013] werden die Auslegungsdaten für Drehkolbengebläse bei der Ermittlung des Energiebedarfs in der nachfolgenden Tabelle angesetzt.

**Tabelle 7-34: Energiebedarf Belüftung Belebung**

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
Jahreswassermenge Mischwasser	$Q_M$	1.879.750 [m <sup>3</sup> /a]	1.879.750 [m <sup>3</sup> /a]	1.879.750 [m <sup>3</sup> /a]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,abM}$	5.150 [m <sup>3</sup> /d]	5.150 [m <sup>3</sup> /d]	5.150 [m <sup>3</sup> /d]
Volumen Deni	$V_D$	3.237 [m <sup>3</sup> ]	3.237 [m <sup>3</sup> ]	3.237 [m <sup>3</sup> ]
Volumen Nitri	$V_N$	8.330 [m <sup>3</sup> ]	8.330 [m <sup>3</sup> ]	8.330 [m <sup>3</sup> ]
<b>Belüftung</b>				
Einblastiefe BB	$h_{E,BB}$	5,0 [m]	5,0 [m]	5,0 [m]
Grenzflächenfaktor	$\alpha_{BB}$	0,69 [-]	0,69 [-]	0,69 [-]
Luftdichte bei 20°C	$\rho$	1,2 [kg/m <sup>3</sup> ]	1,2 [kg/m <sup>3</sup> ]	1,2 [kg/m <sup>3</sup> ]
Massenprozentanteil O <sub>2</sub> in Luft	$C_{O_2,Luft}$	23,14 [%]	23,14 [%]	23,14 [%]
erforderliche mittlere Sauerstoffzufuhr pro Tag	erf. $\alpha \cdot OC_d$	2.124 [kgO <sub>2</sub> /d]	2.124 [kgO <sub>2</sub> /d]	2.124 [kgO <sub>2</sub> /d]
erforderliche mittlere Sauerstoffzufuhr pro Stunde	erf. $\alpha \cdot OC_h$	89 [kgO <sub>2</sub> /h]	89 [kgO <sub>2</sub> /h]	89 [kgO <sub>2</sub> /h]
Sauerstoffbedarf für BB in Reinwasser	$OC_R$	3.100 [kgO <sub>2</sub> /d]	3.100 [kgO <sub>2</sub> /d]	3.100 [kgO <sub>2</sub> /d]
spez. Sauerstoffzufuhr	$OC_{L,h}$	21,00 g/Nm <sup>3</sup> /m	21,00 g/Nm <sup>3</sup> /m	21,00 g/Nm <sup>3</sup> /m
Luftbedarf BB pro Tag	$Q_{L,d,BB}$	30.000 [Nm <sup>3</sup> /d]	30.000 [Nm <sup>3</sup> /d]	30.000 [Nm <sup>3</sup> /d]
Gebäsedruck	$\Delta P$	6,00 [mWS]	6,00 [mWS]	6,00 [mWS]
Wirkungsgrad Gebläse	$\eta$	0,55 [%]	0,62 [%]	0,60 [%]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,BB}$	892 [kWh/d]	791 [kWh/d]	817 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,BB}$	173,2 [Wh/m <sup>3</sup> ]	153,6 [Wh/m <sup>3</sup> ]	158,7 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,BB}$	16,3 [kWh/(E·a)]	14,4 [kWh/(E·a)]	14,9 [kWh/(E·a)]

Insgesamt fließt die Belüftung der Belebung mit rund 15 kWh/(E·a) in die Gesamtbilanz mit ein und stellt damit den prozentual größten Anteil des Energiebedarfs der 20.000 E Modellanlage dar.

#### 7.3.4.2 Ozonung (Variante A)

Der Energiebedarf der Ozonung setzt sich, wie zuvor erläutert, aus den Verfahrensschritten Hebewerk, Ozonerzeugung, Ein- und Austrag, Kühlung und in diesem Falle einer Nachbehandlung über Sandfilter zusammen.

Für die vierte Reinigungsstufe sind im Arbeitsblatt der DWA-A 216 [DWA-A 216, 2013] noch keine Angaben zum Energiebedarf enthalten, so dass die im ersten Arbeitspaket „Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I“ [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] ermittelten Werte zum Energiebedarf als Grundlage für die weiteren Berechnungen verwendet werden.

Wie Tabelle 7-35 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergiebedarf für die Ozonung von 4,95 und 14,54 kWh/(E·a). Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Ozonung ein spezifischer Energiebedarf von 8,72 kWh/(E·a).

**Tabelle 7-35: Energiebedarf Ozonung inkl. Sandfilter**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	3.750 [m³/d]	3.750 [m³/d]	3.750 [m³/d]
<b>Ozonung</b>				
Förderhöhe	h	0,0 [m]	10,0 [m]	5,0 [m]
Energie Hebewerk 70% WG	$E_{HW}$	0,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
Ozonerzeugung	$E_{O_3,Erz}$	8 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	14 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	10 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]
Energiebedarf für Ozonosis 5,0 g/m³	$E_{O_3,7,5}$	40 [Wh/m³]	70 [Wh/m³]	55 [Wh/m³]
Ein und Austrag	$E_{O_3,I/O}$	0,0 [Wh/m³]	20 [Wh/m³]	10,0 [Wh/m³]
katalytische Restozonvernichtung	$E_{O_3,Rest}$	0,0 [Wh/m³]	10,0 [Wh/m³]	0,0 [Wh/m³]
Kühlaggregat	$E_{O_3,Kühlung}$	10,0 [Wh/m³]	50,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
Nachbehandlung Sandfilter	$E_{SF}$	22,4 [Wh/m³]	22,4 [Wh/m³]	22,40 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ozon}$	72,40 [Wh/m³]	212,40 [Wh/m³]	127,40 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ozon}$	4,95 [kWh/(E·a)]	14,54 [kWh/(E·a)]	8,72 [kWh/(E·a)]

Es ist ersichtlich, dass innerhalb der Ozonung mit ca. 55 Wh/m³ der spezifisch größte Anteil an Energie für die Erzeugung des Ozons verbraucht wird. Der Ein- und Austrag des Ozons sowie die Restozonvernichtung tragen in Summe nur geringfügig zum Energieverbrauch bei.

Vorgenannte Feststellung gilt analog für die Modellanlage 100.000 E. Dies lässt den Schluss zu, dass bestimmte grundsätzliche Verbraucher, unabhängig von der Kläranlagengröße, eine untergeordnete Rolle bei der Ermittlung des potenziellen Energiebedarfs spielen.

#### 7.3.4.3 PAK (Variante B)

Der Energiebedarf der Spurenstoffelimination mittels Pulveraktivkohle beinhaltet, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, die Verfahrensstufen Hebewerk, Zugabe, Rühren und die Nachbehandlung über einen Sandfilter.

Da im Vergleich zur Modellanlage 100.000 E keine Sedimentation im Absetzbecken und anschließende interne Rückführung in das Kontaktbecken vorhanden ist, verringert sich der Energiebedarf um den Anteil der Rezirkulation. Anstelle von zuvor gewählten 25 Wh/m³ für den Energiebedarf, wird daher ein verminderter Wert von 20 Wh/m³ angesetzt. Auch hier werden die ermittelten Energieverbräuche aus den Daten aus Phase I [AZ IV-7-042 600 003 J, 2011] verwendet.

**Tabelle 7-36: Energiebedarf PAK inkl. Sandfilter**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	3.750 [m³/d]	3.750 [m³/d]	3.750 [m³/d]
<b>nachgeschaltet, Pulveraktivkohle, Sandfilter</b>				
Förderhöhe	h	0,0 [m]	10,0 [m]	5,0 [m]
Energie Hebewerk 70% WG	$E_{HW}$	0,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
PAK Zugabe, Rühren, Rezirkulieren	$E_{HW}$	10,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
Nachbehandlung Sandfilter	$E_{SF}$	22,4 [Wh/m³]	22,4 [Wh/m³]	22,4 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,PAK}$	32,40 [kWh/m³]	102,40 [Wh/m³]	62,40 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,PAK}$	2,2 [kWh/(E·a)]	7,0 [kWh/(E·a)]	4,27 [kWh/(E·a)]
zusätzlich in BB rückgeführte Feststoffmenge 5%	$Q_{PAK}$	2,0 [m³/d]	2,0 [m³/d]	2,0 [m³/d]

Wie Tabelle 7-36 zu entnehmen ist, ergibt sich in Summe ein spezifischer Gesamtenergiebedarf für diese Verfahrensstufe von 2,2 bis 7,0 kWh/(E·a). Durch die gewählten Annahmen ergibt sich in Summe für die Zugabe von PAK ein spezifischer Energiebedarf von 4,3 kWh/(E·a).

### 7.3.5 Gesamter Energiebedarf Modellanlage mit Ozonung (Variante A)

Nachdem in den vorherigen Kapiteln alle Verbraucher für die Modellanlage 20.000 E bezüglich ihres Energiebedarfs berechnet sind (siehe Anlage 5) erfolgt im Anschluss eine zusammenfassende Betrachtung zum Gesamtenergiebedarf der Modellanlage.

In folgender Tabelle wird der spezifische Energiebedarf sowohl in Abhängigkeit zur behandelten Abwassermenge, als auch bezogen auf die angeschlossenen Einwohnerwerte berechnet. Zusätzlich wird der prozentuale Anteil der jeweiligen Verfahrensstufe am Gesamtenergiebedarf dargestellt.

**Tabelle 7-37: Gesamtenergiebedarf Modellanlage 20.000 E mit Ozonung**

Verbraucher	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Anteil am Gesamtbedarf [%]
Zulaufhebwerk	14,86	1,40	4%
Rechen	0,80	0,08	0%
Sandfang	9,05	0,85	3%
Belüftung BB	158,73	14,92	46%
Rührwerke	22,63	2,13	7%
RLS Pumpwerk	5,84	0,55	2%
Rezipumpe	5,84	0,55	2%
Nachklärung inkl. ÜSS PW	2,39	0,22	1%
Fällmittelzugabe	0,50	0,05	0%
Entwässerung	11,65	1,10	3%
Ozonung	127,40	8,72*	27%
Infrastruktur	16,92	1,59	5%
<b>Summe:</b>	<b>376,60</b>	<b>32,14</b>	<b>100%</b>
*bezogen auf Trockenwetterzulauf			

In Summe ergibt sich ein Gesamtbedarf für die Modellanlage 20.000 E mit Ozonung von etwa 377 Wh/m<sup>3</sup> bzw. 32 kWh/(E·a). Betrachtet man die Anteile der einzelnen Verfahrensstufen am Gesamtenergiebedarf, so ist zu erkennen, dass die Ozonung mit ca. 27 % und die Belüftung der Belebung mit 46 % die beiden größten Verbraucher darstellen. Alle weiteren Verbraucher haben relativ geringe Anteile mit jeweils kleiner 7 % am Gesamtverbrauch.

### 7.3.6 Gesamter Energiebedarf PAK (Variante B)

Der Gesamtenergiebedarf der Modellanlage 20.000 E mit Einsatz von Pulveraktivkohle in der vierten Reinigungsstufe ergibt eine Summe von etwa 312 Wh/m<sup>3</sup> bzw. 28 kWh/(E·a).

Analog zur Darstellung der Modellanlage 20.000 E mit Ozonung, ist in der nachfolgenden Tabelle der spezifische Energiebedarf sowohl in Abhängigkeit zur behandelten Abwassermenge, als auch bezogen auf die angeschlossenen Einwohnerwerte für die

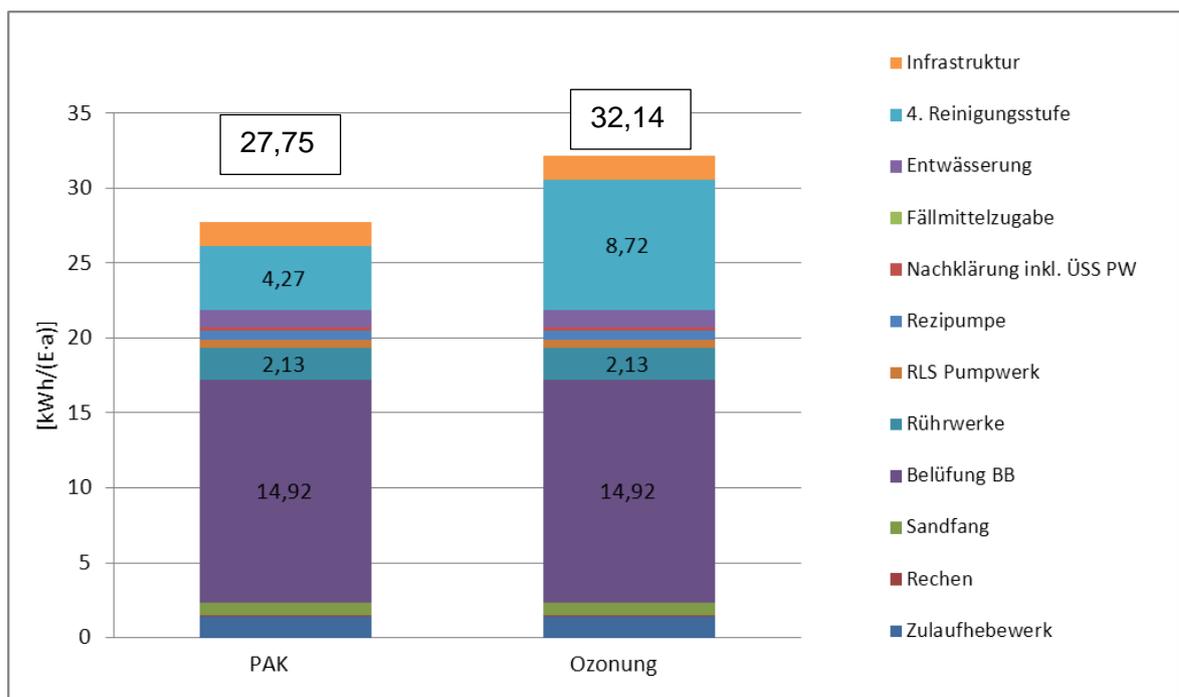
Modellanlage 20.000 E mit PAK berechnet. Zusätzlich wird der prozentuale Anteil der jeweiligen Verfahrensstufe am Gesamtenergiebedarf dargestellt.

**Tabelle 7-38: Gesamter Verbrauch mit PAK**

Verbraucher	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m³]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Anteil am Gesamtbedarf [%]
Zulaufhebewerk	14,86	1,40	5%
Rechen	0,80	0,08	0%
Sandfang	9,05	0,85	3%
Belüftung BB	158,73	14,92	54%
Rührwerke	22,63	2,13	8%
RLS Pumpwerk	5,84	0,55	2%
Rezipumpe	5,84	0,55	2%
Nachklärung inkl. ÜSS PW	2,39	0,22	1%
Fällmittelzugabe	0,50	0,05	0%
Entwässerung	12,23	1,15	4%
Aktivkohle	62,40	4,27*	15%
Infrastruktur	16,92	1,59	5%
<b>Summe:</b>	<b>312,18</b>	<b>27,75</b>	<b>100%</b>
*bezogen auf Trockenwetterzulauf			

Im Gegensatz zur Modellanlage mit Ozonung (Anteil 29 %) fällt der Anteil des Energiebedarfs der Verfahrensstufe der Pulveraktivkohle mit nur 15 % nicht so deutlich ins Gewicht. Die Belüftung der Belebung ist mit 54 % der deutlich größte Verbraucher der Modellanlage.

Eine grafische Gegenüberstellung der beiden Modellanlagen 20.000 E in Unterscheidung nach der vierten Reinigungsstufe ist in Bild 7-12 dargestellt:



**Bild 7-12: Vergleich Energiebedarf Modellanlage 20.000 E mit PAK und Ozonung**

Entsprechend der Modellanlage 100.000 E weist auch die Modellanlage 20.000 E mit Ozonung als vierte Reinigungsstufe einen deutlich höheren Energiebedarf auf, als die Modellanlage 20.000 E mit PAK.

Dies resultiert, wie auch bei der Modellanlage 100.000 E bereits dargestellt, weitestgehend aus den in Kapitel 7.1.3 definierten Systemgrenzen. Da der Energiebedarf für die Herstellung des Ausgangsstoffs (im wesentlichen PAK) nicht zu Lasten der Kläranlage geht, ergibt sich eine große Spreizung bei den Ergebnissen des Energiebedarfs der beiden Reinigungsverfahren. Eine konkrete Darstellung der einzelnen Einflussfaktoren befindet sich in Kapitel 7.4.

Darüber hinaus kann durch den Ersatz des Sedimentationsbeckens bei der Modellanlage 20.000 E mit PAK durch die vorhandene Nachklärung der Energiebedarf für die Rezirkulation in diesem Fall geringer gewählt werden. Dies führt zu einer größeren Differenz zwischen dem Energiebedarf der Modellanlage mit Ozonung und mit PAK, als es bei dem Vergleich des Energiebedarfs der Modellanlagen 100.000 E der Fall ist.

## 7.4 Auswertung der Ergebnisse und Einflussfaktoren

Die in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Ergebnisse zum Energiebedarf der beiden Modellanlagen mit Ozonung oder Pulveraktivkohle als vierte Reinigungsstufe werden im Folgenden bewertet und die verschiedenen Verfahren gegenübergestellt.

### 7.4.1 Einflussfaktoren der Modellanlagen mit Ozonung

Die Einflussfaktoren der Modellanlagengröße auf die Auslegung der vierten Reinigungsstufe Ozonung werden nachfolgend beschrieben.

Maßgebliche Unterschiede im Gesamtenergiebedarf sind sowohl die gewählten Verfahrensstufen, als auch die energetische Zuordnung der Flockungsfiltration. Der Energiebedarf der beiden Modellanlagen, sowohl auf die Wassermenge ( $\text{Wh}/\text{m}^3$ ), als auch auf die angeschlossenen Einwohner ( $\text{kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ ) bezogen, ist in nachfolgender Tabelle 7-39 gegenübergestellt.

**Tabelle 7-39: Gegenüberstellung Energiebedarf Modellanlagen mit Ozonung**

Verbraucher	100.000 E		20.000 E	
	Spezifischer Energiebedarf [ $\text{Wh}/\text{m}^3$ ]	Spezifischer Energiebedarf [ $\text{kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ ]	Spezifischer Energiebedarf [ $\text{Wh}/\text{m}^3$ ]	Spezifischer Energiebedarf [ $\text{kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ ]
Zulaufhebwerk	14,86	1,33	14,86	1,40
Rechen	0,84	0,08	0,80	0,08
Sandfang	7,20	0,64	9,05	0,85
Vorklärung einschl. PS Pumpwerk	1,75	0,16	---	---
Belüftung BB	115,35	10,31	158,7	14,92
Rührwerke	21,27	1,90	22,6	2,13
RLS Pumpwerk	5,84	0,52	5,84	0,55
Rezipumpe	5,84	0,52	5,84	0,55
Nachklärung inkl. ÜSS PW	1,59	0,14	2,39	0,22
Fällmittelzugabe	0,50	0,04	0,50	0,05
Voreindickung	9,66	0,77	---	---
Stabilisierung	17,14	1,46	---	---
Entwässerung	12,24	1,10	11,7	1,10
Flockungsfilter	22,40	2,00	---	---
Ozonung	105,00	6,71*	127,40	8,72*
Infrastruktur	17,67	1,59	16,9	1,59
<b>Summe:</b>	<b>359,15</b>	<b>29,28</b>	<b>376,60</b>	<b>32,14</b>
* bezogen auf Trockenwetterzulauf				

Bei Betrachtung des Gesamtenergiebedarfs, weist die Modellanlage 20.000 E mit 32,14  $\text{kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$  einen höheren spezifischen Energiebedarf auf als die 100.000 E Modellanlage mit 29,28  $\text{kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})$ , obwohl der Aufbau der Modellanlage 100.000 E mit den zusätzlichen Verbrauchern der Vorklärung und Faulung (Stabilisierung) erfolgt, die bei der Modellanlage 20.000 E nach statistischer Auswertung der Datenlage (siehe Kapitel 7.1.2) nicht vorhanden sind.

Ausschlaggebender Grund für den höheren spezifischen Energiebedarf des 20.000 E Modell ist hierbei maßgeblich der höhere Verbrauch für die Prozessluftherzeugung in der Verfahrensstufe Belebung (Belüftung BB), denn nach statistischer Auswertung der DWA Nachbarschaften [DWA, 2013] wird die Modellanlage 20.000 E mit aerober Schlammstabilisierung bemessen.

Durch das für die aerobe Stabilisierung benötigte Schlammalter von 25 Tagen wird ein maßgeblich größeres Beckenvolumen innerhalb der Belebung benötigt. In Folge daraus ergibt sich ein deutlich höherer Luft- und Energiebedarf für die Belebung.

Wird nur der Energiebedarf der Ozonung der beiden Modellanlagen betrachtet, so ist der Energiebedarf der Modellanlage 20.000 E gegenüber der Modellanlage 100.000 E um ca. 3 kWh/(E·a) höher. Ausschlaggebender Grund hierfür ist, dass die Flockungsfiltration verfahrenstechnisch und energetisch in die Verfahrensstufe Ozonung bei der Modellanlage 20.000 E einbezogen wird, wobei die Flockungsfiltration bei der Modellanlage 100.000 E eine eigenständige Verfahrensstufe darstellt. Berücksichtigt man bei der Betrachtung den Flockungsfilter als verfahrenstechnisch notwendige Nachbehandlung der Ozonung, so ergibt sich der gleiche spez. Energiebedarf, unabhängig von der Modellanlagengröße.

Die Spreizung der Bandbreite von MIN und MAX der Energiebedarfswerte für die einzelnen Verbraucher der Ozonung ist groß. Details hierzu befinden sich in der Tabelle A 47 und Tabelle A 67 in der Anlage. Wichtigster Bestandteil ist dabei die eigentliche Ozonerzeugung. Diese benötigt mit rund 52 % den größten Anteil an Energie innerhalb der Ozonung. Der größte Einflussfaktor auf den Energiebedarf der Ozonung als vierte Reinigungsstufe ist daher die Wahl der Höhe der Dosiermenge in g/m<sup>3</sup>.

#### 7.4.2 Einflussfaktoren der Modellanlagen mit Pulveraktivkohle

Die Einflussfaktoren der Modellanlagengröße auf die Auslegung der vierten Reinigungsstufe mit Pulveraktivkohle werden nachfolgend beschrieben.

Maßgebliche Unterschiede im Gesamtenergiebedarf sind, wie im vorherigen Kapitel 7.4.1 erläutert, sowohl die gewählten Verfahrensstufen, als auch die energetische Zuordnung des Flockungsfilters. Der Energiebedarf der beiden Modellanlagen, sowohl auf die Wassermenge (Wh/m<sup>3</sup>), als auch auf die angeschlossenen Einwohner (kWh/(E·a)) bezogen, ist in nachfolgender Tabelle 7-40 gegenübergestellt.

Auch in diesem Fall ergibt sich für die Modellanlage 20.000 E ein höherer spezifischer Energiebedarf. Die Gründe dafür sind bereits in Kapitel 7.4.1 dargestellt und werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert.

Bei Betrachtung der Hauptverbraucher beider Modellanlagen fallen, wie zu erwarten, die Verfahrensstufen Belebung (Belüftung BB) und vierte Reinigungsstufe (Aktivkohle) ins Auge. Für die Modellanlage 100.000 E beträgt der Anteil der Prozessluftherzeugung der Verfahrensstufe Belebung ca. 39 % und die vierte Reinigungsstufe (Aktivkohle) ca. 15 % am Gesamtenergiebedarf. Bei der Modellanlage 20.000 E ändert sich diese Verteilung auffallend. Der Anteil der Prozessluftherzeugung der Verfahrensstufe Belebung beträgt ca. 51 % und der Anteil der vierten Reinigungsstufe (Aktivkohle) ca. 20 % am Gesamtenergiebedarf. Dieses ergibt sich, wie bereits auch bei der Ozonung erläutert, aus der Definition der energetischen Zugehörigkeit des nachgeschalteten Flockenfilters.

Ein weiterer Aspekt bei der Betrachtung des Energiebedarfs ist der Unterschied im Aufbau der vierten Reinigungsstufe an sich, in Abhängigkeit der Modellanlagengröße. In der Modellanlage 100.000 E erfolgt die Zugabe der PAK in ein Kontaktbecken mit nachgeschalteter Sedimentation. Es erfolgt demnach eine Rezirkulation der PAK aus dem Sedimentationsbecken zurück in die Belebung. Der Energiebedarf hierfür ist im Gesamtenergiebedarf berücksichtigt.

Bei der Modellanlage 20.000 E erfolgt die Rückführung der PAK nicht über ein Sedimentationsbecken, sondern wie in Kapitel 7.2.4.8. beschrieben, wird der Abwasserstrom mit der PAK im freien Gefälle in die Belebungsstufe rezirkuliert oder der Nachklärung zugegeben. Es entfällt demnach ein gewisser Teil an Rezirkulationsenergie.

**Tabelle 7-40: Gegenüberstellung Energiebedarf Modellanlagen mit PAK**

Verbraucher	100.000 E		20.000 E	
	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]
Zulaufhebewerk	14,86	1,33	14,86	1,40
Rechen	0,84	0,08	0,80	0,08
Sandfang	7,20	0,64	9,05	0,85
Vorklärung einschl. PS Pumpwerk	1,75	0,16	---	---
Belüftung BB	115,35	10,3	158,73	14,92
Rührwerke	21,27	1,90	22,63	2,13
RLS Pumpwerk	5,84	0,52	5,84	0,55
Rezipumpe	5,84	0,52	5,84	0,55
Nachklärung inkl. ÜSS PW	1,60	0,14	2,39	0,22
Fällmittelzugabe	0,50	0,04	0,50	0,05
Voreindickung	9,79	0,78	---	---
Stabilisierung	18,00	1,53	---	---
Entwässerung	12,86	1,15	12,23	1,15
Flockungsfilter	22,40	2,00	---	---
Aktivkohle	45,00	2,87*	62,40	4,27*
Infrastruktur	17,67	1,59	16,92	1,59
<b>Summe:</b>	<b>300,75</b>	<b>25,58</b>	<b>312,18</b>	<b>27,75</b>
* bezogen auf Trockenwetterzulauf				

Innerhalb der Verfahrensstufe Aktivkohle ergeben sich zwei maßgebliche Verbraucher erkennbar (siehe Tabelle 7-18 und Tabelle 7-36). Es ist erkennbar, dass in der 100.000 E Modellanlage das Hebewerk mit rund 44 % des Energiebedarfs fast einen gleichwertigen Verbraucher im Vergleich zu den eigentlichen PAK Schritten „Zugeben, Rühren und Rezirkulieren“ mit 56 % darstellt. Für die Modellanlage mit 20.000 E ist der Einfluss des Hebewerks mit 32 % sogar genauso groß wie der der PAK Verbraucher (32 %). Die restlichen 36 % entfallen in der 20.000 E Modellanlage auf den Filter. Die Wahl des Hebewerkes bzw. der Förderhöhe ist daher als wesentlicher Einflussfaktor für den Energiebedarf der vierten Reinigungsstufe mittels Pulveraktivkohle zu benennen. Die Spreizung der Bandbreite von MIN und MAX der Energiebedarfswerte für die Verbraucher der PAK-Stufe (PAK-Zugabe, Rühren und Rezirkulieren) ist mit Werten zwischen 10 und 40 Wh/m<sup>3</sup> geringer, als der Einfluss des Hebewerks (0 bis 40 Wh/m<sup>3</sup>). Details hierzu befinden sich in der Tabelle A 48 und Tabelle A 68 in der Anlage.

### 7.4.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Modellanlage 100.000 E (PAK – Ozon)

Neben der vorangegangenen Gegenüberstellung der Modellanlagen mit gleicher vierter Reinigungsstufe, aber unterschiedlichen Anlagengrößen, erfolgt im Nachgang eine Gegenüberstellung der Modellanlagen mit unterschiedlichen Verfahren der vierten Reinigungsstufe, aber gleicher Anlagengröße.

Zunächst wird die Modellanlage 100.000 E mit Ozonung der Modellanlage mit PAK gegenübergestellt. Die Energieverbräuche sind in nachfolgender Tabelle 7-41 dargestellt.

**Tabelle 7-41: Gegenüberstellung 100.000 E Modellanlage mit PAK und Ozonung**

100.000 E Verbraucher	PAK			OZONUNG	
	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Anteil am Gesamtbedarf [%]	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]
Zulaufhebwerk	14,86	1,33	5%	14,86	1,33
Rechen	0,84	0,08	0%	0,84	0,08
Sandfang	7,20	0,64	3%	7,20	0,64
Vorklärung einschl. PS Pumpwerk	1,75	0,16	1%	1,75	0,16
Belüftung BB	115,35	10,3	40%	115,3	10,3
Rührwerke	21,27	1,90	7%	21,27	1,90
RLS Pumpwerk	5,84	0,52	2%	5,84	0,52
Rezipumpe	5,84	0,52	2%	5,84	0,52
Nachklärung inkl. ÜSS PW	1,60	0,14	1%	1,59	0,14
Fällmittelzugabe	0,50	0,04	0%	0,50	0,04
Voreindickung	9,79	0,78	3%	9,66	0,77
Stabilisierung	18,00	1,53	6%	17,14	1,46
Entwässerung	12,86	1,15	4%	12,24	1,10
Flockungsfilter	22,40	2,00	8%	22,40	2,00
4. Reinigungsstufe	45,00	2,87*	11%	105,00	6,71*
Infrastruktur	17,67	1,59	6%	17,67	1,59
<b>Summe:</b>	<b>300,75</b>	<b>25,58</b>	<b>100%</b>	<b>359,15</b>	<b>29,28</b>

In Summe ist der Energiebedarf der Modellanlage mit Ozonung als vierte Reinigungsstufe um ca. 20 % (ca. 59 Wh/m<sup>3</sup> bzw. ca. 4 kWh/(E·a)) höher, als der Energiebedarf der Modellanlage mit Pulveraktivkohle. 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 %. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Festlegung der Systemgrenzen, unter denen der Energiebedarf der Modellanlagen bestimmt wird. Unabhängig davon welches Verfahren als vierte Reinigungsstufe gewählt wird, werden nur die Verbraucher bei der Ermittlung des Energiebedarfs berücksichtigt, die auch direkt auf dem Klärwerk angeordnet sind.

Alle Prozesse bzw. Schritte, die einen Energiebedarf aufweisen, aber außerhalb der Grenzen der Kläranlage zuzuordnen sind, wie z.B. Stofftransport oder die Herstellung der Aktivkohle bzw. des Reinsauerstoffs, werden in der Berechnung des Energiebedarfs nicht berücksichtigt und bewirken dadurch einen deutlich günstigeren Energiebedarf der Modellanlage mit Pulveraktivkohle als mit Ozonung. Da die Preise für den Bezug von Aktivkohle oder Sauerstoff nicht mit in diese Betrachtung einbezogen werden, sich darin aber in gewisser Weise der externe Energiebedarf widerspiegelt, soll diese Tatsache an dieser Stelle informativ festgehalten werden.

Bei der Betrachtung der einzelnen Verfahrensstufen beider Modellanlagen, 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.

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

#### 7.4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Modellanlage 20.000 E (PAK – Ozon)

Abschließend wird die Modellanlage 20.000 E mit Ozonung der Modellanlage mit PAK gegenübergestellt. Die Energieverbräuche sind in nachfolgender Tabelle 7-42 dargestellt.

**Tabelle 7-42: Gegenüberstellung der 20.000 E Modellanlagen mit PAK und Ozonung**

20.000 E Verbraucher	PAK		OZONUNG	
	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]	Spezifischer Energiebedarf [Wh/m <sup>3</sup> ]	Spezifischer Energiebedarf [kWh/(E·a)]
Zulaufhebewerk	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
<b>Summe:</b>	<b>312,18</b>	<b>27,75</b>	<b>376,60</b>	<b>32,14</b>
*bezogen auf Trockenwetterzulauf				

Wie zu erwarten, weist auch hier die Modellanlage mit Ozonung einen deutlich höheren Energiebedarf (32,14 kWh/(E·a)) auf als die Modellanlage mit Pulveraktivkohle (27,75 kWh/(E·a)). Insgesamt benötigt die Anlage mit Ozonung rund 64 Wh/m<sup>3</sup> bzw. 4,4 kWh/(E·a) mehr Energie als die Vergleichsanlage mit PAK. 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 %. Der Einfluss der Filtration ist nicht separat aufgelistet, da er hier als Bestandteil der vierten Reinigungsstufe zugeordnet wird. Die Einflussfaktoren für den höheren Bedarf der Anlage mit Ozonung wurden bereits im vorangegangenen Kapitel näher erläutert.

## 7.5 Vergleich der Ergebnisse der Modellanlagen mit den Daten der großtechnischen Anlagen

Nach der Ermittlung des Energiebedarfs der Modellanlagen für die zwei verschiedenen Reinigungsverfahren und die unterschiedlichen Anschlussgrößen wird nun versucht, die zuvor ermittelten Daten der großtechnischen Anlagen in Relation zu diesen Ergebnissen zu setzen.

Die ermittelten Werte aus den ausgewählten Versuchsanlagen (siehe Kapitel 4 und 5) und der Modellanlagen (Kapitel 7) können allerdings nicht direkt gegenübergestellt und ohne Hinweise zu den vorliegenden Grundlagen miteinander verglichen werden.

Eine direkte Vergleichbarkeit ist durch unterschiedliche Ausgangssituationen, verschiedene Eingangsparameter und auch ungleiche bauliche Umsetzungen der Kläranlagen nur sehr bedingt möglich. Nachfolgend werden die Ergebnisse nach Reinigungsverfahren differenziert betrachtet und verglichen:

### 7.5.1 Vergleich Ozonung: Versuche - Modell

Vergleicht man den Energiebedarf für Ozonung aus den großtechnischen Versuchen und den Modellanlagen so ergibt sich eine gute Übereinstimmung der ermittelten Werte. Bei einer gewählten Ozondosis von  $5 \text{ g/m}^3$  zur Entfernung der Spurenstoffe und einem in Versuchen ermittelten Stromverbrauch des Ozongenerators von im Mittel  $10 \text{ kWh/kgO}_3$  ergibt sich aus den großtechnischen Versuchen ein Spektrum des Energiebedarfs von  $80 - 150 \text{ Wh/m}^3$  (siehe Bild Bild 4-31). Innerhalb der Modellanlage wurden Werte von  $105 \text{ Wh/m}^3$  (100.000 E Anlage) und  $127 \text{ Wh/m}^3$  (20.000 E Anlage) ermittelt.

Es ist zu bemerken, dass für die 20.000 E Modellanlage der Energiebedarf der Nachbehandlung über einen Sandfilter innerhalb der vierten Reinigungsstufe berücksichtigt wurde, welcher innerhalb der großtechnischen Anlagen nicht mit eingeflossen ist. Auch die Förderhöhe ist für Versuche und Modell nicht gleich und hat maßgeblichen Einfluss auf den Energiebedarf. Innerhalb der Modellanlage wurde von einer Förderhöhe von 5 m ausgegangen, in den großtechnischen Anlagen jedoch sind je nach Kläranlage unterschiedliche Förderhöhen im Zulauf zur Ozonung vorhanden (0 m bis 3,60 m)

### 7.5.2 Vergleich PAK: Versuche - Modell

Der Energiebedarf für die ausgewerteten großtechnischen Anlagen mit Pulveraktivkohle und einer betrachteten Zugabedosis von  $10 \text{ g/m}^3$  ergibt sich eine Spannweite des ermittelten Energiebedarfs von ca. 30 bis  $80 \text{ Wh/m}^3$  (siehe Bild 4-33). Innerhalb der Modellanlagen wurde der Bedarf zu  $45 \text{ Wh/m}^3$  (100.000 E) bzw.  $62 \text{ Wh/m}^3$  (20.000 E) bestimmt. Es ist erkennbar dass sich die Werte in der gleichen Größenordnung befinden und daher als plausibel bewertet werden können. Es ist aber auch hier festzuhalten, dass bei den großtechnischen Anlagen kein Energiebedarf für die Nachbehandlung (bspw. Sandfilter) angesetzt wurde, welcher aber (für die 20.000 E Modellanlage) in die 4. Reinigungsstufe mit einbezogen wurde. Ebenfalls sind in den Versuchen und in den

Modellanlagen nicht die gleichen Förderhöhen im Zulauf zur vierten Reinigungsstufe angesetzt worden. Wie schon bei der Reinigung mittels Ozonung wurde auch für die PAK-Adsorption eine Förderhöhe von 5 m angesetzt. Innerhalb der großtechnischen Anlagen sind unterschiedliche Förderhöhen vorhanden (0 m bis 3,44 m). Dennoch ist ersichtlich, dass die Größenordnung der Energiebedarfswerte sowohl für Modell als auch für Versuch relativ gut übereinstimmt.

### 7.5.3 Hinweise für die weitere Verwendung der Modellwerte

Die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Idealwerte für die zwei Modellanlagengrößen (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 Modellanlage 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 vorliegenden Berechnungstabellen einsetzen. Somit kann dann ein individuell theoretischer Bedarf errechnet bzw. abgeschätzt werden. Die Energiebedarfswerte der Modellanlagen können aber in keinem Fall als verallgemeinert zutreffende Richtwerte angesehen werden. Vielmehr stellen die Berechnungstabellen das nötige Werkzeug für Anlagenbetreiber dar, um eine grobe Abschätzung des zu erwartenden Energiebedarfs für die gegebene Ausgangslage zu erhalten.

## 7.6 Wesentliche Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch von Anlagen zur Spurenstoffelimination

Um Betreibern von Kläranlagen einen Anhaltspunkt zum Abwägen des Einsatzes einer Anlage zur Elimination von Spurenstoffen bzw. bei der Auswahl der jeweils bestmöglichen Anlagentechnik zu geben, werden nachfolgend die wesentlichen wirtschaftlichen Einflussfaktoren genannt, die den zu erwartenden Energiebedarf maßgeblich beeinflussen. Dabei unterscheiden sich die Einflussfaktoren beim Einsatz von Ozonung oder Aktivkohle insbesondere durch den Ort, an dem der Energieverbrauch anfällt. Die Ansätze werden nachfolgend dargestellt.

### 7.6.1 Ozonung

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, lässt sich der Energiebedarf für die Ozonung für die Systemgrenzen „auf der Kläranlage“ und „ganzheitlicher Energiebedarf“ ermitteln. Innerhalb der Modellanlagen wurden nur die Prozesse zusammengefasst, die auf dem Gelände der Kläranlage stattfinden. Im nachfolgenden werden die wesentlichen Einflussfaktoren für beide Bereiche kurz erläutert.

#### **Energiebedarf auf der Kläranlage**

Dieser setzt sich, wie in Kapitel 7.2.2 und 7.3.2 beschrieben, aus den wesentlichen Vorgängen „Ozonerzeugung“, „Ein- und Austrag“, „katalytische Restozonvernichtung“ und „Kühlung“ zusammen.

Der maßgebliche Einflussfaktor auf diese Bereiche ist die zu wählende Ozondosis. Je höher die einzubringende Dosis gewählt wird, desto höher ist auch der zu erwartende Energieverbrauch. Dies trifft besonders auf den Bereich der Ozonerzeugung, d. h. den Generator, zu, der auch im Vergleich zu den anderen genannten Vorgängen den größten Anteil am Verbrauch aufweist. Durch eine effektive Vorreinigung in der vorgeschalteten Kläranlage, die möglichst niedrige DOC-Werte im Zulauf zur Ozonung zur Folge hat, kann eine möglichst geringe, auf den DOC bezogene Ozondosis appliziert werden (vgl. auch Tabelle 8-1).

Die Ozonanlage arbeitet zudem effizienter, wenn sie im Bereich ihrer Auslegungsgröße betrieben wird. Entsprechend kann dem dynamischen Abwasserzufluss auch ein Einfluss auf den Energiebedarf zugeordnet werden. Liegt dieser deutlich niedriger als der Auslegungszufluss, steigt der spezifische Energiebedarf pro kg produziertem Ozon an (vgl. Bild 4-3). Eine geeignete Behandlungswassermenge ist entsprechend festzulegen (siehe 8.6.1).

Ein weiterer Einfluss auf den Energiebedarf der Ozonung wird durch die Wahl der Kühlung des Ozongenerators ausgeübt. Wird bspw. mit Abwasser gekühlt, ist der Energiebedarf für die Kühlung deutlich niedriger, als wenn ein gesondertes Kühlaggregat betrieben wird (vgl. auch PINNEKAMP ET AL., 2011).

Auch die Ausführung des Ozoneintrags hat einen Einfluss auf den Energiebedarf. In Duisburg-Vierlinden wurde für die Injektorstraße ein höherer Energiebedarf aufgrund des

Betriebs der zusätzlichen Injektorpumpe im Vergleich zur Diffusorstraße festgehalten (vgl. 4.1.3.)

Weiterhin übt die Nachbehandlung einen Einfluss auf den Energiebedarf aus. So geht ein Sandfilter mit einem höheren Energiebedarf einher als z. B. ein Schönungsteich (vgl. PINNEKAMP ET AL., 2011). Hier bleibt aber, wie bei der Modellanlage vorgestellt, zu beachten, ob diese Nachbehandlung der Spurenstoffelimination oder der bereits bestehenden Kläranlage zuzuordnen ist.

### **Ganzheitlicher Energiebedarf**

Der ganzheitliche Energieverbrauch beinhaltet neben dem Bedarf „auf der Kläranlage“ auch den Bereich der Bereitstellung des Sauerstoffs zur Ozonerzeugung. Dieser Sauerstoff kann entweder vor Ort auf der Anlage aus Umgebungsluft erzeugt werden oder aber als Flüssigsauerstoff angeliefert werden, wie es bei den hier betrachteten Anlagen der Fall ist. Bei der Anlieferung üben sowohl die zurückzulegende Entfernung als auch das Verhältnis von Sauerstoff zu Ozon einen Einfluss auf den Energiebedarf aus, wobei der Einfluss letzteren überwiegt (vgl. auch PINNEKAMP ET AL., 2011). Je mehr Sauerstoff für die Ozonherstellung verbraucht wird und je höher die zu erstellende Ozondosis, desto mehr Energie wird für die Sauerstoffgewinnung benötigt. Diese Kosten werden bei der Anlieferung von Flüssigsauerstoff rechnerisch nicht dem Energieverbrauch der Kläranlage zugeordnet, jedoch wird die für die Erzeugung benötigte Energie dann in den Betriebskosten für den Zukauf des zusätzlichen Betriebsmittels bezahlt und die Energie wird beim Produzenten des Flüssigsauerstoffs benötigt.

#### 7.6.2 Aktivkohle

Auch beim Einsatz von PAK wird zwischen Energieverbrauch „auf der Kläranlage“ und „ganzheitlicher Energiebedarf“ differenziert. Weiterhin wird zwischen PAK und GAK unterschieden.

##### 7.6.2.1 Pulveraktivkohle

#### **Energiebedarf auf der Kläranlage**

Im den Kapiteln 7.2.3 und 7.3.3 wurde der Energieverbrauch bei Verwendung von Pulveraktivkohle (PAK) zur Elimination von Spurenstoffen ausführlich dargestellt. Auf der Kläranlage werden dazu die Arbeitsschritte PAK Zugabe, Rühren und Rezirkulieren betrachtet. Im Gegensatz zur Ozonung gibt es hier keinen wesentlichen Einfluss der Dosis auf den Energieverbrauch auf der Kläranlage, da sich die Höhe der Aktivkohledosis nicht auf die Vorgänge wie Rezirkulieren oder Rühren auswirkt. Einen größeren Einfluss auf den Energiebedarf dieser Reinigungsstufe hat die anfallende Pumpenergie. Dieser Aspekt wird im nachfolgenden Kapitel 7.6.3 genauer erläutert.

Bei der Adsorption an PAK durch Zugabe in ein Kontaktbecken muss die Kohle noch aus dem Abwasser entfernt werden. Das erfolgt in den hier vorgestellten Beispielen (Mannheim, Böblingen-Sindelfingen, Kressbronn-Langenargen) mittels einer Kombination aus Sedimentation und Flockungsfiltration. 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.

### **Ganzheitlicher Energiebedarf**

Neben den Verfahrensschritten „auf der Kläranlage“ bei der Spurenstoffelimination kommen bei der Betrachtung des ganzheitlichen Energiebedarfs die Herstellung von Pulveraktivkohle und der zugehörige Bedarf an Energie zum Tragen. Maßgebend für die Höhe des Energiebedarfs ist die herzustellende Aktivkohle. Je höher die Dosis, desto größer der zu erwartende Energieverbrauch (siehe 5.2.1). Der Transport zum Verwendungsort fällt dabei nur geringfügig ins Gewicht.

#### 7.6.2.2 Granulierte Aktivkohle

### **Energiebedarf auf der Kläranlage**

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

### **Ganzheitlicher Energiebedarf**

Der Energieverbrauch beim Einsatz von granulierter Aktivkohle ist stark durch die Tatsache beeinflusst, ob die Wahl auf frische oder regenerierte/reaktivierte Aktivkohle fällt. Die Herstellung frischer granulierter Aktivkohle benötigt deutlich mehr Energie als die Regeneration/Reaktivierung von Aktivkohle (vgl. 5.2.3.). Der Energiebedarf fällt beim Herstellen der Aktivkohle an und wird daher indirekt in den Betriebskosten der Kläranlage berücksichtigt.

#### 7.6.3 Sonstige Einflussfaktoren

Sowohl beim Einsatz von Aktivkohle als auch von Ozon ist weiterhin festzuhalten, dass ein Großteil des entstehenden Energieverbrauchs zur Spurenstoffelimination „auf der Kläranlage“ durch den Einsatz von Pumpenergie entsteht. Dabei ist die zu überwindende Förderhöhe der ausschlaggebende Faktor. Der Energieverbrauch kann durch kluge Wahl des Standortes und damit einhergehende Vermeidung von erheblichen Höhenunterschieden minimiert werden. Insbesondere ein mehrfaches Anheben des Wassers ist zu vermeiden.

Auch die Größe der Kläranlage übt einen Einfluss auf den Energiebedarf aus, da viele Geräte unabhängig von der Größe der Kläranlage betrieben werden müssen und so bei großen Abwassermengen zu einem niedrigeren spezifischen Energiebedarf führen als auf sehr kleinen Kläranlagen.

## 8 Zusammenfassende Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination

### 8.1 Spurenstoffelimination

Ergebnisse zur Spurenstoffelimination auf den betrachteten Kläranlagen sind in den entsprechenden Kapiteln zum Energieverbrauch aufgeführt und auf die weitergehende Literatur wird entsprechend 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 O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> und 10 g PAK/m<sup>3</sup> 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 8-1 aufgeführten Dosierstufen für die Verfahren der Ozonung und der Adsorption an PAK in einem Kontaktbecken festgehalten. Für die Adsorption an PAK kann eine konkrete Dosiermenge festgehalten werden, für die Ozonung muss die auf den DOC-bezogene Ozonzehrung  $z$  (effektiv eingetragenes Ozon abzüglich des gelöst vorliegenden Ozons) berücksichtigt werden. Die Dosierstufen decken sich für den DOC der hier untersuchten Kläranlagen mit den unteren Dosiermengen aus Phase I (2,5 – 7,5 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>). Bei den Dosierstufen für die PAK-Adsorption muss beachtet werden, dass hier 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.

**Tabelle 8-1: Dosierstufen nach ARGE (2014)**

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

Bei der Ozonung in Bad Sassendorf und Duisburg-Vierlinden wurden bei der Basisdosierung die Arzneimittelwirkstoffe Diclofenac und Carbamazepin zu 70 % eliminiert und Sulfamethoxazol zu 55 %. Bei der mittleren Dosierung konnte für die drei Arzneimittelwirkstoffe die Elimination in der Ozonstufe auf 80 bis 90 % gesteigert werden und der Eliminationsgrad von Metoprolol stieg von 30 auf 75 % an. Die Hochdosierung führte für Diclofenac und Carbamazepin zu keiner weiteren Steigerung des Eliminationsgrads; für Sulfamethoxazol wurde ein Anstieg des Eliminationsgrads auf 90 % festgestellt und für Metoprolol auf bis zu 85 %. Für das Flammenschutzmittel TCPP und das Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure wurde für keine Dosierstufe eine Konzentrationsabnahme erzielt. Bei der dynamischen Rezirkulation in Schwerte wurden bei der Basisdosierung Diclofenac, Carbamazepin, Metoprolol und Sulfamethoxazol bereits um mehr als 50 % (Bilanzgrenze: Zulauf Belebungsbecken, Ablauf Nachklärung) eliminiert. Ein weiterer Anstieg der Elimination wurde für die Arzneimittelrückstände jedoch erst bei

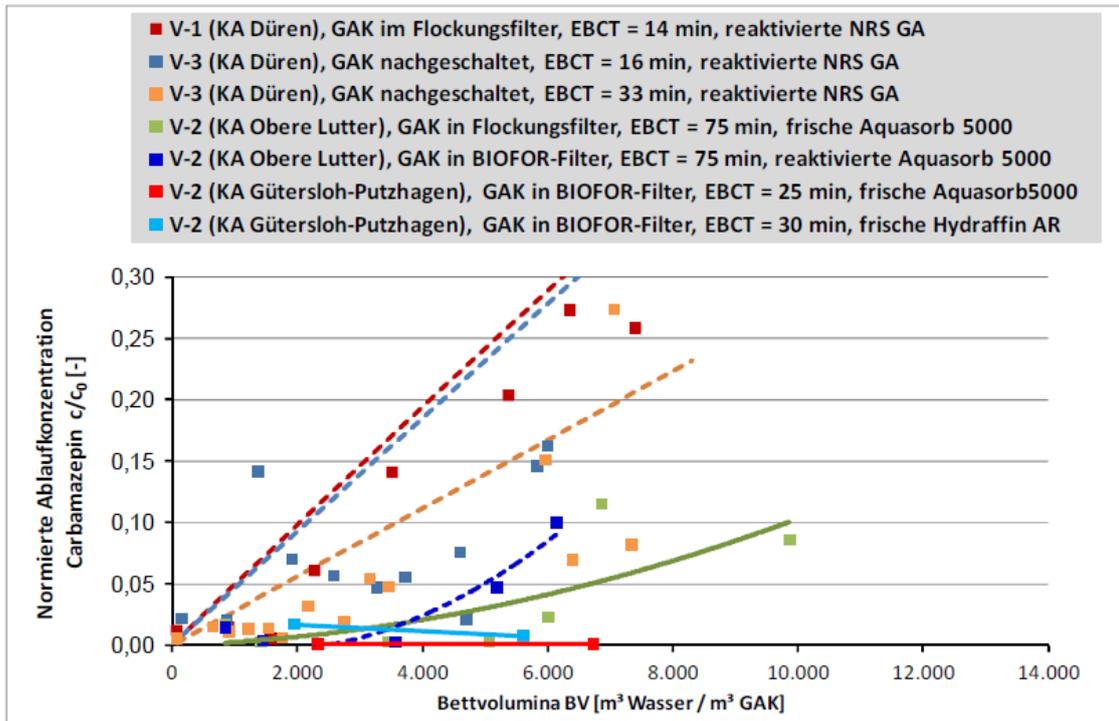
der Hochdosierung festgestellt. Die erreichten Konzentrationen im Ablauf sind höher als bei der Ablaufozonung in Duisburg-Vierlinden und Bad Sassendorf [ARGE, 2014].

Für die PAK-Dosierung auf der KA Schwerte im Rezirkulationsbetrieb wurde für die betrachteten Stoffe bei der Basisdosierung von PAK eine durchschnittliche Elimination in einem Bereich von 40 bis 75 % (Bilanzgrenze: Zulauf Belebungsbecken, Ablauf Nachklärung) erreicht. Die Verdopplung der PAK-Zugabemenge führte für nahezu alle Substanzen zu einem nennenswerten Anstieg der Elimination; so wurden für die in ARGE (2014) betrachteten Arzneimittelwirkstoffe Eliminationsgrade von 75 bis 80 % erreicht. Die Anwendung der Hochdosierungsstufe führte zu einem weiteren Anstieg der Elimination. Amidotrizoesäure konnte bei keiner der angewandten Dosierstufen nennenswert eliminiert werden. Im Vergleich zur Ozonung werden bei der Zugabe von PAK geringere stoffspezifische Ablaufkonzentrationen festgestellt [ARGE, 2014]. Der gute Rückhalt an Spurenstoffen bei einer Zugabe von 10 g PAK/m<sup>3</sup> (mittlere Dosierung) im Rezirkulationsbetrieb auf der KA Schwerte steht im Einklang mit den Ergebnissen aus Wuppertal, Mannheim und Böblingen-Sindelfingen (vgl. 4.1.4, 4.1.7 und 4.1.8). Auf diesen Kläranlagen findet jedoch eine nachgeschaltete Adsorption statt und die jeweils unterschiedlichen Betrachtungsgrenzen für die Eliminationsgrade sind zu beachten (Mannheim: Zulauf Adsorptionsstufe, Böblingen-Sindelfingen: Zulauf Kläranlage, Wuppertal: Zulauf Filter und Zulauf Kläranlage). Durch eine Zugabe von 20 g PAK/m<sup>3</sup> wurden beispielsweise in Mannheim und Wuppertal-Buchenhofen weitergehende Eliminationsgrade im Vergleich zur Zugabe von 10 g PAK/m<sup>3</sup> festgestellt, weswegen für eine nachgeschaltete PAK-Adsorption Dosiermengen zwischen 10 und 20 g/m<sup>3</sup> als sinnvoll erachtet und im Folgenden betrachtet werden.

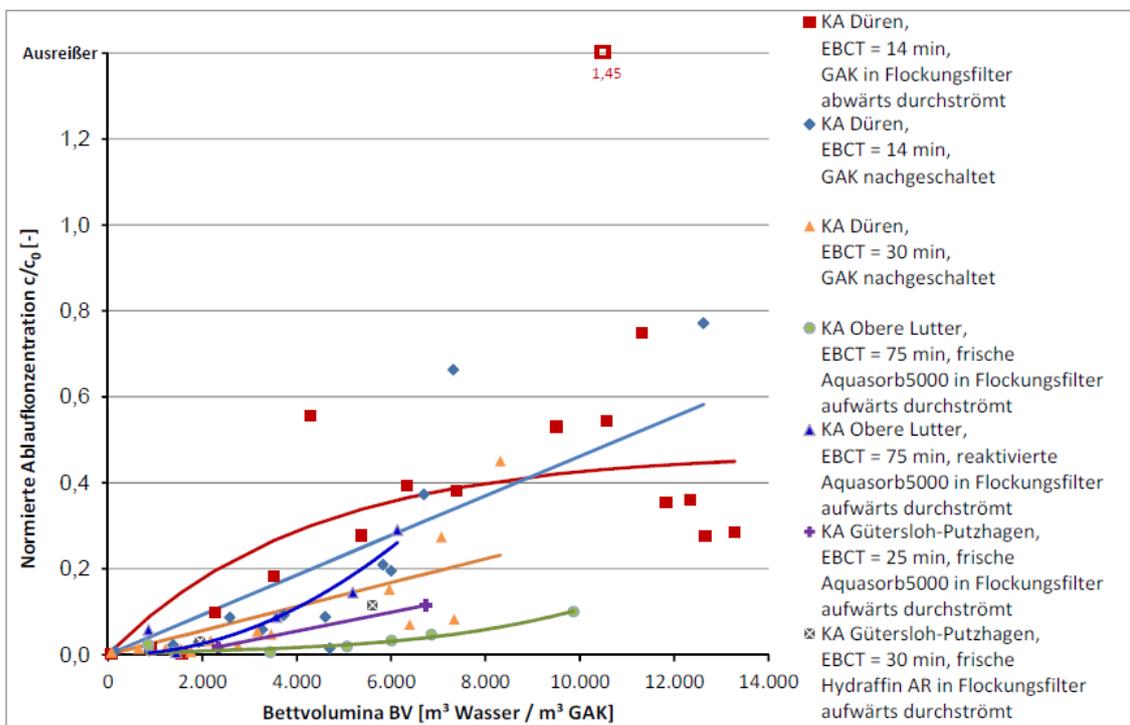
Die in ARGE (2014) eingeführten Dosierstufen zeichnen sich demnach dadurch aus, dass bei der Basisdosierung bei den meisten Spurenstoffen eine signifikante Eliminationsleistung (> 50 %) erzielt wird. Die mittlere Dosierung führt bei weiteren einzelnen Spurenstoffen zu hohen Eliminationsleistungen von bis zu rund 80 %. Bei der Hochdosierung werden stoff- und verfahrensspezifisch noch weitgehendere 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 bezogenen durchgesetzten Wassermengen, angegeben werden. Je nach gewähltem Abbruchkriterium und gewählter Filtergeschwindigkeit bzw. Kontaktzeit im Filter (Empty Bed Contact Time, EBCT) kann die Standzeit eines GAK-Filters mehrere Monate betragen. Der Rückhalt an Spurenstoffen nimmt während der Laufzeit ab. Zur Veranschaulichung sind in Bild 8-1 und Bild 8-2 normierte Filtratkonzentration  $c/c_0$  verschiedener Festbettadsorptionsversuche in Düren, Gütersloh-Putzhagen und auf dem Klärwerk Obere Lutter für Carbamazepin bzw. für Diclofenac dargestellt. Die normierten Ablaufkonzentrationen nehmen im Verlauf der Zeit zu; entsprechend sinkt der Rückhalt an Spurenstoffen. 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., 2013B]. Die Übertragung 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/m<sup>3</sup> (vgl. Tabelle 5-2).



**Bild 8-1:** Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration  $c/c_0$  verschiedener Festbettadsorptionsversuche für den Spurenstoff Carbamazepin [NAHRSTEDT ET AL., 2013B]



**Bild 8-2:** Auf den Zulauf normierte Filtratkonzentration  $c/c_0$  verschiedener Festbettadsorptionsversuche für den Spurenstoff Diclofenac [NAHRSTEDT ET AL., 2013B]

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 8-3) keine erzielbare Spurenstoffelimination ein.

## 8.2 Energieverbrauch auf der Kläranlage

Die ausgewerteten Daten für die **Ozonung** in Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden liegen im Bereich von ca.  $0,04 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  bis ca.  $0,17 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$ . Die Umrechnung auf Primärenergie (PE) (aus nicht erneuerbaren Quellen, vgl. 5.1) führt hier zu Werten von  $0,09 \text{ kWh}/\text{m}^3$  bis ca.  $0,37 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . 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  $7 \text{ g O}_3/\text{m}^3$ . Nachbehandlungen zum Abbau von Transformationsprodukten wurden bei den betrachteten Anlagen nicht berücksichtigt. Der spezifische Energieverbrauch der Modellanlagen von  $0,11 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  für 100.000 E bzw. von  $0,13 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  für 20.000 E (höherer Verbrauch durch Mitbetrachtung Filtration (als biologische Nachbehandlung) für die weitergehende Reinigungsstufe) bei einer Zugabe von  $5 \text{ g}/\text{m}^3$  Ozon liegt in ähnlichen Bereichen (vgl. 7.5.1).

Die für die ausgewerteten PAK-Anlagen ermittelten Werte liegen zwischen ca.  $0,02$  und  $0,08 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  bei Dosiermengen zwischen 5 und  $20 \text{ g PAK}/\text{m}^3$  (auch  $40 \text{ g PAK}/\text{m}^3$  in Wuppertal). Der Primärenergiebedarf entspräche hierbei  $0,04$  bis  $0,18 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . Der zusätzliche Energieverbrauch einer **PAK-Adsorptionsstufe** (PAK-Zugabe in ein Kontaktbecken und PAK-Zugabe in die Flockungsfiltration) kann im Bereich von  $0,025$ - $0,035 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  festgehalten werden. Die abschließende Filtration/PAK-Abtrennung erhöht den Verbrauch noch um  $0,01$ - $0,05 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  (PE:  $0,02$  bis  $0,11 \text{ kWh}/\text{m}^3$ ), ist auf einigen Kläranlagen jedoch bereits zur Suspensa-Entnahme in Betrieb. Eventuell zu überwindende Förderhöhen erhöhen den Strombedarf. Die Werte aus der Modellanlage liegen bei  $0,05 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  für 100.000 E bzw. bei  $0,06 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  für 20.000 E (die Filtration wird hier mit berücksichtigt) und passen sehr gut mit den großtechnischen Auswertungen der Messwerte an den großtechnischen Anlagen zusammen (vgl. 7.5.2). 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 (vgl. Bild 5-7). Der zusätzliche Energiebedarf der Schlammbehandlung durch die erhöhte Schlammmenge ist als sehr gering einzuschätzen, wie die Modellanlagen zeigen ( $0,002 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$  für die 100.000 E Anlage, vgl. Tabelle 7-27 und Tabelle 7-28).

Die sich für die Anlagen mit **GAK-Filtration** ergebenden Werte liegen zwischen ca. 0,02 und 0,06 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup> (Primärenergie: 0,04 bis 0,13 kWh/m<sup>3</sup>). 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) ausdrücklich der Spurenstoffelimination zuzuschreiben ist oder der konventionellen Abwasserreinigung zuzuschreiben ist.

Der Bezug auf Einwohnerwerte kann an dieser Stelle nicht eindeutig hergestellt werden, da es immer von der anlagenspezifischen Auslegung (Anteil an der gesamten Abwassermenge, die der Spurenstoffelimination zugeführt wird) abhängt. So wurde bei den Modellanlagen der Bezug auf Einwohnerwerte über den Trockenwetterzufluss gezogen, da hier davon ausgegangen wird, dass die Auslegung auf diesen erfolgt. Der Bezug auf CSB-Frachten kann nur kläranlagenspezifisch hergestellt werden und nicht verallgemeinert werden. Für die Anlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden wird der Bezug in den entsprechenden Kapiteln zum Energiebedarf (vgl. 4.1.1, 4.1.2, und 4.1.3) erläutert. Tabelle 8-2 fasst diese Werte zusammen.

**Tabelle 8-2: Einwohnerspezifischer Energieverbrauch auf der Kläranlage für die Spurenstoffelimination auf den Kläranlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden (nach ARGE, 2014)**

Energieverbrauch auf der Kläranlage in kWh/(E·a)		
Anlage	Verfahren	Energieverbrauch auf der Kläranlage in kWh/(E·a)
<b>Bad Sassendorf</b>	2 g/m <sup>3</sup> O <sub>3</sub>	6 kWh/(E <sub>CSB,mittel</sub> ·a)
<b>Schwerte</b>	10 g/m <sup>3</sup> PAK (Rezi) (optimierte Betrachtung)	15 kWh/(E <sub>CSB,mittel</sub> ·a)
	10 g/m <sup>3</sup> PAK (Rezi) (optimierte Betrachtung, ohne Rezi-Pumpwerk)	5 kWh/(E <sub>CSB,mittel</sub> ·a)
	5 g/m <sup>3</sup> O <sub>3</sub> (Rezi) (optimierte Betrachtung)	29 kWh/(E <sub>CSB,mittel</sub> ·a)
	5 g/m <sup>3</sup> O <sub>3</sub> (Rezi) (optimierte Betrachtung, ohne Rezi-Pumpwerk)	16 kWh/(E <sub>CSB,mittel</sub> ·a)
	2 g/m <sup>3</sup> O <sub>3</sub> und 5 g/m <sup>3</sup> PAK (Rezi) (optimierte Betrachtung)	26 kWh/(E <sub>CSB,mittel</sub> ·a)
	2 g/m <sup>3</sup> O <sub>3</sub> und 5 g/m <sup>3</sup> PAK (Rezi) (optimierte Betrachtung, ohne Rezi-Pumpwerk)	13 kWh/(E <sub>CSB,mittel</sub> ·a)
<b>Duisburg-Vierlinden</b>	5 g/m <sup>3</sup> O <sub>3</sub>	6 kWh/(E·a)

Die drei aufgeführten Kläranlagen gehören alle der Größenklasse 4 an. Für diese Größenklasse lag der mediane Energieverbrauch im Jahr 2011 zum Vergleich bei 34,9 kWh/(E·a) [DWA, 2012]. Der relative Anstieg läge bei einem Anstieg des Energieverbrauchs von 6 kWh/(E·a), wie für Bad Sassendorf und Duisburg-Vierlinden berechnet, bei 17 %. Die einwohnerspezifischen Energiebedarfswerte auf der KA Schwerte sind aufgrund des Rezirkulationsbetriebes (Pilotcharakter der Anlage) deutlich höher als die Werte für Duisburg-Vierlinden und Bad Sassendorf. Auch ohne Betrachtung des Rezirkulationspumpwerks ist aufgrund des vermehrten Durchlaufes der Nachbehandlung ein höherer Energiebedarf je Einwohner gegeben. Die Berechnungen für die KA Schwerte unterstreichen nochmal, dass die Zudosierung von PAK mit einem deutlich niedrigeren Mehrbedarf als die Ozonung verbunden ist, da Ozon energieintensiv vor Ort hergestellt werden muss. Im Vergleich zu diesen Werten ergibt sich für die Modellanlage mit 20.000 E ein Mehrbedarf von 8,72 kWh/(E·a) für die Ozonung und von 4,27 kWh/(E·a) für die PAK-Adsorption bei Bezug auf den Trockenwetterzufluss und energetischer Mitbetrachtung des Sandfilters für beide Verfahren.

Eine verallgemeinerte Aussage zum relativen Anstieg des Energieverbrauchs der Kläranlage 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 als auf, aus energetischem Aspekt, schlechter abschneidenden Kläranlagen führen.

### 8.3 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 5 erörtert, an dieser Stelle wird nur der Verbrauch außerhalb der Kläranlage betrachtet. Die Bandbreiten der Berechnungen aus Phase I konnten aufgrund der Ergebnisse der ersten Projektphase auf spezifische Dosiermengen eingegrenzt werden. In der zweiten Projektphase wird zudem die elektrische Energie auf Primärenergie umgerechnet, um elektrische und thermische Energie vergleichen zu können.

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/m<sup>3</sup> für Dosiermengen zwischen 2,5 und 7,5 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> (vgl. Bild 5-3). Dem Sauerstofftransport kommt nur eine untergeordnete Rolle zu.

Der Hauptanteil am Energiebedarf für die Zugabe von PAK ist auf die Herstellung (Aktivierung) der Kohle zurückzuführen. Hierfür wird überwiegend thermische Energie genutzt, die an dieser Stelle als primäre Energie betrachtet wird. Der primäre Energiebedarf beim mittleren Szenario liegt für Dosiermengen zwischen 10 und 20 g PAK/m<sup>3</sup> zwischen 0,36 und 0,72 kWh/m<sup>3</sup> für die Bereitstellung der PAK (vgl. Bild 5-7). 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 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/m<sup>3</sup>, also sehr hohen Bettvolumina) bis 2,15 kWh/m<sup>3</sup> (bei 60 g GAK/m<sup>3</sup>) (vgl. Bild 5-21). Bei der Verwendung von Regenerat können durch die Einsparung von Frischkohle bei mittleren Annahmen Werte zwischen 0,17 (bei 10 g GAK/m<sup>3</sup>,) bis 1,01 kWh/m<sup>3</sup> (bei 60 g GAK/m<sup>3</sup>) angesetzt werden (vgl. Bild 5-22). Durch die Verwendung von Regenerat kann demnach mit diesen Annahmen etwa die Hälfte an Energie eingespart werden.

Der Energiebedarf außerhalb der Kläranlage erhöht den gesamten Energiebedarf der betrachteten Verfahren, insbesondere für die Herstellung und Regeneration von Aktivkohle. Die Werte für die Bereitstellungsenergie der Kohle sind mit großen Unsicher-

heiten verbunden. Die dem hier betrachteten mittleren Szenario zu Grunde liegende Bandbreiten für den minimalen und maximalen Ansatz divergieren sehr stark.

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

## 8.4 CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die ermittelten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind in Tabelle 6-7 aufgeführt (Berechnung für Ozonung und Adsorption an PAK, Fallbeispiel für GAK) und erläutert. Es konnte festgestellt werden, dass eine deutliche Erhöhung im Vergleich zur konventionellen Abwasserreinigung (0,145 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (REMY ET AL. (2011))) für alle Verfahren gegeben ist. Die Werte sind mit großen Spannweiten verbunden und liegen für die adsorptiven Verfahren im Allgemeinen höher als für die Ozonung. Die mittleren Emissionen für die Ozonung liegen bei Dosiermengen zwischen 2,5 und 7,5 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> zwischen 0,06 und 0,13 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (vgl. Bild 6-2). Bei der Adsorption an PAK liegen die Werte zwischen 0,15 und 0,24 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (vgl. Bild 6-4) für Dosiermengen zwischen 10 und 20 g PAK/m<sup>3</sup>. Bei der Verwendung von Reaktivat konnten 0,19 kg CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup><sup>7</sup> (51 g GAK/m<sup>3</sup>) für die GAK-Filtration festgehalten werden, die Verwendung von Frischkohle führt zu 0,26 kg CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup> (33 g GAK/m<sup>3</sup>) (vgl. 6.3).

Transport und Infrastruktur spielen für alle Verfahren nur eine untergeordnete Rolle. Für alle Verfahren können sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Abhängigkeit der zu überwindenden Förderhöhen auf der Kläranlage erhöhen. Bei der Ozonung wird nahezu die gesamte CO<sub>2</sub>-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/Reaktivierung der Aktivkohle sind jedoch mit Unsicherheiten (divergierende Angaben, Verschwiegenheit der Hersteller) verbunden und es besteht weiterer Bedarf an Forschung und CO<sub>2</sub>-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 bzw. Reaktivierung) der Aktivkohle können durch das Zurückgreifen auf sekundäre Brennstoffe für die Bereitstellung der notwendigen hohen Temperaturen CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Die Verwendung von

---

<sup>7</sup> Es kann hier davon ausgegangen werden, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen maßgeblich sind, und andere Treibhausgase wie N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> eine untergeordnete Rolle spielen, so dass die Werte für CO<sub>2</sub> und CO<sub>2e</sub> verglichen werden können (vgl. 6.2.2)

Aktivkohle aus nachwachsbaren Rohstoffen kann ebenfalls zu Einsparungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen. Dies ist jedoch erst machbar, wenn Ergebnisse zur Praktikabilität und Effizienz der Anwendung solcher Kohlen zur Spurenstoffelimination vorliegen.

## 8.5 Bewertungstabelle

Tabelle 1-1 zeigt die Bewertungsmatrix aus der ersten Projektphase. Im Rahmen des vorliegenden Berichts wurden Erkenntnisse aus zehn großtechnischen Anlagen zur Anwendung der Ozonung, der Adsorption an PAK und der Filtration über GAK auf kommunalen Kläranlagen gewonnen. Die Ergebnisse ermöglichen nun eine Aktualisierung der Erkenntnisse aus der ersten Projektphase, die in Tabelle 8-3 tabellarisch dargestellt ist. Wie bereits erwähnt, kann aufgrund der guten Leistung aller betrachteten Verfahren keine Empfehlung hinsichtlich der Spurenstoffelimination gezogen werden, weswegen diese nicht Bestandteil der Bewertungstabelle ist. Die Kosten werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet (siehe hierzu TÜRK ET AL., 2013). Auch werden die Verfahren der Membranfiltration und die Advanced Oxidation Processes nicht weiter berücksichtigt.

Tabelle 8-3 zeigt eine aktualisierte tabellarische Bewertung für die drei untersuchten Verfahren Ozonung, PAK-Adsorption und GAK-Filtration. Bei der Filtration über GAK wird zusätzlich zwischen Verwendung von Frischkohle und Regenerat/Reaktivat unterschieden. Für die nachgeschaltete Ozonung können die Dosiermengen aus Phase I auf 2 bis 7 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> (2,5 bis 7,5 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> für die Berechnungen für Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage und CO<sub>2</sub>-Emissionen) und für die nachgeschaltete PAK-Adsorption auf 10 bis 20 g PAK/m<sup>3</sup> eingegrenzt werden. Bei der GAK-Filtration kann keine Eingrenzung erfolgen, so dass weiterhin äquivalente Dosiermengen von 10–60 g GAK/m<sup>3</sup> betrachtet werden.

Für die drei Kategorien Energieverbrauch auf der Kläranlage, Energieverbrauch außerhalb der Kläranlage und CO<sub>2</sub>-Emissionen werden die Haupteigenschaften aus der zweiten Projektphase aufgeführt. Der Energiebedarf für die Filtration zum Rückhalt der PAK ist gesondert aufgeführt, da Kläranlagen zum Teil schon über eine solche verfügen und diese dann nicht zwangsläufig der weitergehenden Reinigungsstufe zugeordnet werden kann. 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 mit berücksichtigt.

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 somit weiterhin geringer als derjenige der adsorptiven Verfahren. Bei der Ozonung fällt der 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 Werte für die Aktivkohleherstellung/-Regeneration bzw. -Reaktivierung ist jedoch auch weiterhin nicht gegeben. Sollte sich die Verwendung regenerierter 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 ausgewerteten, biologische Nachbehandlung erhöht. Je nachdem welche Zielwerte für welche Stoffe in Zukunft festgelegt werden, können sich die hier getroffenen Aussagen jedoch ändern.

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Spurenstoffelimination als Verfahren der weitergehenden Abwasserreinigung mit einem erheblichen zusätzlichen Energiebedarf einhergeht. Diesem ist jedoch der, bislang schwer quantifizierbare, erzielte Schutz für Mensch und Umwelt gegenüberzustellen.

Andere Möglichkeiten der Energieeinsparung können den Mehrbedarf an Energie kompensieren und werden im folgenden Kapitel erläutert.

Tabelle 8-3: Zusammenfassende energetische Bewertung der Verfahren zur Spurenstoffelimination

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

\*keine Betrachtung des Transports der Hilfsmittel

## 8.6 Empfehlungen für Planung und Betrieb von Anlagen zur Spurenstoffelimination

An dieser Stelle sollen einige Empfehlungen zur Planung und zum Betrieb von Anlagen zur Spurenstoffelimination aufgezeigt werden. Diese ergeben sich aus den vorliegenden Projektergebnissen aber auch aus sonstigen Forschungsprojekten. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf dem Energiebedarf.

### 8.6.1 Behandlungswassermenge

Ein Aspekt, der bei der Planung einer Anlage zur Spurenstoffelimination zu berücksichtigen ist, ist die zu behandelnde Abwassermenge. Falls analytische Befunde zeigen, dass der betroffene Vorfluter besonders sensibel ist und nur geringe Wassermengen führt oder außerordentlich hohe Spurenstoffbelastungen in der Kläranlage vorliegen, soll eine individuelle Prüfung erfolgen und ggf. eine Vollstrombehandlung vorgesehen werden. Im Falle von immissionsbasierten Vorgaben kann die Behandlungswassermenge mit einem immissionsbasierten Ansatz ermittelt werden. Ist keine Vollstrombehandlung notwendig, ist eine geeignete Teilstrombehandlung zu wählen. [ARGE, 2015]. So zeigen Modellbetrachtungen von METZGER (2010), dass die Behandlung des maximalen Mischwasserzuflusses die eingetragene Fracht im Vergleich zur Behandlung des maximalen Trockenwetterzuflusses lediglich um 7 % reduziert. Bei Auslegung auf den Trockenwetterzufluss ist das DWA-Arbeitsblatt A-198 (2003) „Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen“ zu nutzen. Die Auslegung soll mindestens auf den Spitzenabfluss bei Trockenwetter ( $Q_{T,max}$ ) ausgelegt werden. Ist die Datenlage hierfür nicht ausreichend, ist der maximale stündliche Trockenwetterabfluss ( $Q_{T,h,max}$ ) heranzuziehen. Scheidet diese Möglichkeit auch aus, muss der maximale Trockenwetterabfluss mit den Aufsichtsbehörden abgestimmt werden [ARGE, 2015]. Der Einfluss von Fremdwasser ist bei der Planung zu berücksichtigen [ARGE, 2014]. Die Auslegungswassermengen sind in jedem Falle mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen [ARGE, 2015].

Durch die Auswahl einer adäquaten Behandlungswassermenge kann der Energiebedarf der Spurenstoffelimination niedrig gehalten werden. Der spezifische Energiebedarf pro m<sup>3</sup> Abwasser ist zwar durch die Auswahl der Behandlungswassermenge nicht betroffen, der Anstieg des gesamten Energiebedarfs (kWh/(E·a)) der Anlage hängt jedoch von der zu behandelnden Abwassermenge ab.

### 8.6.2 Verfahrensauswahl

Bei der Wahl eines geeigneten Verfahrens sollte im Vorfeld ein umfangreiches Screening der jeweiligen **Abwassermatrix** hinsichtlich unterschiedlicher Spurenstoffe wie Arzneimittel, Flammenschutzmittel, endokrine Substanzen und Moschusduftstoffe erfolgen. Hierzu sollten 24h-Mischproben über mindestens drei Tage, besser über eine Woche, genommen werden [MAUS ET AL., 2014]. Vorschläge für Substanzen für das erste Screening können ARGE (2015) entnommen werden. Außerdem sollten abwassertechnische Parameter wie DOC, SAK<sub>254</sub>, und AFS untersucht werden. Eine effektive

mechanisch-biologische Vorreinigung ist Voraussetzung für eine weitergehende Abwasserreinigung mit Spurenstoffelimination. Für eine Ozonung sollte zudem Bromid, als Vorgängersubstanz für das bei der Oxidation entstehende toxische Bromat, mit in den Untersuchungsumfang aufgenommen werden. Die Denitrifikationsleistung der biologischen Stufe ist ebenfalls zu überprüfen, da eine Konkurrenzoxidation von Nitrit zu einem erhöhten Ozonbedarf führt ( $3,43 \text{ g O}_3/\text{g NO}_2\text{-N}$ ).

Weiterhin können Laborversuche Hinweise zur Eignung der unterschiedlichen Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination aus einer definierten Abwassermatrix geben. So können Ozonzehrungsversuche, Adsorptionsisotherme oder Filtersäulentests Aufschluss über die Eignung eines Verfahrens liefern [MAUS ET AL., 2014; ARGE, 2014; ARGE, 2015]. Durch intensive **Voruntersuchungen** kann das für den Anwendungsfall am besten geeignete Verfahren ausgewählt werden und so der zusätzliche Energiebedarf niedrig gehalten werden.

Machbarkeitsstudien, die mögliche Varianten zum Neubau und Umbauvarianten vergleichen, können neben der Elimination von Spurenstoffen auch technische, organisatorische und monetäre Aspekte bewerten und die Verfahrensauswahl unterstützen. Die Betrachtung der Vollstrombehandlung in Machbarkeitsstudien wird empfohlen [ARGE, 2015].

Ein weiterer zu beachtender Punkt ist die möglichst leichte Implementierung der zusätzlichen Verfahrensstufe in die **bestehende Kläranlage**. Hierbei muss untersucht werden, ob ggf. vorhandene Bauwerke und Anlagenteile genutzt werden können und ob die notwendigen erforderlichen Flächen vorhanden sind.

Bei der Errichtung einer Ozonung werden Flächen für die Peripherie, wie der Sauerstofftank, die Generatoren und die EMSR-Technik benötigt. Beim eigentlichen Ozonreaktor kann ggf. auf bestehende Volumina zurückgegriffen werden, sofern das erforderliche Volumen und die Mindestdiefe vorhanden sind oder ggf. durch Aufstockung erreicht werden. Bei der Implementierung einer Ozonanlage ist auf Ozonbeständigkeit der Materialien zu achten. [ARGE, 2014]

Bei einer nachgeschalteten PAK-Adsorptionsstufe wird neben dem Kontaktreaktor ein Absetzbecken benötigt, so dass in der Regel ein höherer Platzbedarf als bei der Ozonung gegeben ist. Für das Kontaktbecken und/oder das Sedimentationsbecken können ggf. vorhandene Becken genutzt werden. Auch bestehende Filter können für die Feinabtrennung der PAK benutzt werden, wobei hier eine höhere Feststoffbelastung des Filters durch die PAK vorliegt. Auch könnte die abrasive Wirkung der PAK zu Problemen in Leitungen und Pumpen führen. Weitere Komponenten bei der PAK-Stufe sind die nachgeschaltete Filteranlage, die Flächen für Lagerung und die Dosierung der PAK, Fäll- und Flockungshilfsmittel sowie Platz für die EMSR-Technik. [ARGE, 2014]

Weiterhin besteht aber auch die Möglichkeit einer Umsetzung im Rezirkulationsbetrieb (vgl. Schwerte) oder der Zugabe in den Überstau eines Filters (Wuppertal-Buchenhofen). Im Falle einer Zugabe von PAK kann aufgrund der Entsorgung dieser mit dem Klär-

schlamm eine landwirtschaftliche Klärschlammverwertung nicht mehr stattfinden. [ARGE, 2014]

Bei der Filtration über GAK gibt es ebenfalls die Möglichkeit der Umrüstung eines bestehenden Filters; dabei sind die Auswirkungen des Austauschs des Filtermaterials auf den Filterbetrieb in der Planung zu berücksichtigen. [ARGE, 2014]

Bei allen der konventionellen Belebungsstufe nachgeschalteten Verfahren sollte auf möglichst kurze Wege und geringe **Förderhöhen** geachtet werden, um den Energieverbrauch niedrig zu halten.

### 8.6.3 Planung und Betrieb einzelner Verfahren

#### 8.6.3.1 Ozonung

Durch Auswahl einer optimierten, auf den DOC bezogenen Ozondosiermenge kann der zusätzliche Energieverbrauch auf der Kläranlage einer Ozonung gering gehalten werden, da der Generator weniger Leistung aufbringen muss. Grundsätzlich sollte der Generator im Bereich seiner Auslegungsgröße genutzt werden, um energetisch optimal betrieben zu werden. Zur Ozonerzeugung können moderne Konverter eingesetzt werden, die ca. 9 bis 10 kWh benötigen, um ein Kilogramm Ozon aus Flüssigsauerstoff herzustellen [MAUS ET AL., 2014]. Um Energie zu sparen, sollte die Möglichkeit einer Kühlung des Ozongenerators mit Abwasser geprüft werden. Auf eine möglichst feststoffarme Entnahme durch eine geeignete Wahl der Entnahmestelle des Kühlwassers ist hierbei zu achten. Vor dem Plattenwärmetauscher sollte zudem ein Beutelfilter das Kühlwasser filtrieren, um Verstopfungen vorzubeugen. In Duisburg-Vierlinden wurde diese Maßnahme implementiert. [ARGE, 2014]

Das Kontaktbecken sollte so ausgelegt sein, dass eine ausreichende Kontaktzeit zwischen Wasser und Gas gegeben ist (10–30 Minuten), damit das Ozon mit den Abwasserinhaltsstoffen reagieren kann. Weiterhin sollte ein Austrag des Ozons sowohl aus der Gasphase als auch aus dem Ablauf der Anlage vermieden werden. Dazu ist die Ozonzehrung im Vorfeld zu ermitteln. Numerische Strömungssimulationen (CFD, Computational Fluid Dynamics) der Gas- und Wasserphase können zur Auswahl eines optimierten Reaktordesigns beitragen. Grundsätzlich sind Rohrreaktoren, Schlaufenreaktoren mit Leitwänden und kaskadierte Beckenvolumina möglich [ARGE, 2015]. Eine möglichst enge Verweilzeitverteilung ist anzustreben. Für weitere planerische Hinweise wird an dieser Stelle auf ARGE (2014), ARGE (2015) und MAUS ET AL. (2014) verwiesen. Um einen guten Ozoneintrag zu gewährleisten und so einen Austrag des Ozons aus der Gasphase zu vermeiden, soll beim Eintrag mit Ozondiffusoren eine Beckentiefe von mindestens 5 m vorgehalten werden. Diese Tiefe ist beim Eintrag mit einer Injektorpumpe nicht notwendig, allerdings fällt hierzu zusätzliche Energie zum Betrieb der Treibwasserpumpe an (siehe auch 4.1.3.). Wird ein Diffusor zum Ozoneintrag gewählt, ist darauf zu achten, dass dieser minimale und maximale Gasbeaufschlagungen aufzeigt und diese mit der Spannweite des minimalen und maximalen Ozoneintrags kompatibel sein müssen. Die minimale Gasbeaufschlagung muss auch im Schwachlastbetrieb eingehalten werden. Dies kann dazu führen, dass unnötig Sauerstoff (niedrige Ozonkonzentration im

Gasstrom) verbraucht wird, nur um den Betrieb des Diffusors zu gewährleisten. Eine andere Möglichkeit ist die Überprüfung der Zu- und Abschaltung einzelner Diffusoren. Die Ermittlung der benötigten Belüftereinheiten sollte demnach auch die Schwachlastzeiten berücksichtigen. [ARGE, 2014; ARGE, 2015]

Zur Steuerung der Ozondosis wird in ARGE (2015) die zulaufmengenproportionale Dosierung als Standard für Kläranlagen mit weniger als 100.000 E und gleichmäßigen DOC-Werten angesehen. Eine direkte Empfehlung zur Steuerung/Regelung mit Auswirkungen auf den Energieverbrauch kann an dieser Stelle nicht ausgesprochen werden.

Grundsätzlich soll bei der Ozonung darauf geachtet werden, dass möglichst wenig Ozon produziert werden muss und möglichst wenig Sauerstoff verbraucht wird. So kann der Aufwand für Energie und die damit verbundenen Kosten möglichst niedrig gehalten werden.

Bei der biologischen Nachbehandlung zur Elimination von Transformationsprodukten sollte ebenfalls geprüft werden, inwiefern bestehende Bauwerke, wie z. B. Sandfilter genutzt werden können. Weiterhin sollte hier im Vorfeld auf geringe Förderhöhen geachtet und/oder die Anwendung energetisch günstiger Verfahren wie Schönungsteiche geprüft werden.

#### 8.6.3.2 Adsorption an Pulveraktivkohle

Der zusätzliche 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 in der biologischen Stufe stattfinden, damit möglichst wenig PAK benötigt wird. Restadsorptionskapazitäten der Kohle sollten durch eine Rückführung der Kohle bestmöglich ausgenutzt werden.

Die Kontaktzeit bei der Zugabe in ein Kontaktbecken soll mindestens 30 Minuten für den Bemessungszufluss betragen. Bei Zugabe in den Flockungsraum eines Filters können kürzere Verweilzeiten Anwendung finden. Hier muss allerdings darauf geachtet werden, dass die Kohle bei hydraulischen Spitzen nicht ausgeschwemmt wird [ARGE, 2015].

Die Dosierung der PAK kann laut ARGE (2015) proportional zur Zulaufmenge erfolgen. Das Dosiersystem kann beispielsweise gravimetrisch arbeiten, muss mit einem Ex-Schutz ausgerüstet sein und sollte regelmäßig kalibriert werden [ARGE, 2015].

Um die in ein Kontaktbecken zugegebene Kohle wieder abzuscheiden, muss ein Sedimentationsbecken angebracht werden, welches auf eine Oberflächenbeschickung von 2 m/h ausgelegt werden soll [ARGE, 2015]. Dies sollte bei der Nutzung bestehender Becken beachtet werden. Weiterhin ist eine Filtration oder ein sonstiges Abtrennsystem zum Rückhalt feinerer Kohlepartikel vorzusehen.

#### 8.6.3.3 Filtration über granuliert Aktivkohle

Für die GAK-Filtration können durch eine ausreichende Feststoffentfernung vor dem Filter vermehrte, den Energieverbrauch erhöhende Rückspülungen vermieden werden. Hier ist

zu prüfen, ob eventuell eine Vorfiltration angebracht werden soll, da die mittlere Feststoffkonzentration im Zulauf zum Filter deutlich unter 15 mg/L liegen soll [ARGE, 2015].

Um den ganzheitlichen Energiebedarf möglichst niedrig zu halten, ist die Verwendung von reaktiverter/regenerierter Kohle zu prüfen. Eventuell kürzere Standzeiten gegenüber Frischkohle sollten der energetischen Bilanzierung gegenübergestellt werden.

Der Filter kann entweder in eine bestehende Filteranlage eingebaut werden oder als neuer Filter (konventioneller rückspülbarer Filter oder Druckkessel) geplant werden. Die EBCT sollte zwischen 5 und 30 Minuten betragen und die Filtergeschwindigkeit zwischen 5 und 15 m/h liegen. Sollen die GAK-Filter auch zum Rückhalt von Feststoffen eingesetzt werden, ist weiterhin die Mindestgeschwindigkeit für den Rückhalt von Feststoffen im Betrieb zu beachten. Um die EBCT zu verlängern, sollen, falls möglich, alle verfügbaren GAK-Filter parallel betrieben werden. Durch diesen Parallelbetrieb kann die Anzahl der erreichbaren Bettvolumina erhöht werden und die Laufzeit der GAK verlängert werden. [ARGE, 2015, BENSTÖM ET AL., 2014]

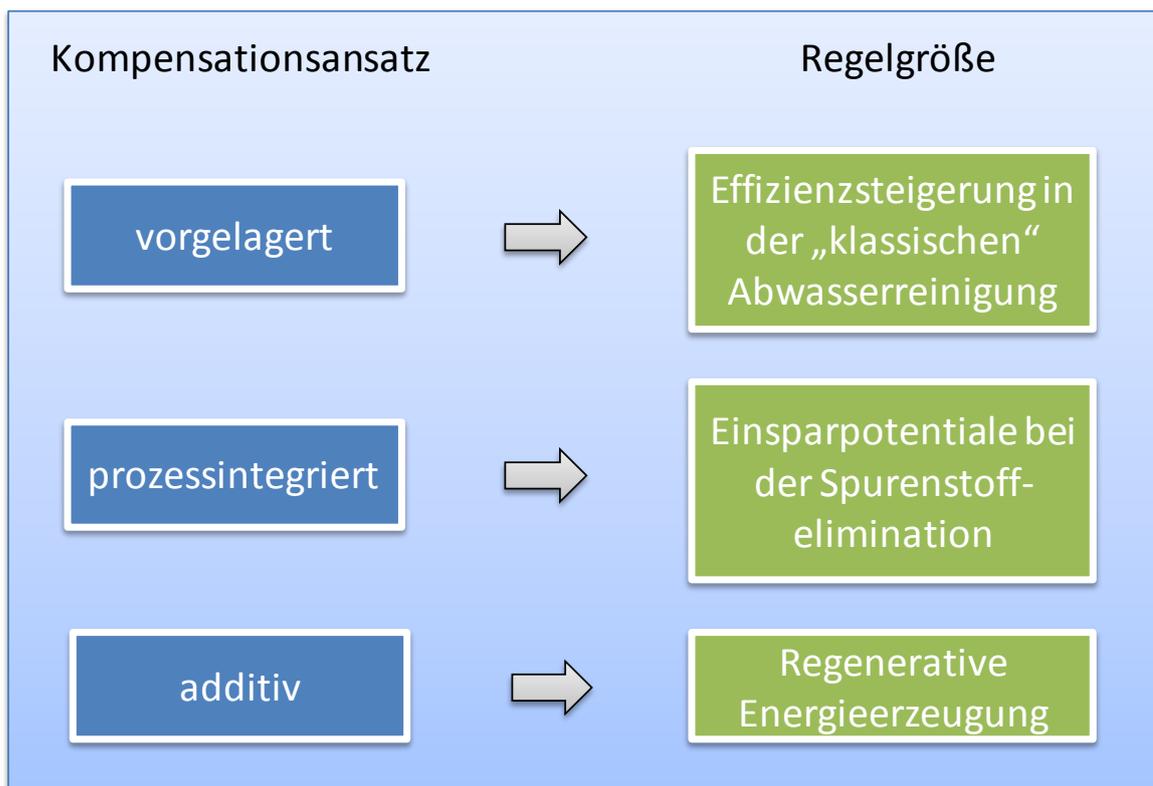
Das einzustellende Spülprogramm sollte in Anbetracht der gewählten Kohle (mechanische Stabilität), der Filterlaufzeit (Bettvolumina) sowie dem zulässigen Filterwiderstand festgelegt werden, um unnötige Rückspülungen zu vermeiden [ARGE, 2015].

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

## 9 Kompensationsmöglichkeiten

Grundsätzlich ist eine weitergehende Abwasserreinigung gegenüber dem aktuellen Status quo immer auch 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 damit verbundenen Treibhausgasemissionen verknüpft ist und somit das Klima belasten kann. Diese Belastung kann minimiert werden, wenn entsprechende Kompensationsmöglichkeiten ausgeschöpft werden und bestenfalls ein in der Jahresbilanz energieneutraler Kläranlagenbetrieb ermöglicht werden würde.

Bei den in Kapitel 7 diskutierten Modellanlagen liegt der ermittelte spezifische Energieverbrauch je nach Art der Spurenstoffelimination und Anschlussgröße zwischen 2,87 und 8,7 kWh<sub>e</sub>/(E·a). Entsprechende Kompensationsstrukturen sollten dafür geschaffen werden, um die Energie- bzw. Klimabilanz einer Kläranlage mit weitergehender Abwasserreinigung zu verbessern. Eine schematische Darstellung der Kompensationsmöglichkeiten ist in Bild 9-1 dargestellt.



**Bild 9-1:** Schematische Darstellung möglicher Kompensationsansätze und deren resultierende Regelgrößen

Allgemein wird im Folgenden zwischen drei Kompensationsansätzen unterschieden.

### Vorgelagerter Kompensationsansatz

Der vorgelagerte Kompensationsansatz beschreibt die Verrechnung von allgemeinen Energieeinsparmaßnahmen mit dem anfallenden Mehrbedarf. So liegt bekanntermaßen das größte Potential zur Energieoptimierung im verfahrenstechnischen Bereich. Eine Auswahl von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz listet Tabelle 9-1 auf.

**Tabelle 9-1: Vorgelagerte Kompensationsmaßnahmen (in Anlehnung an KOLISCH ET AL, 2013; KOLISCH ET AL. 2014)**

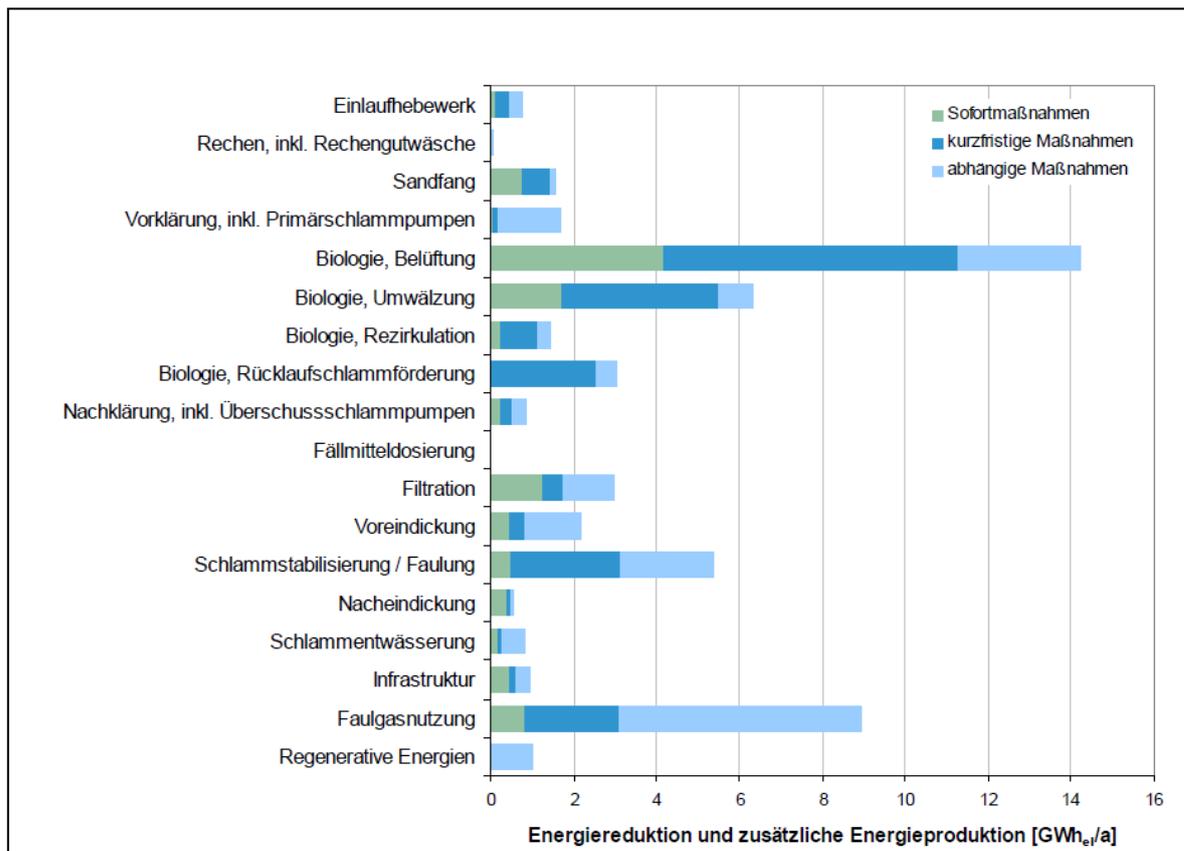
Anlagenbereiche	Maßnahmenart
Gebläse / Belebung	Nachrüstung der Gebläse mit Frequenzumformern, Implementierung einer Gleitdruckregelung (= Regelkonzept zur Minimierung der Druckverluste), Erneuerung energieineffizienter Gebläse, optimierte Staffelung der Gebläse zur Anpassung an den tatsächlichen Sauerstoffbedarf
Rührwerke	Austausch von Schnellläufern mit energieeffizienten Langsamläufern, Anpassung des Energieeintrags der Rührwerke an den tatsächlichen Bedarf durch intermittierenden Betrieb oder Einsatz kleinerer Aggregate
Steuerung und Betrieb der Belebung	Implementierung innovativer Steuerungen, Optimierung von TS-Gehalt und Zielsauerstoffkonzentration in der Belebung, Optimierung der Regelung durch Nachrüstung einer Nitrat- und Ammoniummessung, Optimierung der Rücklaufschlamm- und Rezirkulationsmengen
Sandfang	Austausch bzw. Optimierung der oftmals zu groß dimensionierten Sandfanggebläse
Pumpen	Austausch ineffizienter Pumpen und Antriebe (z. B. Umwälzpumpen Faulturm, Rezi-Pumpen, Rücklaufschlamm-pumpen, Hebewerke), Anpassung des Pumpenbestands an die notwendige Pumpleistung (z. B. zusätzliche Pumpen für den Trockenwetterfall), optimierter Betrieb von Hebewerken durch höheren Einstau

Die Maßnahmen zur Optimierung des Stromverbrauchs betreffen neben der Erneuerung oder Austausch der verfahrenstechnisch notwendigen Aggregate insbesondere betriebliche Optimierungen. Hierbei sind häufig vorgeschlagene Maßnahmen die belastungsabhängige Regelung von Rezirkulation, Rücklaufschlammförderung und Belüftung. Im Verfahrensbereich der Umwälzung werden z. B. getaktete Stoßbelüftungen vorgeschlagen. Die Regelung des Sauerstoffeintrags in die Belebungsbecken auf Basis der Ammonium- und Nitratkonzentration mit einer Gleitdruckregelung und frequenzgesteuerte Gebläse wurde beispielsweise an der KA Kohlfurth durch den Wupperverband

erfolgreich umgesetzt. Im Vergleich zu der vorher installierten Verfahrenstechnik und Steuerung kommt es zu einer Einsparung von 4,79 kWh<sub>e</sub>/(E·a) [DWA, 2010)].

Das Einsparungspotential sonstiger untersuchter Optimierungsmaßnahmen gibt das Bild 9-2 wieder. Es zeigt eine Auswertung der vom Land NRW geförderten Energieanalysen an kommunalen Kläranlagen. Die Maßnahmen werden nach drei Realisierungsphasen zeitlich unterteilt:

- Sofortmaßnahmen (S) sind sehr rentabel, erfordern geringe Investitionen und können aufgrund der technischen und betrieblichen Randbedingungen und den Anforderungen an die Reinigungsqualität sofort bzw. bis in zwei Jahren realisiert werden
- Kurzfristige Maßnahmen (K) sind insgesamt wirtschaftlich, sie sind aber mit entsprechenden Investitionen verknüpft und müssen deshalb zunächst in einer detaillierten Planung näher untersucht werden. Der Realisierungshorizont ist ungefähr 2 bis 5 Jahre.
- Abhängige Maßnahmen (A) sind an bestimmte Bedingungen wie zum Beispiel dem Ablauf der Nutzungsdauer eines zu ersetzenden Aggregates geknüpft und können deshalb nur mittel- oder langfristig realisiert werden. Der Realisierungshorizont beträgt ca. 1 bis 10 Jahre.



**Bild 9-2: Potential der energetischen Optimierungsmaßnahmen nach verfahrenstechnischen Teilbereichen und Realisierungsphasen (sofort, kurzfristig, abhängig) untergliedert aus 91 ausgewerteten Energieanalysen in NRW [KOLISCH ET AL., 2013]**

Es wird deutlich, dass insbesondere Anstrengungen in der biologischen Reinigungsstufe durch Optimierungen der Belüftung und Umwälzung hohe Einsparungen erzielt werden können. Das Ergebnis zeigt außerdem das Potential der Faulgasnutzung auf Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung. Die Maßnahmen hierbei bzw. die Verwertung des Klärgases wird allerdings den additiven Kompensationsansätzen zugeschrieben und wird später erläutert.

### **Prozessintegrierter Kompensationsansatz**

Analog zum vorgelagerten Kompensationsansatz ergeben sich auch Energieeinsparpotentiale bei der weitergehenden Abwasserreinigung. Dieses Einsparpotential wird hier als prozessintegrierter Kompensationsansatz bezeichnet. Mögliche Einsparpotentiale ergeben sich bereits bei der Planung der weitergehenden Behandlungsstufe und damit verbunden der korrekten Ermittlung der Behandlungswassermenge (siehe auch 8.6.1). Auch das Vermeiden unnötiger Förderhöhen kann zu einer Einsparung an Pumpenenergie beitragen. So ist bei der Planung die Möglichkeit der Beschickung im Freigefälle anzustreben. [ARGE, 2014]

Verfahrenstechnische Maßnahmen werden derzeit diskutiert und auf Einsparpotentiale getestet. Beispiele sind hier die energieeffiziente Herstellung von Aktivkohle/ Ozon/ Sauerstoff und die gesteuerte Ozondosierung und/oder Aktivkohledosierung. Empfehlungen zur Planung und zum Betrieb einzelner Verfahren können 8.6.3 entnommen werden.

Zukünftig könnte auch untersucht werden, inwiefern die Nutzung des sauerstoffreichen, austretenden Gasstromes der Ozonung in der Biologie auf Seiten des Energiebedarfs der Belebungsbecken positiv auswirken könnte. Alternative Rohstoffe (Sekundärrohstoffe) zur Aktivkohleherstellung könnten vermehrt untersucht werden. Eine Konkretisierung kann jedoch an dieser Stelle noch nicht erfolgen, da alle aktuellen Verfahren noch nicht seit langem im Betrieb etabliert sind und häufig noch F&E Charakter aufweisen. Mittelfristig werden jedoch auch bei diesen Verfahren aus der Betriebserfahrung Einsparpotentiale identifiziert werden.

### **Additiver Kompensationsansatz**

Bei der Abwasserreinigung führt das Abwasser zunächst drei theoretisch nutzbare Energieformen mit sich: hydraulische Energie, thermische Energie sowie chemisch gebundene Energie. Insbesondere die chemisch gebundene Energie (CSB) wird heute verstärkt zur Energiegewinnung (Faulgas) genutzt. Dabei kann auf Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung die Faulgasumwandlung in Elektrizität noch erhöht werden. Nach Auswertung der im Rahmen des IPA-Förderprogramms geförderten Energieanalyse ist die Faulgasumwandlung mit knapp 22 % unterhalb des Richtwerts von 29 % gemäß Energiehandbuch [MURL, 1999]. In einem ersten Schritt kann die Faulgasausbeute z. B. durch die Sanierung bzw. Anpassung der Schlammbehandlung, verbesserte Umwälzung, erhöhte Aufenthaltszeiten, verminderte Wassergehalte im Rohschlamm gesteigert werden. Weiterführende Ansätze und Schätzungen für einen zusätzlichen Gasertrag

liefert die Studie „Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen“ [KOLISCH ET AL., 2014].

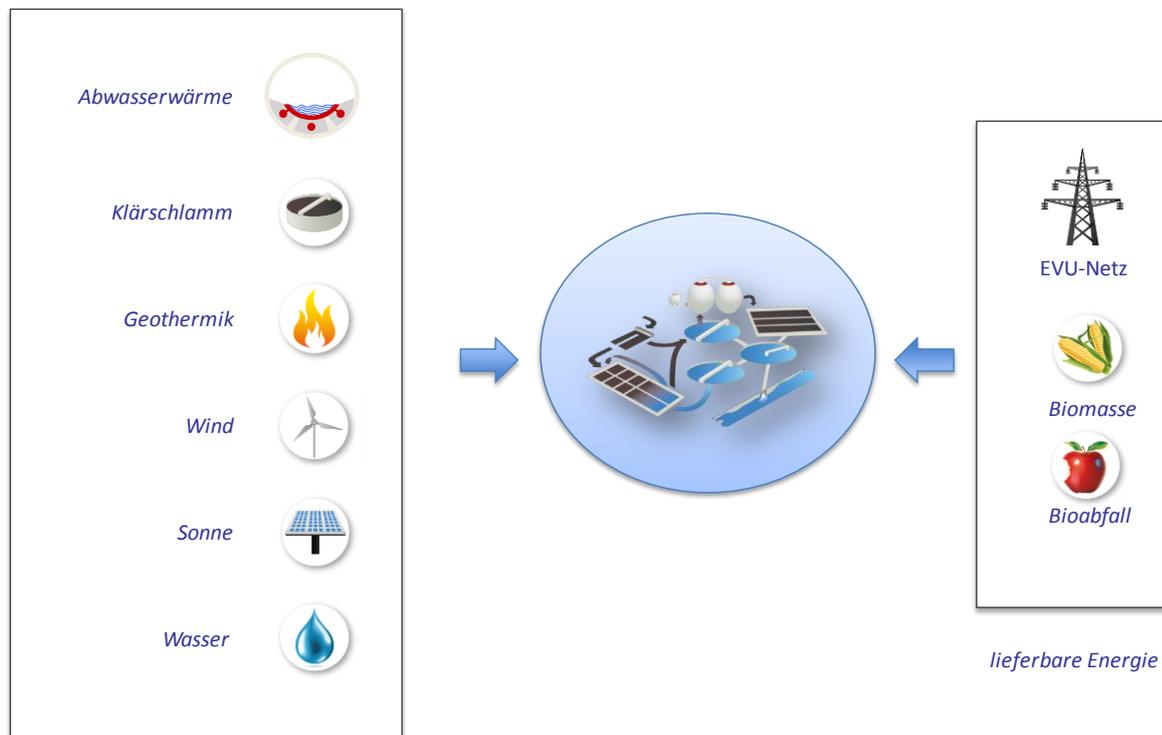
Der Austausch durch effizientere Aggregate zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bzw. die Nachrüstung auf Kläranlagen ohne vorhandene KWK-Nutzung verbessert in einem weiteren Schritt die Faulgasnutzung. Der Umwandlungsgrad in Elektrizität kann durch Umsetzung der Maßnahmen von 22 % auf 31 % angehoben werden [KOLISCH ET AL., 2013].

Eine Steigerung der verfügbaren organischen Masse in der Faulung durch den Einsatz von Co-Substraten steigert ebenfalls die Faulgasausbeute, was so zur Deckung des höheren Energiebedarfs beitragen kann. Die Stromerzeugung aus den entstehenden Gasen könnte so um mehr als 25 % gesteigert werden [DWA, 2010]. Durch die weitergehende Abwasserreinigung ist entsprechend auch eine effektivere Behandlung bzw. Elimination der zusätzlichen Frachten aus dem Schlammwasser der Co-Fermentate gegeben; dies ist auch aus genehmigungsrechtlicher Sicht positiv zu bewerten.

Zusätzliche regenerative Energiequellen können an Kläranlagen erschlossen werden. So lässt sich bei nutzbaren Wasserspiegelgefällen im Wasserweg oder entlang des Vorfluters hydraulische Energie durch Turbinen, Wasserkraftschnecken und Wasserrädern gewinnen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist der Einsatz von Photovoltaik (PV)-Technik aufgrund der degressiven Preisentwicklung für Solarmodule wesentlich interessanter als in der Vergangenheit. Seit 2006 sind die Photovoltaik-Preise für fertig installierte Photovoltaikanlagen um mehr als 60 % auf mittlerweile unter 1.700 € pro kW<sub>Peak</sub> gefallen [BSW-Solar, 2013]. Es bieten sich starr montierte PV-Anlagen auf Dachflächen und auf Freiflächen nachgeführter Anlagen an, die das Solarstrahlungsangebot im Tagesgang weitaus besser ausnutzen. Je nach topografischer Lage einer Kläranlage können auch Windkraftanlagen die regenerative Energieversorgung weiter ausbauen. Zur Berechnung der möglichen Erträge aus Windkraftanlagen bieten die Potentialstudie Erneuerbare Energien NRW – Teil 1: Windenergie [LANUV, 2012], der Klimaatlas NRW [LANUV, 2014a] sowie der Energieatlas NRW [LANUV, 2014b] des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen die nötigen Parameter für Standorte in NRW an.

Ein Kompensationsansatz muss nicht zwingend das Ziel der elektrischen Energieerzeugung oder einer Einsparung von Elektrizität haben. Auch die Reduktion der Energiekosten durch Substitution des externen Wärmebezugs (Heizöl, Erdgas) kann ein Ausgleich zu den Mehrkosten einer Spurenstoffelimination sein. So ist das im Abwasser enthaltene Wärmeenergiepotential aus der Wärmerückgewinnung (mittels Wärmetauschern und Wärmepumpen) so hoch, dass es theoretisch den Gesamt-Wärmeenergiebedarf einer Kläranlage abdecken könnte [DWA, 2010]. Für alle Kläranlagen in NRW ergibt sich ein realisierbares Heizpotential im Ablauf der Kläranlagen von 2,59 bis 3,39 GW [FiW, 2013]. Entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb sind das nutzbare Temperaturniveau und die möglichst hohe Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Abwasserwärmeanlage.

In Bild 9-3 sind aktuelle Energieformen und -träger, welche sich für den Einsatz auf Kläranlagen eignen, dargestellt.



**Bild 9-3: Schematische Darstellung möglicher Energiequellen auf Kläranlage**

Eine wesentliche Maßgabe bei der Nutzung von auf Kläranlagen erzeugten Energieformen und auch bei der Nutzung erneuerbarer Energien, sind der sinnvolle Verbrauch dieser Energieformen oder aber die Möglichkeit einer Energiespeicherung. Mit der Betrachtung der Optionen zur Energiespeicherung gehen auch Aspekte der Energieverteilung bzw. des Energietransportes einher. Grundsätzlich können flüssige und gasförmige Brennstoffe, ebenso wie Strom über Netze und Leitungen verteilt und transportiert werden.

### Schlussbemerkung

In der deutschen Wasserwirtschaft ist der Wille für eine Optimierung des Energieverbrauchs bzw. der Energieerzeugung auf Kläranlagen traditionell verankert. Bereits seit 1999 unterstützt das Land NRW über verschiedene Förderprogramme die Durchführung von Energieanalysen, die einerseits den energetischen IST-Zustand der Kläranlage aufzeigen und andererseits den Betreibern Handlungsempfehlungen für die Optimierung geben. Anreize für die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen liefert derzeit die Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW (ResA)“. Eine Auflistung von umgesetzten Optimierungsmaßnahmen (bundesweit) 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 Spuren-

stoffelimination prozessintegrierte Kompensationsmaßnahmen hervorrufen und die Energie- bzw. Klimabilanz verbessern.

Das prozentuale Einsparpotential nach Umsetzung von vorgeschlagenen vorgelagerten und additiven Optimierungsmaßnahmen ist insbesondere bei kleinen Kläranlagen unter 20.000 E sehr hoch. Über 30 % des Elektrizitätsbedarfs kann hier gegenüber der IST-Situation eingespart werden. Das durchschnittliche Einsparpotential bei Kläranlagen mit einer Anschlussgröße über 100.000 E liegt bei 16 % [KOLISCH ET AL., 2013]. Für die Kläranlagen, an welchen im Rahmen des Investitionsprogramms Abwasser NRW (IPA) Energieanalysen gefördert wurden, lässt sich nach Umsetzung aller Maßnahmen eine einwohnerbezogene Einsparung des spezifischen Gesamtstromverbrauchs ( $e_{ges}$ ) von durchschnittlich  $12,7 \text{ kWh}_{el}/(\text{E}\cdot\text{a})$  erreichen [KOLISCH ET AL., 2013]. Hierin enthalten sind u. a. Maßnahmen zur Steigerung der Energieausbeute durch Faulgasnutzung und Co-Fermentation. Der ermittelte spezifische Energieverbrauch der im Vorfeld diskutierten Modellanlagen zwischen  $2,87$  und  $8,7 \text{ kWh}_{el}/(\text{E}\cdot\text{a})$  kann also in der Gesamtbetrachtung gut kompensiert werden, wenn die Betreiber die vorhandenen und vorgeschlagenen Einsparpotentiale ausschöpfen.

Ein Beispiel hierfür ist die Kläranlage Bad Oeynhausen, die durch eine Reihe verfahrenstechnischer Energieeffizienzmaßnahmen den Energiebedarf deutlich senken konnte und mittels Kraft-Wärme-Kopplung einen Eigenenergieversorgungsgrad von über 100 % erreicht. Nach eigener Angabe verbraucht die Kläranlage  $1.500 \text{ MWh}_{el}/\text{a}$ , dies entspricht einem spezifischen Bedarf von  $24 \text{ kWh}_{el}/(\text{E}\cdot\text{a})$  bei einer Auslastung von rund 63.000 E. Der Verbrauch steht einer Energieeigenerzeugung von  $1.695 \text{ MWh}_{el}/\text{a}$  respektive  $27 \text{ kWh}_{el}/(\text{E}\cdot\text{a})$  gegenüber [ENERGIEAGENTUR NRW, 2014]. In Zukunft wird an der Kläranlage Bad Oeynhausen eine GAK-Anlage betrieben, deren zusätzlicher Energiebedarf auf etwa  $2,7$  bis  $3,4 \text{ kWh}_{el}/(\text{E}\cdot\text{a})$  prognostiziert wurde [HYDRO-INGENIEURE, 2012]. Dieser Bedarf kann durch die Energieerzeugung gedeckt werden.

## 10 Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden zweiten Projektphase wurden zehn großtechnische Versuchsanlagen mit den Verfahren der Ozonung, der Adsorption an Pulveraktivkohle und der Filtration über granulierten Aktivkohle hinsichtlich ihres Energiebedarfs ausgewertet. Zudem wurden zwei Modellanlagen für die Anschlussgrößen 20.000 E und 100.000 E aufgestellt und für die Verfahren der nachgeschalteten Ozonung und der Adsorption an PAK 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 aus Kapitel 4 zeigt die Machbarkeit der großtechnischen Umsetzung der betrachteten Verfahren. Je nach Auslegung der Kläranlage können bestehende Bauwerke (Filter, Becken außer Betrieb) für die zusätzliche Reinigungsstufe genutzt werden. Zu überwindende Förderhöhen können zu einem nicht irrelevanten Anteil an zusätzlichem Energieverbrauch beitragen.

Die Nutzung eines vorhandenen Sandfilters ist aus energetischer Sicht von Vorteil und kann prinzipiell für die Ozonung, die Zugabe von PAK und die Filtration über GAK betrachtet werden. In diesem Fall kann der Energiebedarf des Filters der bestehenden Kläranlage zugeordnet werden.

Hinsichtlich des Energiebedarfs außerhalb der Kläranlage liegen nur wenige neue Erkenntnisse vor. Die Untersuchung der großtechnischen Anlagen ermöglicht jedoch eine Validierung und Eingrenzung der Dosiermengen aus Phase I. Durch die Umrechnung auf Primärenergie für elektrische Energie wird ein Vergleich zwischen elektrischer und thermischer Energie ermöglicht.

Der Hauptanteil des ganzheitlichen Energiebedarfs bei der Ozonung wird durch die Herstellung des Ozons vor Ort und der Herstellung des angelieferten Sauerstoffs (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 O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> in Abhängigkeit der organischen Hintergrundbelastung des Abwassers festgehalten werden. Der Energiebedarf etwaiger biologischer Nachbehandlungen wurde bei den großtechnischen Anlagen nicht betrachtet.

Die Zugabe von PAK oder die Filtration über Aktivkohle ist mit einem geringeren Energiebedarf (Strombedarf) vor Ort als die Ozonung verbunden. Auch wenn neue Daten zum Energieaufwand der Herstellung/Reaktivierung der Aktivkohle vorliegen, ist dieser Anteil immer noch mit großen Unsicherheiten verbunden. Es kann jedoch festgehalten werden, dass die Herstellung/Reaktivierung mit einem deutlich höheren Energieaufwand (thermische Energie) einhergeht als der Betrieb der Adsorptionsstufe (elektrische Energie) auf der Kläranlage. Bei der Filtration über GAK ist die Verwendung von Regenerat/Reaktivat mit einem deutlich niedrigerem Energieaufwand (thermische Energie) als beim Einsatz von Frischkohle verbunden und aus energetischer Sicht zu bevorzugen. Für die nachgeschaltete Zugabe von PAK können Dosiermengen zwischen 10 und 20 g PAK/m<sup>3</sup> 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/m<sup>3</sup> können als Orientierungswerte festgehalten werden.

Der ganzheitliche Energiebedarf der Ozonung ist auch bei Betrachtung der Primärenergie niedriger als der der adsorptiven Verfahren. Durch die Anwendung von Regenerat/Reaktivat kann jedoch ein deutliches Maß an Energie bei der GAK-Filtration eingespart werden. Dies spiegelt sich auch in den CO<sub>2</sub>-Emissionen wider. Die weitergehenden Verfahren gehen mit einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß einher, der, aufgrund der ganzheitlichen Betrachtung, deutlich über dem der herkömmlichen Kläranlagen liegt. Zur genaueren Quantifizierung sind jedoch weitere ökologische Bewertungen der Herstellung und Regeneration/Reaktivierung von Aktivkohle nötig.

Möglichkeiten zur Energie- und Emissionseinsparung können durch energieeffiziente Prozesse und die Verwendung regenerativer Energieformen und Rohstoffe realisiert werden. Für die Umsetzung solcher Maßnahmen ist jedoch noch weiterer Forschungsbedarf gegeben.

Die zwei für das Verfahren der Ozonung und der Adsorption an PAK durchgerechneten Modellanlagen bestätigen, dass die weiterführenden Verfahren den Energieverbrauch auf der KA erhöhen, insbesondere die Ozonung. Bei großen Kläranlagen, ist der Einfluss der weitergehenden Reinigungsstufe etwas geringer, da diese in der Regel schon über einen Sandfilter (zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung bzw. zum Rückhalt der feinen Kohlepartikel bei der Zugabe von PAK) verfügen und dieser Anteil am Energiebedarf nicht der weitergehende Reinigungsstufe zuzuordnen ist. Der Gesamtverbrauch ist bei größeren Kläranlagen vor allem aufgrund von effizienteren Belüftern in der Regel auch geringer als bei kleinen Kläranlagen. Die Berechnungstabellen der Modellanlagen können dem Anlagenbetreiber, unter der Voraussetzung der Betrachtung der anlagenspezifischen Randbedingungen, als Werkzeug für die grobe Abschätzung des theoretisch zu erwartenden Mehrbedarfs an Energie dienen.

## Literaturverzeichnis

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.

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.

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 (2011). Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen. Schlussbericht Phase I 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>).

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>).

ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW (2015). Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. Stand: 20. März 2015. <http://www.masterplan-wasser.nrw.de/index.php?/downloads/anleitung-zur-planung-und-dimensionierung-von-anlagen-zur-mikroschadstoffelimination.html>. Abgerufen am 23. Juni 2015.

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.

BAJOHR, C.; GÖTZ, M.; GRAF, F.; ORTLOFF, F. (2010). Speicherung von regenerativ erzeugten elektrischer Energie in der Erdgasinfrastruktur. veröffentlicht in GWF-Gas, April 2011.

BARJENBRUCH, M. (o.J.). Erfahrungen zum Betrieb von Abwasserfiltrationen. Abgerufen am 15. März 2011 von [http://www.dwa-bw.de/nachbar/klaeranlagen/dl/prtr/Erfahrungen\\_abwasserfiltrationen.pdf](http://www.dwa-bw.de/nachbar/klaeranlagen/dl/prtr/Erfahrungen_abwasserfiltrationen.pdf)

BAUMANN, H., TILLMAN, A.-M. (2004). The Hitch Hiker's Guide to LCA. Stockholm: Studentliteratur AB.

BAYER, P., HEUER, E., KARL, U., FINKEL, M. (2005). Economical and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies. *Water Research*, 39, S. 1719-1728.

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.

BENSTÖM, F., NAHRSTEDT, A., ROLFS, T. (2013). Filtration über Granulierte Aktivkohle (GAK) zur Spurenstoffelimination. Vortrag beim DWA-Seminar Spurenstoffelimination auf Kläranlagen am 14.11.2013 in Siegburg.

BENSTÖM, F.; STEPKES, H.; ROLFS, T.; MONTAG, D.; PINNEKAMP, J. (2014). Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV).

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

BIEBERSDORF, N., KAUB, J. M., SCHWENTNER, G. (2011). Möglichkeiten zur Integration einer Aktivkohleadsorption in bestehende kommunale Kläranlagen. Seminar der DWA zur weitergehenden Abwasserreinigung, 2011, Bonn.

BIEBERSDORF, N., SCHRÖDER, M., PALMOWSKI, L., VELTMANN, K., KASTE, A. (2012). Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Mikroschadstoffen. 2. Fachsymposium Mikroschadstoffe NRW am 21.6.2012 in Düsseldorf.

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.

BÖHNKE, B. (1989). Bemessung der Stickstoffelimination in der Abwasserreinigung-Ergebnisse eines Erfahrungsaustausches der Hochschulen. *Korrespondenz Abwasser*, 36 (9) S. 1046-1061.

BORNEMANN, C. (2013). Persönliche Mitteilung.

BORNEMANN, C.; HACHENBERG, M.; YÜCE, C.; HERR, J.; JAGEMANN, P.; LYKO, S.; BENSTÖM, F.; MONTAG, D. PINNEKAMP, J.; PLATZ, S.; WETT, M.; BIEBERSDORF, N.; KAUB, J. M.; KOOLISCH, G.; OSTHOFF, T.; TAUDIEN, Y.; ROLFS, T.; STEPKES, H. (2012). Teilprojekt 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/abwasser.htm>.

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 (2012). Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen 2011 – Stromverbrauch: 4.300 Kläranlagen unter der Lupe. DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e-V., Hennef.

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 Regensdorf, Dübendorf.

EIGA – European Industrial Gases Association. (December 2010). EIGA Position Paper. Indirect CO<sub>2</sub>-emissions compensation: Benchmark proposal for Air Separation Plants.

ENERGIEAGENTUR.NRW (2014). „KWK macht Kläranlage in Bad Oeynhausen zur Energie-Plus-Kläranlage“, Februar 2014 [http://www.energieagentur.nrw.de/kwk-macht-klaeeranlage-in-bad-oeynhausen-zur-energie-plus-klaeeranlage-23845.asp](http://www.energieagentur.nrw.de/kwk-macht-klaeranlage-in-bad-oeynhausen-zur-energie-plus-klaeeranlage-23845.asp).

ESSER-SCHMITTMANN W., SCHMITZ S. (2008). Abwasserreinigung mit regenerierten Aktivkohlen – Ein ökonomisch interessanter Beitrag zum ganzheitlichen Umweltschutz. Vortrag 10.10.2008, VDIWissensforum, München.

ESSER-SCHMITTMANN, W., & SCHMITZ, S. (10. Oktober 2008). Abgasreinigung mit regenerierter Aktivkohle - Ein ökonomisch interessanter Beitrag zum ganzheitlichen Umweltschutz. Tagungsunterlagen zum Vortrag am 10.10.2008 VDI-Wissensforum . München.

EUPD RESEARCH; BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT E.V. (BSW-Solar) (2013). Bonn 2013 Photovoltaik-Preismonitor Deutschland.

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.

FORSCHUNGSINSTITUT FÜR WASSER- UND ABFALLWIRTSCHAFT AN DER RWTH AACHEN (FiW) e.V. (2013). Potentiale und technische Optimierung der Abwasserwärmenutzung, S.62, Aachen 2013.

GOMBERT, W., SCHNEIDER, K. (2010). Pilotprojekt energieautarke Großkläranlage – für eine saubere Zukunft, Stadtentwässerung Koblenz, Online: <http://www.sustreat.eu>.

GÖTZELMANN UND PARTNER (2011). Spurenstoffentnahme durch den Einsatz von Pulveraktivkohle (PAK). Projektsteckbrief.

GUJER, W. (2007). Siedlungswasserwirtschaft. Heidelberg: Springer-Verlag.

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.

HERBST, H.; TÜRK, J.; BECKER, H. P.; GLATHE, W. (2013). Spurenstoffelimination mit Ozon: Kosten & Potentiale. In: Strategien, Analysen, Kennwerte und Qualitätsaspekte. Tagungsband der 27. Karlsruher Flockungstage 2013. Hrsg. E. Hoffmann; M. Leicht. Schriftenreihe SWW (Bd. 146) Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe. S. 39-57.

HILLER, G. (2010). Vorstellung aktueller Projekte zum Ausbau von kommunalen Klärwerken mit einer Adsorptionsstufe, Klärwerk Steinhäule Ulm. Vortrag anlässlich des DWA Symposiums Aktivkohle am 23./24. Juni 2010 in Mannheim . Mannheim.

HUBER, M. M., GÖBEL, A., JOSS, A., HERMANN, N., LÖFFLER, D., MCARDELL, ET AL. (2005). Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater treatment effluent: a pilot study. (39), S. 4290-4299.

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.

IMHOFF (1999). Taschenbuch der Stadtentwässerung; 29. Auflage.

ISO 14040 (2006). DIN EN ISO: 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Norm.

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.

KAUB, J. (2013). Persönliche Mitteilung.

KNÖFEL, H. (2008). Individuelle Emissionskennwerte der Universität Göttingen. Abgerufen am 23.5.2011 von [www.uni-goettingen.de/de/79037.html](http://www.uni-goettingen.de/de/79037.html).

KOLISCH, G.; TAUDIEN, Y.; OSTHOFF, T. (2013). Auswertung der vom Land NRW geförderten Energieanalysen kommunaler Kläranlagen, Zusatzbericht zum Forschungsvorhaben Energie und Klimaschutz. Gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)  
<http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/abwasser.htm>.

KOLISCH, G.; TAUDIEN, Y.; OSTHOFF, T.; (2014). TP2 - Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen, S.96f, Forschungsvorhaben Energie und Klimaschutz. 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>.

KUHLMANN, S. (2013). Persönliche Mitteilung.

LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ. (2014a,November) [Online]. <http://www.klimaatlas.nrw.de/site/nav2/Wind.aspx?P=2&M=2> .

LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ. (2014b,November) [Online]. <http://www.energieatlasnrw.de/site/nav2/planung/KartePlanungInfo.aspx>.

LANUV (2012): Potentialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 1: Windenergie. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), 2012.

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.

- 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>.
- MAUS, C. (2013). Persönliche Mitteilung.
- MAUS, C., HERBST, H., ANTE, S., BECKER, H.-P., GLATHE, W., BÖRGERS, A., TÜRK, J. (2014). Hinweise zur Auslegung und Design von Ozonanlagen zur Mikroschadstoffelimination. Korrespondenz Abwasser, Abfall , 61 (11), S. 998-1006.
- MEIER, M. A. (1997). Eco-Efficiency Evaluation of Waste Gas Purification Systems in the Chemical Industry. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zürich.
- MELSA, A.; SCHRÖDER, M. (2008). Die Energiereserven der Wasserwirtschaft. In: wwt 10/2008.
- MERTEN, M. (2011). Konzeptstudie - Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle im Ablauf des Klärwerks Gütersloh-Putzhagen.
- METZGER, S. (2010). Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. München: Oldenbourg Industrie Verlag.
- METZGER, S., & KAPP, H. (2008). Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen. Vortrag anlässlich der VSA-Fachtagung vom 28. Oktober 2008. Regensdorf/Zürich.
- METZGER, S.; RÖBLER, A.; KAPP, H. (2012). Erweiterung des Klärwerks Mannheim um eine Adsorptionsstufe zur Verbesserung der Abwasserreinigung. Spurenstoffbericht. Hochschule Biberach.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (2013). Land fördert Erweiterung der Kläranlage Mannheim mit Gesamtkosten von sieben Millionen Euro. Pressemitteilung. <http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/111423/> Abgerufen am 11. Dezember 2013.
- MONDL (2013). Persönliche Mitteilung.
- MÜLLER, A. (2014). Persönliche Mitteilung.
- MUÑOZ, I. (2006). Life Cycle Assessment as a Tool for Green Chemistry: Application to Different Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Dissertation, Universitat Autònoma de Barcelona, Unitat de Química Física del Departament de Química, Barcelona.
- MURL (1999). Energie in Kläranlagen – Handbuch, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen.
- NAHRSTEDT, A. (2014): Persönliche Mitteilung.
- NAHRSTEDT, A., GIMBEL, R., ALT, K., BARNSCHEIDT, I., FRITZSCHE, J., SÜRDER, T., BURBAUM, H., KLAK, A. (2011). CSB- und Spurenstoffadsorption am Aktivkohlefestbett. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- NAHRSTEDT, A., GIMBEL, R., ALT, K., MAUER, C., SCHLÖSSER, F., MERTEN, M., FRITZSCHE J., MÜLLER, M., GIKOW, R., SÜRDER, T., SCHRÖDER, K., LICHTENBERG U., SCHWEINFORTH, R.,

WÜRTH, O. (2013A). Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen. Zwischenbericht. Dezember 2013. Bisher unveröffentlicht.

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

NIJDAM, D., BLOM, J., & BOERE, J. A. (1998). Environmental Life Cycle Assessment (LCA) of two advanced wastewater treatment techniques. Adsorption and its applications in industry and environmental protection, 120, S. 763-775.

OBERE LUTTER (2013). <http://www.mikroverunreinigungen.de/obere-lutter/> abgerufen am 18.12.2013).

OZONIA (2011). Angaben aus der Herstellerumfrage.

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\\_ENVELOLOS.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht_ENVELOLOS.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.

ROLFS, T., BENSTÖM, F., STEPKES, H., MONTAG, D., PINNEKAMP, J. (2013). Einsatz granulierter Aktivkohle in einer Flockungsfilterzelle der Kläranlage Düren. Vortrag beim 13. IWW Kolloquium am 29. Mai 2013 in Haltern.

RÖLLE, R. UND KUCH B. (2011). Die Aktivkohlestufe auf der Kläranlage Kressbronn – Gezielte Entnahme von Pharmaka, Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmitteln. Korrespondenz Abwasser, Abfall 58 (11), S. 1038-1049.

RÖLLE, R., & KUCH, B. (2011). Die Aktivkohlebehandlungsstufe auf der Kläranlage Kressbronn. Korrespondenz Abwasser, Abfall 58 (11) S. 1038-1049.

SCHRÖDER, K. (2013). persönliche Mitteilung.

STADTENTWÄSSERUNG MANNHEIM (2013): Präsentation der Stadtentwässerung Mannheim. [https://www.mannheim.de/sites/default/files/institution/1035/ebs-prasentation\\_2013.pdf](https://www.mannheim.de/sites/default/files/institution/1035/ebs-prasentation_2013.pdf). Abgerufen am 11. Dezember 2013.

STEIDEL, J. (26. Oktober 2006). Vergleich verschiedener Entwässerungsverfahren kleinerer und mittlerer Anlagen unter energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Vortragsunterlagen Fachtagung Klärschlamm - Energie und Rohstoff . Emmelshausen.

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.

THARAPONG VITIDSANT, TERACHAI SURAVATTANASAKUL & SOMSAK DAMRONGLERD (1999). Production of Activated Carbon from Palm-oil Shell by Pyrolysis and Steam Activation in a Fixed Bed Reactor; Bangkok, Thailand May 1999.

THÖLE, D. (2012). persönliche Mitteilung.

THÖLE, D. (2013). persönliche Mitteilung.

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 (2011). ProBas (Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente). Abgerufen am 31. März 2011 von <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php?>.

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

WUPPERVERBAND O.J.(2014).

[http://www.wupperverband.de/internet/web.nsf/id/pa\\_de\\_klaerwerk\\_buchenhofen.html](http://www.wupperverband.de/internet/web.nsf/id/pa_de_klaerwerk_buchenhofen.html)

Abgerufen am 3. Februar 2014.

ZWICKENPFLUG, B., BÖHLER, M., STERKELE, B., JOSS, A., TRABER, J., GUJER, W., ET AL. (2010). Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Abschlussbericht, EAWAG, Dübendorf.

## Anhang

### 1. Auswertung DWA Kläranlagennachbarschaften NRW

Die Zuordnung der und Auswertung der im Handbuch der Kläranlagennachbarschaften NRW verzeichneten 624 Kläranlagen geschieht nach den im selben Handbuch verwendeten Begriffen und Abkürzungen. Diese wurden in tabellarischer Form aufgetragen, so dass die jeweilige Auswahl eine Zuordnung der Größenordnung zur jeweiligen Verfahrensstufe zulässt. Auch weitergehende Festlegungen konnten anhand dieser Auswertung ausgeführt werden.

Die jeweiligen Auswahlen für die Erstellung der Modellanlage basieren somit auf den repräsentativen Daten der Auswertung der DWA aus 2012.

**Tabelle A 1: Begriffe und Abkürzungen, Teil 1**

Begriffe und Abkürzungen			
Einstufige Anlagen		Kombinierte / Zweistufige Anlagen	
A	Abwasserteich unbelüftet	B + TK	Belebung mit Tropfkörper
AB	Abwasserteich belüftet	A + RK	Teiche mit biologischer Zwischenstufe
B	Belebung	B + FI + DE	Belebung mit Biofilter und Desinfektion getrennte Bauteile
BS	Belebung mit gemeinsamer Schlammstabilisierung	BFID	Belebung, Filter und Desinfektion in einem Bauwerk
GF	getauchtes Festbett	Nährstoffelimination	
M	Nur mechanische Reinigung	DI	Denitrifikation intermittierend
PF	Pflanzenbeetanlagen	DV	Denitrifikation vorgeschaltet
RK	Rotationstauchkörper	DVI	Denitrifikation vorgeschaltet und intermittierend/simultan
SBR	Belebungsanlagen im Chargenbetrieb	N	Nitrifikation
SV	Sonstige Verfahren	PB	Phosphorelimination biol.
TK	Tropfkörper	PBC	Phosphorelimination biol. und chemisch
		PC	Phosphorelimination chemisch

Tabelle A 2: Begriffe und Abkürzungen, Teil 2

Weitergehende Reinigung		Getrennte Schlammstabilisierungsverfahren	
E	Entfärbung	AS	Getrennte aerobe Stabilisierung
EK	Entkeimung	AT	Aerob-thermophile Stabilisierung
FI	Filtration	BR	Bioreaktor o.ä.
ME	Mikroschadstoffentfernung (z.B. A.-Kohle)	FB	Faulraum, beheizt
MS	Mikrosiebung	FU	Faulraum, unbeheizt
SC	Schönungsteich	KO	Kompostierung, Kompostwerk
PE	Phosphorelimination	SV	Sonstige Verfahren
SF	Sandfiltration	Faulgasverwertung	
		BZ	Brennstoffzelle
Schlammmentwässerungsverfahren		GDM	Gas-Diesel-Motor
BF	Bandfilterpresse	GOM	Gas-Otto-Motor
Kf	Kammerfilterpresse	GT	Gasturbine
KSV	Klärschlamm-Vererdung	SA	Sonstige Aggregate
ME	Mobile Entwässerung	WE	Ausschl. zur Wärmeerzeugung
S	Schlammstapelo, -stapelraum, -eindicker	Entsorgung	
SE	Sonstige Entwässerung	DP	Deponie
STR	Solare Trocknung	L	Landbauliche Verwertung
TB	Trockenbeete	LBV	Landwirtschaftliche Verwertung
TR	Trocknung	V	Verbrennung (auf der KA)
ZF	Zentrifuge (Dekanter)	Ve	Verbrennung (außerhalb der KA)



















Tabelle A 12: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 6

467	23-25	KA Marienheide	20.870			X												X			X		X			
469	24-2	KA Engelskirchen	10.000		x														x		x		x			
470	24-3	KA Kürten Dürscheid	13.600			x													x		x		x			
471	24-4	KA Kürten Sülze	10.000			x													x		x		x			
472	24-5	KA Lindlar	12.600		x																x		x			
475	24-8	KA Lohmar Donrath	23.500		x																x		x			
479	24-12	KA Köln Overath	19.100		x																x		x			
481	24-14	KA Rösrath Lehmbach	23.000		x																x		x			
482	24-15	KA Seelscheid	11.000			x															x		x			
490	24-23	KA Odenthal	17.500																			x		x		
491	24-24	KA Wermelskirchen	18.000			x																x		x		
494	25-2	KA Bergheim Auenheim	23.000		x																	x		x		
497	25-5	KA Elsdorf	20.400		x																	x		x		
502	25-10	KA Nörvenich	15.500			x																x		x		
507	26-1	KA Heinsberg Dremmen	11.000			x																x		x		
510	26-4	KA Waldfeucht	17.500			x																x		x		
511	26-5	KA Wassenberg	25.000																			x		x		
514	26-8	KA Niederküchten	25.000		x																	x		x		
517	26-11	KA Brüggen	16.500		x																	x		x		
520	26-14	KA Wegberg Dahlheim	20.000			x																x		x		
521	27-1	KA Alsdorf Broichtal	30.000																				x		x	
525	27-5	KA Linnich	30.000		x																		x		x	
534	28-5	KA Aldenhoven	18.000																				x		x	
539	28-10	KA Langerwehe	11.620		x																		x		x	
540	28-11	KA Niederzier Hambach	12.000		x																		x		x	
541	28-12	KA Niederzier Krauthausen	10.000			x																	x		x	
543	29-1	KA Bessenich	27.000																				x		x	
546	29-4	KA Enzen	20.000			x																	x		x	
548	29-6	KA Heimerzheim	10.700																				x		x	
550	29-8	KA Miel	11.000																				x		x	
553	29-11	KA Weilerswist	25.000		x																		x		x	
556	29-14	KA Heimbach	11.000			x																	x		x	
564	29-22	KA Simmerath	15.000			x																	x		x	
573	30-7	KA Bad Münstereifel Kirspenich	27.000			x																	x		x	

Tabelle A 13: Verfahrensstufen 10.000 bis 30.000 E, Teil 7

575	30-9	KA Mechernich	24.000			x												x			x			
591	30-25	KA Gemünd	23.000																		x		x	
592	30-26	KA Kall	11.500			x												x			x		x	
594	30-28	KA Nettersheim Urft	14.650			x																x		
596	31-1	KA Bad Honef	27.000																					x
597	31-2	KA Bad Honef Aegidienberg	10.000			x																		x
598	31-3	KA Bornheim	24.000			x																	x	
600	31-5	KA Bornheim Sechtem	29.700			x																	x	
601	31-6	KA Rheinbach	27.000			x																	x	
610	31-15	KA Neunkirchen II	13.000			x																	x	
611	31-16	KA Ruppichteroth Büche	25.000			x																	x	















---

Die nachfolgenden Tabellen zur Bemessung der Modellanlagen und zur Berechnung des Energieverbrauchs sind in Auszügen bereits im Bericht enthalten. Um eine lückenlose Darstellung der Berechnungen innerhalb des Anhangs zu gewährleisten sind bereits enthaltene Tabellen teilweise erneut dargestellt.

## 2. Bemessung Modellanlage für Ausbaugröße 130.000 E

Tabelle A 21: Grundlagen Modellanlage, 130.000 E

<b><u>Einwohnerwerte</u></b>		<b>Bemessung</b>
Einwohnerwerte	E	130.000 [E]
<b><u>Wassermengen</u></b>		
Schmutzwasseranfall	$q_s$	140 [l/(E·d)]
Fremdwasseranfall	$q_f$	35 [l/(E·d)]
Niederschlagswasser	$q_r$	70 [l/(E·d)]
Jahreswassermenge Trockenwetter	$Q_T$	8.303.750 [m³/a]
Jahreswassermenge Mischwasser	$Q_M$	11.625.250 [m³/a]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	18.200 [m³/d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	4.550 [m³/d]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,aM}$	9.100 [m³/d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	210,65 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	52,66 [l/s]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,aM}$	105,32 [l/s]
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,aM}$	263,31 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,aM}$	368,63 [l/s]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	22.750 [m³/d]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	31.850 [m³/d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	413,77 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	31.850 [m³/d]
maximaler Mischwasserabfluss	$Q_{M,max}$	774,88 [l/s]
<b><u>Schmutzfrachten im Zulauf zur Kläranlage</u></b>		
einwohnerspezifische BSB <sub>5</sub> -Fracht	$B_{BSB,spez}$	60 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische CSB-Fracht	$B_{CSB,spez}$	120 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische TS-Fracht	$B_{TS,spez}$	70 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische TKN-Fracht	$B_{TKN,spez}$	11 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische P-Fracht	$B_{P,spez}$	1,8 [g/(E·d)]
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,BSB,Z}$	7.800 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,CSB,Z}$	15.600 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,TS,Z}$	9.100 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,TKN,Z}$	1.430 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,P,Z}$	234 [kg/d]

Tabelle A 22: Bemessung Vorklärung, 130.000 E

<b>Einwohnerwerte</b>		<b>Bemessung</b>
Einwohnerwerte	E	130.000 [E]
<b>Wassermengen</b>		
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	22.750,00 [m³/d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	1489,58 [m³/h]
Mischwasserabfluss Jahresmittel	$Q_M$	31.850,0 [m³/d]
maximaler Mischwasserabfluss nach Ausgleichsbecken	$Q_M$	2790 [m³/h]
<b>Volumen und Aufenthaltszeit</b>		
Aufenthaltszeit im Vorklärbecken	$t_R$	0,80 [h]
Oberflächenbeschickung	$q_A$	3,5 [m/h]
<b>Bemessungsergebnisse</b>		
erforderliches Volumen	$V_{VKB,erf}$	1192 [m³]
erforderliche Beckenoberfläche	$A_{VKB,erf}$	426 [m²]
<b>gewählte Abmessungen</b>		
Anzahl der Becken	n	2,00 [stk]
Länge Vorklärbecken	$l_{VKB}$	30,00 [m]
Breite Vorklärbecken	$b_{VKB}$	8,00 [m]
Tiefe Vorklärbecken	$h_{VKB}$	2,60 [m]
Volumen Vorklärbecken	$V_{VKB}$	1248 [m³]
Oberfläche Vorklärbecken	$A_{VKB}$	480 [m²]
<b>maximaler Mischwasserabfluss nach Ausgleichsbecken</b>		
Längsgeschwindigkeit bei $Q_M$	$v_M$	1,86 [cm/s]
Längsgeschwindigkeit bei $Q_{T,2h,max}$	$v_{T,2h,max}$	0,99 [cm/s]
Beckenlänge zu Beckenbreite	$l_{VKB}/b_{VKB}$	3,75 [-]
Beckenlänge zu Beckentiefe	$l_{VKB}/h_{VKB}$	11,54 [-]
<b>Schmutzfrachten im Zulauf zur Vorklärung</b>		
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur Vorklärung	$B_{d,BSB,Z}$	7.800,00 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur Vorklärung	$B_{d,CSB,Z}$	15.600,00 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur Vorklärung	$B_{d,TS,Z}$	9.100,00 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur Vorklärung	$B_{d,TKN,Z}$	1.430,00 [kg/d]
NH <sub>4</sub> -N-Fracht im Zulauf zur Vorklärung	$B_{d,NH_4,Z}$	975,00 [kg/d]
org. N-Fracht im Zulauf zur Vorklärung	$B_{d,orgN,Z}$	455,00 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur Vorklärung	$B_{d,P,Z}$	234,00 [kg/d]
<b>Eliminationsraten inkl. Rückbelastung</b>		
BSB <sub>5</sub> -Elimination	$\eta_{BSB}$	23,00 [%]
CSB-Elimination	$\eta_{CSB}$	23,00 [%]
TS-Elimination	$\eta_{TS}$	46,00 [%]
TKN-Elimination	$\eta_{TKN}$	-7,68 [%]
NH <sub>4</sub> -N-Elimination	$\eta_{NH_4}$	0,00 [%]
org. N-Elimination	$\eta_{orgN}$	23,00 [%]
P-Elimination	$\eta_P$	13,00 [%]
<b>Schmutzfrachten im Zulauf zur Belebung inkl. Rückbelastung</b>		
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,BSB,ZB}$	6.006,00 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,CSB,ZB}$	12.012,00 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,TS,ZB}$	4.914,00 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,TKN,ZB}$	1.539,85 [kg/d]
NH <sub>4</sub> -N-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,NH_4,ZB}$	975,00 [kg/d]
org. N-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,orgN,ZB}$	350,35 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,P,ZB}$	203,58 [kg/d]

Tabelle A 23: Bemessung Belebung nach HSG, 130.000 E, Teil 1

<b><u>Einwohnerwerte</u></b>		<b>Bemessung</b>
Einwohnerwerte	E	130.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	22.750 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	1490 [m <sup>3</sup> /h]
maximaler Mischwasserabfluss nach Ausgleichsbecken	$Q_M$	2790 [m <sup>3</sup> /h]
<b><u>Schmutzfrachten im Zulauf zur Belebung</u></b>		
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,BSB,ZB}$	6.006,00 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,CSB,ZB}$	12.012,00 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,TS,ZB}$	4.914,00 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,TKN,ZB}$	1.540 [kg/d]
NH <sub>4</sub> -N-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,NH_4,ZB}$	975,00 [kg/d]
org. N-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,orgN,ZB}$	350,35 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,P,ZB}$	203,58 [kg/d]
<b><u>Konzentrationen im Zulauf zur Belebung</u></b>		
BSB <sub>5</sub> -Konzentration im Zulauf zur Belebung	$C_{BSB,ZB}$	264,0 [mg/l]
CSB-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$C_{CSB,ZB}$	528,0 [mg/l]
TS-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$X_{TS,ZB}$	216,0 [mg/l]
TKN-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$C_{TKN,ZB}$	67,7 [mg/l]
NH <sub>4</sub> -N-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$S_{NH_4,ZB}$	42,9 [mg/l]
org. N-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$S_{orgN,ZB}$	15,4 [mg/l]
P-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$C_{P,ZB}$	8,9 [mg/l]
<b><u>Ablaufkonzentrationen und Überwachungswerte</u></b>		
Überwachungswert anorg. N	$S_{anorgN,ÜW}$	18,0 [mg/l]
Überwachungswert NH <sub>4</sub> -N	$S_{NH_4,ÜW}$	7,0 [mg/l]
Überwachungswert P <sub>ges</sub>	$C_{P,ÜW}$	1,0 [mg/l]
mittlerer Ablaufwert org. N	$C_{orgN,e}$	0,0 [mg/l]
mittlerer Ablaufwert NH <sub>4</sub> -N	$S_{NH_4,e}$	1,00 [mg/l]
mittlerer Ablaufwert NO <sub>3</sub> -N	$S_{NO_3,e}$	11,00 [mg/l]
Bemessungsspitzenwert NH <sub>4</sub> -N	$S_{NH_4,e,Sp}$	5,00 [mg/l]
<b><u>weitere Eingabedaten</u></b>		
TS-Gehalt im Ablauf der Belebung	$TS_{BB}$	4,00 [g/l]
biol. TS-Gehalt im Ablauf der Belebung	$TS_{R,bio}$	3,35 [g/l]
Temperatur	T	12 [°C]
Rücklösefaktor	rX	0,00 [-]
Schwankungsfaktor	S	2,00 [-]

Tabelle A 24: Bemessung Belebung nach HSG, 130.000 E, Teil 2

<b><u>kinetische Parameter</u></b>		
Maximale Wachstumsrate	$\mu_{\max}$	0,520 [1/d]
Halbwertkonzentration für max. $\mu$	$K_n$	0,700 [mg/l]
Sterberate der Autotrophen	$b_A$	0,050 [1/d]
Sterberate der Heterotrophen	$b_H$	0,170 [1/d]
Temperaturfaktor autotrophes Wachstum	$f_{T,A}$	0,745 [-]
Temperaturfaktor autotrophe Sterberate	$f_{T,bA}$	0,772 [-]
Temperaturfaktor heterotrophe Sterberate	$f_{T,bH}$	0,809 [-]
Ertragskoeffizient autotrophe Biomasse	$Y_A$	0,150 [-]
Ertragskoeffizient heterotrophe Biomasse	$Y_H$	0,750 [-]
Verlangsamung der Atmung im anoxischen Bereich	$f_d$	0,750 [-]
<b><u>stöchiometrische Parameter</u></b>		
Anteil der nichtabbaubaren Feststoffe	$f_p$	0,600 [-]
Anteil N an der Biomasse ( $X_H + X_A$ )	$B$	0,120 [-]
Anteil N am inerten Material ( $X_I$ )	$i_I$	0,010 [-]
inert Anteil aus Biomassenerfall	$f_I$	0,200 [-]
Anteil P an der Biomasse ( $X_H + X_A$ )	$i_P$	0,030 [-]
<b><u>sonstige Parameter</u></b>		
Sicherheitsfaktor	$f$	1,250 [-]
Substratatmung (in kg O <sub>2</sub> / kg BSB <sub>5,el.</sub> )	$f_{OV,s}$	0,560 [kg/kg]
endogene Atmungsrate (in kg O <sub>2</sub> / (kg oTS · d))	$f_{OV,e}$	0,200 [kg/(kg·d)]
Abbaugrad des BSB <sub>5</sub> im Belebungsbecken	$\eta$	0,950 [-]

Tabelle A 25: Bemessung Belebung nach HSG, 130.000 E, Teil 3

<b><u>Berechnung des aeroben Schlammalters</u></b>		
erforderliches aerobes Schlammalter	$t_{TS,A}$	9,5 [d]
<b><u>iterative Berechnung des <math>V_N/V_D</math>-Verhältnisses</u></b>		
Berücksichtigung Atmungserhöhungsfaktor		ja
$V_N/V$ -Verhältnis	$V_N/V$	0,49 [-]
$V_D/V$ -Verhältnis geschätzt	$V_D/V_g$	0,5098 [-]
$V_D/V$ -Verhältnis berechnet	$V_D/V$	0,5098 [-]
Vorgabe Rückführrate	$RF_V$	4,2907 [-]
erforderliche Rückführrate	$RF$	4,2907 [-]
Korrekturfaktor für die anoxische Atmung	$a$	1,17 [-]
zu denitrifizierende Stickstoffkonzentration	$N_{d,m}^*$	47,20 [mg/l]
Hilfsgröße $P_I$	$P_I$	1,30 [mg/l]
Hilfsgröße $P_H$	$P_H$	6,42 [mg/l]
Hilfsgröße $P_A$	$P_A$	0,013 [-]
in ÜS inkorporierte Stickstoffkonzentration	$N_{ÜS}$	8,49 [mg/l]
zu denitrifizierende Stickstoffkonzentration	$N_{d,m}^{**}$	47,20 [mg/l]
<b><u>Berechnung des gesamten Schlammalters</u></b>		
erforderliches gesamtes Schlammalter	$t_{TS,G}$	19,4 [d]
<b><u>P-Fällung</u></b>		
P-Fällung vorgesehen		ja
inkorporierter Phosphor	$P_{ink}$	1,73 [mg/l]
zu fällender Phosphor	$P_{fäll}$	6,22 [mg/l]
Molverhältnis	$\beta$	1,500 [-]
erforderliches Fällmittel (Eisen(II) oder Eisen(III))	$Fe$	16,826 [mg/l]
<b><u>Berechnung der Überschussschlammproduktion</u></b>		
biol. Überschussschlammproduktion	$ÜS_R$	0,17 [kg/(m <sup>3</sup> *d)]
Heterotrophe Biomasse	$X_H$	0,797 [kg/m <sup>3</sup> ]
Autotrophe Biomasse	$X_A$	0,099 [kg/m <sup>3</sup> ]
Inerte Biomasse	$X_I$	2,449 [kg/m <sup>3</sup> ]
Fällungsprodukte	$X_F$	0,654 [kg/m <sup>3</sup> ]

**Tabelle A 26: Bemessung Belebung nach HSG, 130.000 E, Teil 4**

<b><u>Berechnung der Beckenvolumina</u></b>		
zu nitrifizierende Stickstoffkonzentration	$N_{n,m}$	59,20 [mg/l]
Hilfsgröße P	P	215,06 [g/m <sup>3</sup> ]
Raumbeschickung	$q_R$	0,801 [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·d)]
erforderliches Gesamtvolumen der Belebung	V	<b>28.390</b> [m <sup>3</sup> ]
erforderliches aerobes Volumen der Belebung	$V_N$	<b>13.917</b> [m <sup>3</sup> ]
erforderliches anoxisches Volumen der Belebung	$V_D$	<b>14.473</b> [m <sup>3</sup> ]

Tabelle A 27: Bemessung Nachklärung, 130.000 E

<b><u>Eingabedaten</u></b>		
Mischwasserzufluß gesamt	$Q_{M,ges}$	2.790 [m <sup>3</sup> /h]
Schlammindex	ISV	100 [l/kg]
Rücklaufverhältnis	$RV_{max}$	0,75 [-]
Abminderungsfaktor für $TS_{RS}$		0,7 [-]
Schlammvolumenbeschickung	$q_{SV}$	500 [l/(m <sup>2</sup> *h)]
Eindickzeit für $TS_{BS}$	$t_E$	2,00 [h]
<b><u>Schlammkennwerte</u></b>		
Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken	$TS_{BB}$	3,78 [kg/m <sup>3</sup> ]
Trockensubstanzgehalt an der Nachklärbeckens	$TS_{BS}$	12,60 [kg/m <sup>3</sup> ]
Trockensubstanzgehalt des Rücklaufschlammes	$TS_{RS}$	8,82 [kg/m <sup>3</sup> ]
Vergleichsschlammvolumen	VSV	378 [l/m <sup>3</sup> ]
<b><u>Beckenoberfläche</u></b>		
Flächenbeschickung	$q_A$	1,32 [m/h]
erf. Netto-Beckenoberfläche	$A_{NB}$	2.109 [m <sup>2</sup> ]
<b><u>Beckentiefe</u></b>		
Klarwasserzone	$h_1$	0,50 [m]
Trennzone	$h_2$	1,86 [m]
Speicherzone	$h_3$	0,79 [m]
Eindick- und Räumzone	$h_4$	1,39 [m]
Gesamttiefe auf 2/3-Fließweg	$h_{ges}$	4,54 [m]
<b><u>Beckenvolumen</u></b>		
erf. Netto-Volumen	$V_{ges,erf}$	9.568 [m <sup>3</sup> ]
<b><u>Gewählte Beckenabmessungen:</u></b>		
Beckenanzahl	$n$	2 [stk]
Sohlneigung	$i$	0,07 [-]
Innendurchmesser	$d_i$	40 [m]
Durchmesser Mittelbauwerk	$d_i$	5 [m]
Randwassertiefe	$h_{Rand}$	4,09 [m]
Gesamttiefe auf 2/3 Fließweg	$h_{2/3}$	4,54 [m]
Wassertiefe in Beckenmitte	$h_{Mitte}$	5,43 [m]
Netto-Beckenoberfläche je Becken	$A_{netto,Becken}$	1.237 [m <sup>2</sup> ]
Netto-Beckenoberfläche gesamt	$A_{netto,ges}$	2.474 [m <sup>2</sup> ]
Netto-Beckenvolumen je Becken	$V_{netto,Becken}$	5.613 [m <sup>3</sup> ]
Netto-Beckenvolumen gesamt	$V_{netto,ges}$	11.225 [m <sup>3</sup> ]
Hydraulische Aufenthaltszeit bei Regenwetter	$t$	4 [h]

Tabelle A 28: Berechnung Luftbedarf für 100.000 E (Ausbaugröße 130.00 E), Teil 1

<b><u>Zulaufmengen</u></b>		<b>100.000 E</b>
Tageswassermenge	$Q_d$	17.500 m <sup>3</sup> /d
Mischwassermenge	$Q_M$	24.500 m <sup>3</sup> /d
<b><u>Zulaufmengen zur Belebung</u></b>		
CSB	$B_{d,CSB,ZB}$	9.240 kg/d
BSB <sub>5</sub>	$B_{d,BSB,ZB}$	4.620 kg/d
TKN	$B_{d,TKN,ZB}$	1.234 kg/d
NO <sub>3</sub> -N	$B_{d,NO_3,ZB}$	0 kg/d
P <sub>ges.</sub>	$B_{d,P,ZB}$	180 kg/d
TS <sub>0</sub>	$B_{d,TS,ZB}$	3.780 kg/d
<b><u>Zulaufkonzentrationen zur Belebung (inkl. Rückbelastung)</u></b>		
CSB	$C_{CSB,ZB}$	528,0 mg/l
BSB <sub>5</sub>	$C_{BSB,ZB}$	264,0 mg/l
TKN	$C_{TKN,ZB}$	70,5 mg/l
NO <sub>3</sub> -N	$S_{NO_3,ZB}$	0,0 mg/l
Gesamtstickstoff im Zulauf BB	$C_{N,ZB}$	70,5 mg/l
P <sub>ges.</sub>	$C_{P,ZB}$	10,3 mg/l
TS <sub>0</sub>	$X_{TS,ZB}$	216,0 mg/l
<b><u>Überwachungswerte</u></b>		
CSB	$C_{CSB,AN}$	60,0 mg/l
BSB <sub>5</sub>	$C_{BSB,AN}$	20,0 mg/l
NH <sub>4</sub> -N	$C_{NH_4-N,AN}$	7,0 mg/l
N <sub>ges. anorg.-N</sub>	$C_{N_{ges},AN}$	18,0 mg/l
P <sub>ges.</sub>	$C_{P,AN}$	1,5 mg/l
<b><u>Mittlere Ablaufwerte</u></b>		
org. Stickstoff im Ablauf BB	$S_{orgN,AN}$	0,0 mg/l
Ammoniumstickstoff im Ablauf BB	$S_{NH_4,AN}$	1,0 mg/l
Nitratstickstoff im Ablauf BB	$S_{NO_3,AN}$	11,0 mg/l

Tabelle A 29: Berechnung Luftbedarf für 100.000 E (Ausbaugröße 130.00 E), Teil 2

<b><u>Sauerstoffbedarf (nach BSB)</u></b>		
Schlammalter	$t_{TS, Bem}$	19,4 d
$C_{CSB}/C_{BSB5}$		2,00 g/g
Stoßfaktor C	$f_c$	1,00 ---
Stoßfaktor N	$f_N$	1,00 ---
angestrebter Sauerstoffgehalt	$C_x$	1,50 mg/l
Nitrat im Zulauf	$S_{NO3, ZB}$	0,0 mg/l
Nitrat im Ablauf	$S_{NO3, AN}$	11,0 mg/l
in Biomasse eingebaute N-Fracht (BSB)	$X_{org, N, BM}$	7,8 mg/l
zu denitrifizierende Nitratkonzentration	$S_{NO3, D}$	50,76 mg/l
zu nitrifizierende Ammoniumkonzentration	$S_{NH4, N}$	61,76 mg/l
Sauerstoffverbrauch für Nitrifikation	$OV_{d, N}$	4.648 kgO <sub>2</sub> /d
Sauerstoffgewinn durch Denitrifikation	$OV_{d, D}$	2.576 kgO <sub>2</sub> /d
Temperatur	T	14,00 °C
Standardsättigungskonzentration für T	$C_{SS, T}$	10,31 mg/l
Sauerstoffsättigungskonzentration für $t_E$	$C_S$	12,80 mg/l
Temperaturfaktor	$F_T$	0,93 -
Kohlenstoffatmung	$OV_{d, C, Abb.}$	2.587 kgO <sub>2</sub> /d
endogene Atmung	$OV_{d, C, end.}$	3.077 kgO <sub>2</sub> /d
Sauerstoffverbrauch für C-Elimination	$OV_{d, C}$	5.664 kgO <sub>2</sub> /d
Spezifischer Sauerstoffverbrauch	$OV_{C, BSB}$	1,23 kgO <sub>2</sub> /kgBSB
Kohlenstoffstoß ( $f_N = 1, f_C = 1,00$ )	$OV_h$	322 kgO <sub>2</sub> /h
Stickstoffstoß ( $f_C = 1, f_N = 1,00$ )	$OV_h$	322 kgO <sub>2</sub> /h
max. erforderliche Sauerstoffzufuhr	erf. $\alpha OC_h$	365 kgO <sub>2</sub> /h
<b>mittl. tägl. Sauerstoffzufuhr (C+N-DN)</b>	<b><math>\alpha OC_d</math></b>	<b>8.762 kgO<sub>2</sub>/d</b>
<b><u>Luftbedarf</u></b>		
mittlere Einblastiefe	$t_E$	5,00 m
Grenzflächenfaktor	$\alpha$	0,69 -
spez. Sauerstoffzufuhr	$OC_{L, h}$	21,00 g/Nm <sup>3</sup> /m
max. erforderliche Sauerstoffzufuhr in Reinwasser	erf. $OC_h$	529,1 kgO <sub>2</sub> /h
Sauerstoffzufuhr	$OC_R$	105 g/Nm <sup>3</sup>
maximaler Luftbedarf	$Q_{Luft}$	5.039 Nm <sup>3</sup> /h

Tabelle A 30: Berechnung der Schlammengen Ozon, 130.000 E

<b><u>Primärschlamm aus Vorklärung</u></b>		
TS Anfall Primärschlamm	$TS_{PS}$	45 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	$m_{TS}$	4.500 [kg <sub>TS</sub> /d]
TS Gehalt Primärschlamm	$TS_{PS}$	2,5 [%]
<b>Menge Primärschlamm</b>	<b><math>Q_{PS}</math></b>	<b>180,0 [m<sup>3</sup>/d]</b>
GV bzw oTS	$GV_{PS}$	65,0 [%]
Fracht oTS	$oTS_{PS}$	2.925,0 [kg <sub>oTS</sub> /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	$t_R$	0,8 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
PS eingedickt	$TS_{PS}$	5,0 [%]
PS eingedickt	$Q_{PS}$	90,0 [m <sup>3</sup> /d]
<b><u>Schlamm aus BB</u></b>		
TS Anfall ÜSS inkl Fällungs ÜSS		4.893 [kg <sub>TS</sub> /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	0,7 [%]
GV bzw oTS	$GV_{ÜSS}$	65,0 [%]
<b>Menge Überschussschlamm gesamt</b>	<b><math>Q_{ÜSS}</math></b>	<b>699 [m<sup>3</sup>/d]</b>
Fracht oTS	$oTS_{ÜSS}$	2.275 [kg <sub>oTS</sub> /d]
ÜSS eingedickt	$TS_{ÜSS}$	5,0 [%]
ÜSS eingedickt	$Q_{ÜS}$	97,9 [m <sup>3</sup> /d]
<b><u>Rohschlamm gemischt und eingedickt</u></b>		
Schlammanfall		80,0 [g/(E·d)]
Fracht TS RS	$TS_{RS}$	8.000 [kg <sub>TS</sub> /d]
Fracht oTS RS	$oTS_{RS}$	5.200 [kg <sub>oTS</sub> /d]
Rohschlammmenge	$m_{TS}$	8,0 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	$TS_{RS}$	4,00 [%]
<b>Rohschlammmenge</b>	<b><math>Q_{RS}</math></b>	<b>200 [m<sup>3</sup>/d]</b>

Tabelle A 31: Berechnung der Schlammengen PAK, 130.000 E

<b><u>Primärschlamm aus Vorklärung</u></b>		
TS Anfall Primärschlamm	$TS_{PS}$	45 [g/(E·d)]
Fracht TS Primärschlamm	$m_{TS}$	4.500 [kg <sub>TS</sub> /d]
TS Gehalt Primärschlamm	$TS_{PS}$	2,5 [%]
<b>Menge Primärschlamm</b>	<b><math>Q_{PS}</math></b>	<b>180,0 [m<sup>3</sup>/d]</b>
GV bzw oTS	$GV_{PS}$	65,0 [%]
Fracht oTS	$oTS_{PS}$	2.925,0 [kg <sub>oTS</sub> /d]
Aufenthaltszeit Vorklärung	$t_R$	0,8 [h]
Temperatur	T	15,0 [°C]
PS eingedickt	$TS_{PS}$	5,0 [%]
PS eingedickt	$Q_{PS}$	90,0 [m <sup>3</sup> /d]
<b><u>Schlamm aus BB</u></b>		
TS Anfall ÜSS inkl Fällungs ÜSS		4.893 [kg <sub>TS</sub> /d]
TS Gehalt Überschussschlamm	$TS_{ÜSS}$	0,7 [%]
GV bzw oTS	$GV_{ÜSS}$	65,0 [%]
Menge Überschussschlamm		699 [m <sup>3</sup> /d]
zusätzlich aus PAK ca. 5 %	$ÜSS_{PAK}$	11 [m <sup>3</sup> /d]
<b>Menge Überschussschlamm gesamt</b>	<b><math>Q_{ÜSS}</math></b>	<b>709 [m<sup>3</sup>/d]</b>
Fracht oTS	$oTS_{ÜSS}$	2.275 [kg <sub>oTS</sub> /d]
ÜSS eingedickt	$TS_{ÜSS}$	5,0 [%]
ÜSS eingedickt	$Q_{ÜS}$	97,9 [m <sup>3</sup> /d]
<b><u>Rohschlamm gemischt und eingedickt</u></b>		
Schlammanfall		80,0 [g/(E·d)]
Fracht TS RS	$TS_{RS}$	8.000 [kg <sub>TS</sub> /d]
Fracht oTS RS	$oTS_{RS}$	5.200 [kg <sub>oTS</sub> /d]
Rohschlammmenge	$m_{TS}$	8,0 [t TS /d]
TS Gehalt Rohschlamm	$TS_{RS}$	4,00 [%]
<b>Rohschlammmenge +5% aus PAK</b>	<b><math>Q_{RS}</math></b>	<b>210 [m<sup>3</sup>/d]</b>

### 3. Tabellen zum Energiebedarf 100.000 E (für Ausbaugröße 130.000 E)

**Tabelle A 32: Hebewerk, 100.000 E**

<b>Wassermengen</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>gewählt</b>
Einwohnerwerte	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>Zulaufhebewerk</b>				
Wirkungsgrad	$\eta$	0,60 [-]	0,50 [-]	0,55 [-]
Förderhöhe	h	3,00 [m]	3,00 [m]	3,00 [m]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Durchfluss	Q	0,28 [m³/s]	0,28 [m³/s]	0,28 [m³/s]
Pumpenleistung	P	13,9 [kW]	16,7 [kW]	15,2 [kW]
Energieverbrauch absolut berechnet	$E_{abs,HW}$	333,8 [kWh/d]	400,6 [kWh/d]	364,2 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,HW}$	13,6 [Wh/m³]	16,4 [Wh/m³]	14,9 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,HW}$	1,22 [kWh/(E·a)]	1,46 [kWh/(E·a)]	1,33 [kWh/(E·a)]

**Tabelle A 33: Rechen, 100.000 E**

<b>Wassermengen</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>gewählt</b>
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>Rechen</b>				
spezifischer Energieverbrauch	$E_{spez}$	0,05 [kWh/(E·a)]	0,10 [kWh/(E·a)]	0,08 [kWh/(E·a)]
Einwohner nach CSB	EW	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Energieverbrauch absolut	$E_{a,R}$	14 [kWh/d]	27 [kWh/d]	21 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,R}$	0,6 [Wh/m³]	1,1 [Wh/m³]	0,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,R}$	0,05 [kWh/(E·a)]	0,10 [kWh/(E·a)]	0,08 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 34: Sandfang, 100.000 E

<b>Wassermengen</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>gewählt</b>
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>Sandfang</b>				
<b>Gebälse:</b>				
Anzahl Sandfang	$n_{SF}$	2 [stk]	2 [stk]	2 [stk]
Querschnittsfläche je SF	$A_{SF}$	7 [m²]	7 [m²]	7 [m²]
Länge Sandfang	$l_{SF}$	34 [m]	34 [m]	34 [m]
Volumen je Sandfang	$V_{SF}$	240 [m³]	240 [m³]	240 [m³]
Volumen gesamt	$V_{SF,ges}$	480 [m³]	480 [m³]	480 [m³]
Einblastiefe	$h_E$	2,7 [m]	2,7 [m]	2,7 [m]
Aufenthaltszeit	$t_{SF}$	10,0 [min]	10,0 [min]	10,0 [min]
Lufteintrag nach Stein	$Q_{L,SF}$	0,5 [m³/(m³h)]	1,3 [m³/(m³h)]	0,9 [m³/(m³h)]
Gesamtluftbedarf	$Q_{L,SF,ges}$	240,0 [m³/h]	624,0 [m³/h]	432,0 [m³/h]
Rohrleitungsverluste angenommen	$\xi$	0,3 [m WS]	0,3 [m WS]	0,3 [m WS]
Wirkungsgrad	$\eta_{SF}$	62 [%]	55 [%]	60 [%]
mittlere Gebälseleistung	$P_{Gebi}$	2,8 [kW]	8,3 [kW]	5,3 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFG}$	68,3 [kWh/d]	200,3 [kWh/d]	127,1 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFG}$	2,8 [Wh/m³]	8,2 [Wh/m³]	5,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFG}$	0,25 [kWh/(E·a)]	0,73 [kWh/(E·a)]	0,46 [kWh/(E·a)]
<b>Räumer:</b>				
Anzahl der Räumer	$n_{Räumer}$	2,00 [stk]	2,00 [stk]	2,00 [stk]
Laufzeit	$t_{SFR}$	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]
Leistung Räumer	$P_{SFR}$	0,30 [kW]	1,00 [kW]	0,80 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFR}$	1,2 [kWh/d]	4,0 [kWh/d]	3,2 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFR}$	0,05 [Wh/m³]	0,16 [Wh/m³]	0,13 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFR}$	0,00 [kWh/(E·a)]	0,01 [kWh/(E·a)]	0,01 [kWh/(E·a)]
<b>Sandentnahmepumpe</b>				
Laufzeit	$t_{SFP}$	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]
Leistung Pumpe	$P_{SFP}$	8,00 [kW]	8,00 [kW]	8,00 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFP}$	16,0 [kWh/d]	16,0 [kWh/d]	16,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFP}$	0,7 [Wh/m³]	0,7 [Wh/m³]	0,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFP}$	0,06 [kWh/(E·a)]	0,06 [kWh/(E·a)]	0,06 [kWh/(E·a)]
<b>Sandgutwäscher</b>				
Laufzeit	$t_{SFW}$	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]	2,00 [h/d]
Leistung wäscher	$P_{SFW}$	15,00 [kW]	15,00 [kW]	15,00 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFW}$	30,0 [kWh/d]	30,0 [kWh/d]	30,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	1,2 [Wh/m³]	1,2 [Wh/m³]	1,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	0,11 [kWh/(E·a)]	0,11 [kWh/EWa]	0,11 [kWh/(E·a)]
<b>Summe Sandfang</b>				
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SF}$	115,55 [kWh/d]	250,32 [kWh/d]	176,33 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	4,72 [Wh/m³]	10,22 [Wh/m³]	7,20 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	0,42 [kWh/(E·a)]	0,91 [kWh/(E·a)]	0,64 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 35: Vorklärung, 100.000 E

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
Primärschlammanfall	$Q_{PS}$	180,0 [m³/d]	180,0 [m³/d]	180,0 [m³/d]
<b>PS Pumpwerk</b>				
Anzahl Pumpen	n	2 [stk]	2 [stk]	2 [stk]
Förderhöhe	h	4,00 [m]	4,00 [m]	4,00 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,70 [-]	0,30 [-]	0,45 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s]	9,81 [m/s]	9,81 [m/s]
Pumpenleistung	P	0,12 [kW]	0,27 [kW]	0,18 [kW]
Laufzeit	t	12 [h/d]	12 [h/d]	12 [h/d]
Energieverbrauch je Pumpe	$E_{abs,VKP}$	1,4 [kWh/d]	3,3 [kWh/d]	2,2 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VKP}$	15,6 [Wh/m³]	36,3 [Wh/m³]	24,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VKP}$	0,1 [Wh/m³]	0,3 [Wh/m³]	0,2 [Wh/m³]
<b>VKB Räumler</b>				
Anzahl Räumler	n	2 [stk]	2 [stk]	2 [stk]
Leistung Räumler	P	0,3 [kW/Becken]	1,0 [kW/Becken]	0,8 [kW/Becken]
Laufzeit Räumler	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Energiebedarf Räumler	$E_{abs,VK,R}$	7,20 [kWh/d]	24,00 [kWh/d]	19,20 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VK,R}$	0,6 [Wh/m³]	2,0 [Wh/m³]	1,6 [Wh/m³]
<b>gesamt VKB</b>				
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VK}$	0,7 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VK}$	0,063 [kWh/(E·a)]	0,199 [kWh/(E·a)]	0,156 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 36: Belebungs, 100.000 E

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
Jahreswassermenge Mischwasser	$Q_M$	8.942.500 [m³/a]	8.942.500 [m³/a]	8.942.500 [m³/a]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Volumen Deni	$V_D$	14.473 [m³]	14.473 [m³]	14.473 [m³]
Volumen Nitri	$V_N$	13.917 [m³]	13.917 [m³]	13.917 [m³]
<b>Belüftung</b>				
Einblastiefe BB	$h_{E,BB}$	5,0 [m]	5,0 [m]	5,0 [m]
Grenzflächenfaktor	$\alpha_{BB}$	0,69 [-]	0,69 [-]	0,69 [-]
Luftdichte bei 20°C	$\rho$	1,2 [kg/m³]	1,2 [kg/m³]	1,2 [kg/m³]
Massenprozentanteil O <sub>2</sub> in Luft	$C_{O_2,Luft}$	23,14 [%]	23,14 [%]	23,14 [%]
erforderliche mittlere Sauerstoffzufuhr pro Tag	erf. $\alpha OC_d$	8.762 [kgO <sub>2</sub> /d]	8.762 [kgO <sub>2</sub> /d]	8.762 [kgO <sub>2</sub> /d]
erforderliche mittlere Sauerstoffzufuhr pro Stunde	erf. $\alpha OC_h$	365 [kgO <sub>2</sub> /h]	365 [kgO <sub>2</sub> /h]	365 [kgO <sub>2</sub> /h]
Sauerstoffbedarf für BB in Reinwasser	$OC_R$	12.700 [kgO <sub>2</sub> /d]	12.700 [kgO <sub>2</sub> /d]	12.700 [kgO <sub>2</sub> /d]
spez. Sauerstoffzufuhr	$OC_{L,h}$	21,00 g/Nm³/m	21,00 g/Nm³/m	21,00 g/Nm³/m
Luftbedarf BB pro Tag	$Q_{L,d,BB}$	121.000 [Nm³/d]	121.000 [Nm³/d]	121.000 [Nm³/d]
Gebäsedruck	$\Delta P$	6,00 [mWS]	6,00 [mWS]	6,00 [mWS]
Wirkungsgrad Gebläse	$\eta$	0,77 [-]	0,68 [-]	0,70 [-]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,BB}$	2.569 [kWh/d]	2.909 [kWh/d]	2.826 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,BB}$	104,9 [Wh/m³]	118,7 [Wh/m³]	115,3 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,BB}$	9,4 [kWh/(E·a)]	10,6 [kWh/(E·a)]	10,3 [kWh/(E·a)]
<b>Rezipumpen</b>				
Reziverhältnis	R	3,0 [-]	3,0 [-]	3,0 [-]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
zu fördernde Wassermenge	Q	73.500,0 [m³/d]	73.500,0 [m³/d]	73.500,0 [m³/d]
Förderhöhe	h	0,5 [m]	0,5 [m]	0,5 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,80 [-]	0,65 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,8 [m/s²]	9,8 [m/s²]	9,8 [m/s²]
Pumpenleistung	P	5,2 [kW]	6,4 [kW]	6,0 [kW]
Laufzeit	t	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	$E_{abs,RZ}$	125,2 [kWh/d]	77,0 [kWh/d]	71,5 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RZ}$	10,2 [Wh/m³]	6,3 [Wh/m³]	5,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RZ}$	0,9 [kWh/(E·a)]	0,6 [kWh/(E·a)]	0,5 [kWh/(E·a)]
<b>Rührwerke</b>				
Laufzeit	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Volumen zur Umwälzung Deni	$V_D$	14.473 [m³]	14.473 [m³]	14.473 [m³]
spezifische Energie	$E_{spez}$	1,5 [W/m³]	1,5 [W/m³]	1,5 [W/m³]
Energiebedarf im Becken	$E_{Becken}$	21.709,8 [W]	21.709,8 [W]	21.709,8 [W]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,RW}$	521,03 [kWh/d]	521,03 [kWh/d]	521,03 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RW}$	21,3 [Wh/m³]	21,3 [Wh/m³]	21,3 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RW}$	1,9 [kWh/(E·a)]	1,9 [kWh/(E·a)]	1,9 [kWh/(E·a)]
<b>RLS Pumpwerk</b>				
Rücklaufverhältnis	RV	1,0 [-]	1,0 [-]	1,0 [-]
Geförderete Wassermenge	Q	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Förderhöhe	h	1,5 [m]	1,5 [m]	1,5 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,75 [-]	0,65 [-]	0,70 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpenleistung	P	5,6 [kW]	6,4 [kW]	6,0 [kW]
Laufzeit	t	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	$E_{abs,RLS}$	66,8 [kWh/d]	77,0 [kWh/d]	71,5 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RLS}$	5,5 [Wh/m³]	6,3 [Wh/m³]	5,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RLS}$	0,49 [kWh/(E·a)]	0,56 [kWh/(E·a)]	0,52 [kWh/(E·a)]

**Tabelle A 37: Fällmitteldosierung, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Leistung Dosierpumpen	$P_{DP}$	0,5 [Wh/m³]	0,5 [Wh/m³]	0,5 [Wh/m³]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,F}$	12 [kWh/d]	12 [kWh/d]	12 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,F}$	0,04 [kWh/Ea]	0,04 [kWh/Ea]	0,04 [kWh/Ea]

**Tabelle A 38: Nachklärung, 100.000 E mit Ozonung**

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Anzahl Becken	n	2 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
<b>ÜSS Pumpwerk</b>				
Geförderete Schlammmenge	$Q_{ÜSS}$	699 [m³/d]	699 [m³/d]	699 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Förderhöhe	h	4,0 [m]	4,0 [m]	4,0 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,8 [-]	0,6 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpenleistung	P	0,4 [kW]	0,5 [kW]	0,5 [kW]
Laufzeit	t	6,0 [h/d]	6,0 [h/d]	6,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	$E_{abs,ÜSS}$	2,4 [kWh/d]	3,2 [kWh/d]	2,7 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,ÜSS}$	0,2 [Wh/m³]	0,3 [Wh/m³]	0,2 [Wh/m³]
<b>NKB Räumler</b>				
Anzahl Räumler	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Wirkleistung Räumler	P	0,3 [kW/Becken]	1,0 [kW/Becken]	0,7 [kW/Becken]
Laufzeit Räumler	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut	$E_{Räumler,NKB}$	14 [kWh/d]	48 [kWh/d]	34 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB,R}$	0,6 [Wh/m³]	2,0 [Wh/m³]	1,4 [Wh/m³]
<b>gesamt NKB</b>				
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,8 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,6 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,070 [kWh/(E·a)]	0,198 [kWh/(E·a)]	0,143 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 39: Nachklärung 100.000 E mit PAK

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
Anzahl Becken	n	2 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
<b>ÜSS Pumpwerk</b>				
Geförderete Schlammmenge (inkl. PAK)	$Q_{ÜSS}$	709 [m³/d]	709 [m³/d]	709 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Förderhöhe	h	4,0 [m]	4,0 [m]	4,0 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,8 [-]	0,6 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpenleistung	P	0,4 [kW]	0,5 [kW]	0,5 [kW]
Laufzeit	t	6,0 [h/d]	6,0 [h/d]	6,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	$E_{abs,ÜSS}$	2,4 [kWh/d]	3,2 [kWh/d]	2,8 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,ÜSS}$	0,2 [Wh/m³]	0,3 [Wh/m³]	0,2 [Wh/m³]
<b>NKB Räumler</b>				
Anzahl Räumler	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Wirkleistung Räumler	P	0,3 [kW/Becken]	1,0 [kW/Becken]	0,7 [kW/Becken]
Laufzeit Räumler	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut	$E_{Räumler,NKB}$	14 [kWh/d]	48 [kWh/d]	34 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB,R}$	0,6 [Wh/m³]	2,0 [Wh/m³]	1,4 [Wh/m³]
<b>gesamt NKB</b>				
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,8 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,6 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,070 [kWh/(E·a)]	0,199 [kWh/(E·a)]	0,143 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 40: Voreindickung 100.000 E mit Ozonung

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
ÜSS Menge täglich	$Q_{ÜSS}$	699 [m³/d]	699 [m³/d]	699 [m³/d]
PS Menge täglich	$Q_{PS}$	180 [m³/d]	180 [m³/d]	180 [m³/d]
<b>statische Eindickung PS</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	$E_{spez,PS}$	0,05 [kWh/m³]	0,30 [kWh/m³]	0,15 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,PS}$	9,0 [kWh/d]	54,0 [kWh/d]	27,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,PS}$	0,4 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,1 [Wh/m³]
<b>Siebtrommel</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	$E_{spez,ÜSS}$	0,20 [kWh/m³]	0,40 [kWh/m³]	0,30 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,ÜSS}$	139,8 [kWh/d]	279,6 [kWh/d]	209,7 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,ÜSS}$	5,7 [Wh/m³]	11,4 [Wh/m³]	8,6 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VE}$	6,1 [Wh/m³]	13,6 [Wh/m³]	9,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	$E_{spez,VE}$	0,3 [kWh/m³]	0,7 [kWh/m³]	0,5 [kWh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,VE}$	0,5 [kWh/(E·a)]	1,0 [kWh/(E·a)]	0,8 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 41: Voreindickung 100.000 E mit PAK

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
ÜSS Menge täglich	Q <sub>ÜSS</sub>	709 [m³/d]	709 [m³/d]	709 [m³/d]
PS Menge täglich	Q <sub>PS</sub>	180 [m³/d]	180 [m³/d]	180 [m³/d]
<b>statische Eindickung PS</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,PS</sub>	0,05 [kWh/m³]	0,30 [kWh/m³]	0,15 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,PS</sub>	9,0 [kWh/d]	54,0 [kWh/d]	27,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,PS</sub>	0,4 [Wh/m³]	2,2 [Wh/m³]	1,1 [Wh/m³]
<b>Siebtrommel</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,ÜSS</sub>	0,20 [kWh/m³]	0,40 [kWh/m³]	0,30 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,ÜSS</sub>	141,9 [kWh/d]	283,8 [kWh/d]	212,8 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,ÜSS</sub>	5,8 [Wh/m³]	11,6 [Wh/m³]	8,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,VE</sub>	6,2 [Wh/m³]	13,8 [Wh/m³]	9,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,VE</sub>	0,3 [kWh/m³]	0,7 [kWh/m³]	0,5 [kWh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,VE</sub>	0,5 [kWh/(E·a)]	1,0 [kWh/(E·a)]	0,8 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 42: Stabilisierung 100.000 E mit Ozonung

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Rohschlammmenge	Q <sub>RS</sub>	200 [m³/d]	200 [m³/d]	200 [m³/d]
Faulbehältervolumen	V <sub>F</sub>	4.300 [m³]	4.300 [m³]	4.300 [m³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t <sub>bem</sub>	20 [d]	20 [d]	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t <sub>mittel</sub>	27 [d]	27 [d]	27 [d]
<b>Gesamt</b>				
Energieverbrauch anaerob mesophil spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	1,6 [kWh/m³]	2,3 [kWh/m³]	2,0 [kWh/m³]
Energieverbrauch anaerob mesophil spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	320,0 [kWh/d]	460,0 [kWh/d]	400,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	14 [Wh/m³]	20 [Wh/m³]	17 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	1,17 [kWh/(E·a)]	1,68 [kWh/(E·a)]	1,46 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 43: Stabilisierung 100.000 E mit PAK

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Rohschlammmenge	Q <sub>RS</sub>	210 [m³/d]	210 [m³/d]	210 [m³/d]
Faulbehältervolumen	V <sub>F</sub>	4.300 [m³]	4.300 [m³]	4.300 [m³]
Aufenthaltszeit Bemessungslastfall	t <sub>bem</sub>	20 [d]	20 [d]	20 [d]
Aufenthaltszeit Jahresmittel	t <sub>mittel</sub>	27 [d]	27 [d]	27 [d]
<b>Gesamt</b>				
Energieverbrauch anaerob mesophil spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	1,6 [kWh/m³]	2,3 [kWh/m³]	2,0 [kWh/m³]
Energieverbrauch anaerob mesophil spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	336,0 [kWh/d]	483,0 [kWh/d]	420,0 [kWh/d]
Energieverbrauch gesamt spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	15 [Wh/m³]	21 [Wh/m³]	18,0 [Wh/m³]
Energieverbrauch gesamt spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	1,23 [kWh/(E·a)]	1,76 [kWh/(E·a)]	1,53 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 44: Entwässerung 100.000 E mit Ozonung

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Faulschlammmenge	Q <sub>FS</sub>	200 [m³/d]	200 [m³/d]	200 [m³/d]
<b>Hochleistungszentrifuge</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,Ent</sub>	1,3 [kWh/m³]	1,8 [kWh/m³]	1,5 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,Ent</sub>	260 [kWh/d]	360 [kWh/d]	300 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,Ent</sub>	10,6 [Wh/m³]	14,7 [Wh/m³]	12,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,Ent</sub>	0,95 [kWh/(E·a)]	1,31 [kWh/(E·a)]	1,10 [kWh/(E·a)]

**Tabelle A 45: Entwässerung 100.000 E mit PAK**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
Faulschlammmenge	Q <sub>FS</sub>	210 [m³/d]	210 [m³/d]	210 [m³/d]
<b><u>Hochleistungszentrifuge</u></b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	E <sub>spez,Ent</sub>	1,3 [kWh/m³]	1,8 [kWh/m³]	1,5 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	E <sub>abs,Ent</sub>	273 [kWh/d]	378 [kWh/d]	315 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,Ent</sub>	11,1 [Wh/m³]	15,4 [Wh/m³]	12,9 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,Ent</sub>	1,00 [kWh/(E·a)]	1,38 [kWh/(E·a)]	1,15 [kWh/(E·a)]

**Tabelle A 46: Flockungsfilter, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	Q <sub>M,d,aM</sub>	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b><u>2 Schicht Raumfilter</u></b>				
Förderhöhe	h	3,0 [m]	3,0 [m]	3,0 [m]
Beschickungspumpe	E <sub>BP</sub>	15,0 [Wh/m³]	15,0 [Wh/m³]	15,0 [Wh/m³]
Flockungsmitteldosierung	E <sub>FM</sub>	0,20 [Wh/m³]	0,20 [Wh/m³]	0,20 [Wh/m³]
Spülluft	E <sub>SL</sub>	1,20 [Wh/m³]	1,20 [Wh/m³]	1,20 [Wh/m³]
Spülwasser	E <sub>SW</sub>	3,00 [Wh/m³]	3,00 [Wh/m³]	3,00 [Wh/m³]
Schlammwasserrückführung	E <sub>SR</sub>	3,00 [Wh/m³]	3,00 [Wh/m³]	3,00 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	22,40 [Wh/m³]	22,40 [Wh/m³]	22,40 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,F</sub>	2,00 [kWh/(E·a)]	2,00 [kWh/(E·a)]	2,00 [kWh/(E·a)]

**Tabelle A 47: Ozonung, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q <sub>T,d,aM</sub>	17.500 [m³/d]	17.500 [m³/d]	17.500 [m³/d]
Förderhöhe	h	0,0 [m]	10,0 [m]	5,0 [m]
Energie Hebewerk 70% WG	E <sub>HW</sub>	0,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
Ozonerzeugung	E <sub>O<sub>3</sub>,Erz</sub>	8 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	14 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	10 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]
Energiebedarf für Ozondosis 5,0 g/m³	E <sub>O<sub>3</sub>,5,0</sub>	40 [Wh/m³]	70 [Wh/m³]	55 [Wh/m³]
Ein und Austrag	E <sub>O<sub>3</sub>,I/O</sub>	0 [Wh/m³]	20 [Wh/m³]	10 [Wh/m³]
katalytische Restozonvernichtung	E <sub>O<sub>3</sub>,Rest</sub>	0 [Wh/m³]	10 [Wh/m³]	0 [Wh/m³]
Kühlaggregat	E <sub>O<sub>3</sub>,Kühlung</sub>	10 [Wh/m³]	50 [Wh/m³]	20 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,Ozon</sub>	50,00 [Wh/m³]	190,00 [Wh/m³]	105,00 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,Ozon</sub>	3,19 [kWh/(E·a)]	12,14 [kWh/(E·a)]	6,71 [kWh/(E·a)]

**Tabelle A 48: Pulveraktivkohle, 100.000 E**

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	Q <sub>T,d,aM</sub>	17.500 [m³/d]	17.500 [m³/d]	17.500 [m³/d]
<b><u>Pulveraktivkohle</u></b>				
Förderhöhe	h	0,0 [m]	10,0 [m]	5,0 [m]
Energie Hebewerk 70% WG	E <sub>HW</sub>	0,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
Energie für PAK Zugabe, Rühren, Rezirkulieren	E <sub>HW</sub>	10,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	25,0 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,PAK</sub>	10,00 [Wh/m³]	80,00 [Wh/m³]	45,00 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	E <sub>spez,PAK</sub>	0,6 [kWh/(E·a)]	5,1 [kWh/(E·a)]	2,9 [kWh/(E·a)]
zusätzlich in BB rückgeführte Feststoffmenge 5%	Q <sub>PAK</sub>	10,5 [m³/d]	10,5 [m³/d]	10,5 [m³/d]

Tabelle A 49: Infrastruktur, 100.000 E

		Min	Max	gewählt
<b>Infrastruktur</b>				
Einwohner	E	100.000 [E]	100.000 [E]	100.000 [E]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]	24.500 [m³/d]
<b>Betriebsgebäude</b>				
Licht, Labor Werkstatt	$E_a$	50 [kWh/d]	50 [kWh/d]	50 [kWh/d]
Licht, Labor Werkstatt	$E_{Spez}$	0,18 [kWh/(E·a)]	0,18 [kWh/(E·a)]	0,18 [kWh/(E·a)]
<b>Betriebsmittel</b>				
Brauchwasser	$E_a$	70 [kWh/d]	70 [kWh/d]	70 [kWh/d]
Brauchwasser	$E_{Spez}$	0,26 [kWh/(E·a)]	0,26 [kWh/(E·a)]	0,26 [kWh/(E·a)]
Druckluft	$E_a$	13 [kWh/d]	13 [kWh/d]	13 [kWh/d]
Druckluft	$E_{Spez}$	0,05 [kWh/(E·a)]	0,05 [kWh/(E·a)]	0,05 [kWh/(E·a)]
Heizung	$E_a$	100 [kWh/d]	100 [kWh/d]	100 [kWh/d]
Heizung	$E_{Spez}$	0,37 [kWh/(E·a)]	0,37 [kWh/(E·a)]	0,37 [kWh/(E·a)]
<b>Lüftungsanlagen</b>				
	$E_a$	40 [kWh/d]	40 [kWh/d]	40 [kWh/d]
	$E_{Spez}$	0,15 [kWh/(E·a)]	0,15 [kWh/(E·a)]	0,15 [kWh/(E·a)]
<b>Abluftreinigung</b>				
	$E_a$	160 [kWh/d]	160 [kWh/d]	160 [kWh/d]
	$E_{Spez}$	0,58 [kWh/(E·a)]	0,58 [kWh/(E·a)]	0,58 [kWh/(E·a)]
Energieverbrauch absolut	$E_a$	433 [kWh/d]	433 [kWh/d]	433 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez}$	17,7 [Wh/m³]	17,7 [Wh/m³]	17,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez}$	1,6 [kWh/(E·a)]	1,6 [kWh/(E·a)]	1,6 [kWh/(E·a)]

## 4. Bemessung der Modellanlage 26.000 E

Tabelle A 50: Grundlagen, 26.000 E

<b><u>Einwohnerwerte</u></b>		<b>Bemessung</b>
Einwohnerwerte	E	26.000 [E]
<b><u>Wassermengen</u></b>		
Schmutzwasseranfall	$q_s$	125 [l/(E·d)]
Fremdwasseranfall	$q_f$	62,5 [l/(E·d)]
Niederschlagswasser	$q_r$	70 [l/(E·d)]
Jahreswassermenge Trockenwetter	$Q_T$	1.779.375 [m <sup>3</sup> /a]
Jahreswassermenge Mischwasser	$Q_M$	2.443.675 [m <sup>3</sup> /a]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	3.250 [m <sup>3</sup> /d]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	1.625 [m <sup>3</sup> /d]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,aM}$	1.820 [m <sup>3</sup> /d]
Schmutzwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{S,aM}$	37,62 [l/s]
Fremdwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{F,aM}$	18,81 [l/s]
Regenwasserzufluss im Jahresmittel	$Q_{R,aM}$	21,06 [l/s]
Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,aM}$	56,42 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,aM}$	77,49 [l/s]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	4.875 [m <sup>3</sup> /d]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	6.695 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	109,09 [l/s]
Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	6.695 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Mischwasserabfluss	$Q_{M,max}$	199,36 [l/s]
<b><u>Schmutzfrachten im Zulauf zur Kläranlage</u></b>		
einwohnerspezifische BSB <sub>5</sub> -Fracht	$B_{BSB,spez}$	60 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische CSB-Fracht	$B_{CSB,spez}$	120 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische TS-Fracht	$B_{TS,spez}$	70 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische TKN-Fracht	$B_{TKN,spez}$	11 [g/(E·d)]
einwohnerspezifische P-Fracht	$B_{P,spez}$	1,8 [g/(E·d)]
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,BSB,Z}$	1.560 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,CSB,Z}$	3.120 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,TS,Z}$	1.820 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,TKN,Z}$	286 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur KA	$B_{d,P,Z}$	47 [kg/d]

Tabelle A 51: Bemessung Belebung nach HSG, 26.000 E, Teil 1

<b><u>Einwohnerwerte</u></b>		<b>Bemessung</b>
Einwohnerwerte	E	26.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	4.875 [m <sup>3</sup> /d]
maximaler Trockenwetterabfluss als 2-Stunden-Mittel	$Q_{T,2h,max}$	393 [m <sup>3</sup> /h]
maximaler Mischwasserabfluss nach Ausgleichsbecken	$Q_M$	718 [m <sup>3</sup> /h]
<b><u>Schmutzfrachten im Zulauf zur Belebung</u></b>		
BSB <sub>5</sub> -Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,BSB,ZB}$	1.560,00 [kg/d]
CSB-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,CSB,ZB}$	3.120,00 [kg/d]
TS-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,TS,ZB}$	1.820,00 [kg/d]
TKN-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,TKN,ZB}$	286 [kg/d]
NH <sub>4</sub> -N-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,NH_4,ZB}$	195,00 [kg/d]
org. N-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,orgN,ZB}$	91,00 [kg/d]
P-Fracht im Zulauf zur Belebung	$B_{d,P,ZB}$	46,80 [kg/d]
<b><u>Konzentrationen im Zulauf zur Belebung</u></b>		
BSB <sub>5</sub> -Konzentration im Zulauf zur Belebung	$C_{BSB,ZB}$	320,0 [mg/l]
CSB-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$C_{CSB,ZB}$	640,0 [mg/l]
TS-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$X_{TS,ZB}$	373,3 [mg/l]
TKN-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$C_{TKN,ZB}$	58,7 [mg/l]
NH <sub>4</sub> -N-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$S_{NH_4,ZB}$	40,0 [mg/l]
org. N-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$S_{orgN,ZB}$	18,7 [mg/l]
P-Konzentration im Zulauf zur Belebung	$C_{P,ZB}$	9,6 [mg/l]
<b><u>Ablaufkonzentrationen und Überwachungswerte</u></b>		
Überwachungswert anorg. N	$S_{anorgN,ÜW}$	18,0 [mg/l]
Überwachungswert NH <sub>4</sub> -N	$S_{NH_4,ÜW}$	7,0 [mg/l]
Überwachungswert P <sub>ges</sub>	$C_{P,ÜW}$	1,0 [mg/l]
mittlerer Ablaufwert org. N	$C_{orgN,e}$	0,0 [mg/l]
mittlerer Ablaufwert NH <sub>4</sub> -N	$S_{NH_4,e}$	1,00 [mg/l]
mittlerer Ablaufwert NO <sub>3</sub> -N	$S_{NO_3,e}$	11,00 [mg/l]
Bemessungsspitzenwert NH <sub>4</sub> -N	$S_{NH_4,e,Sp}$	5,00 [mg/l]

Tabelle A 52: Bemessung Belebung nach HSG, 26.000 E, Teil 2

<b><u>weitere Eingabedaten</u></b>		
TS-Gehalt im Ablauf der Belebung	$TS_{BB}$	3,80 [g/l]
biol. TS-Gehalt im Ablauf der Belebung	$TS_{R,bio}$	3,30 [g/l]
Temperatur	T	13 [°C]
Rücklösefaktor	rX	0,00 [-]
Schwankungsfaktor	S	2,30 [-]
<b><u>kinetische Parameter</u></b>		
Maximale Wachstumsrate	$\mu_{max}$	0,520 [1/d]
Halbwertkonzentration für max. $\mu$	$K_n$	0,700 [mg/l]
Sterberate der Autotrophen	$b_A$	0,050 [1/d]
Sterberate der Heterotrophen	$b_H$	0,170 [1/d]
Temperaturfaktor autotrophes Wachstum	$f_{T,A}$	0,822 [-]
Temperaturfaktor autotrophe Sterberate	$f_{T,bA}$	0,842 [-]
Temperaturfaktor heterotrophe Sterberate	$f_{T,bH}$	0,869 [-]
Ertragskoeffizient autotrophe Biomasse	$Y_A$	0,150 [-]
Ertragskoeffizient heterotrophe Biomasse	$Y_H$	0,750 [-]
Verlangsamung der Atmung im anoxischen Bereich	$f_d$	0,750 [-]
<b><u>stöchiometrische Parameter</u></b>		
Anteil der nichtabbaubaren Feststoffe	$f_p$	0,600 [-]
Anteil N an der Biomasse ( $X_H + X_A$ )	B	0,120 [-]
Anteil N am inerten Material ( $X_I$ )	$i_I$	0,010 [-]
inertes Anteil aus Biomassenzersetzung	$f_I$	0,200 [-]
Anteil P an der Biomasse ( $X_H + X_A$ )	$i_P$	0,030 [-]
<b><u>sonstige Parameter</u></b>		
Sicherheitsfaktor	f	1,250 [-]
Substratatemung (in kg O <sub>2</sub> / kg BSB <sub>5,el.</sub> )	$f_{OV,S}$	0,560 [kg/kg]
endogene Atmungsrate (in kg O <sub>2</sub> / (kg oTS · d))	$f_{OV,e}$	0,200 [kg/(kg·d)]
Abbaugrad des BSB <sub>5</sub> im Belebungsbecken	$\eta$	0,950 [-]

Tabelle A 53: Bemessung Belebung nach HSG, 26.000 E, Teil 3

<b><u>Berechnung des aeroben Schlammalters</u></b>		
erforderliches aerobes Schlammalter	$t_{TS,A}$	18,0 [d]
<b><u>iterative Berechnung des <math>V_N/V_D</math>-Verhältnisses</u></b>		
Berücksichtigung Atmungserhöhungsfaktor		ja
$V_N/V$ -Verhältnis	$V_N/V$	0,72 [-]
$V_D/V$ -Verhältnis geschätzt	$V_D/V_g$	0,2799 [-]
$V_D/V$ -Verhältnis berechnet	$V_D/V$	0,2799 [-]
Vorgabe Rückföhrate	$RF_V$	3,4300 [-]
erforderliche Rückföhrate	$RF$	3,4300 [-]
Korrekturfaktor für die anoxische Atmung	$a$	1,35 [-]
zu denitrifizierende Stickstoffkonzentration	$N_{d,m}^*$	37,73 [mg/l]
Hilfsgröße $P_I$	$P_I$	2,24 [mg/l]
Hilfsgröße $P_H$	$P_H$	6,19 [mg/l]
Hilfsgröße $P_A$	$P_A$	0,010 [-]
in ÜS inkorporierte Stickstoffkonzentration	$N_{ÜS}$	8,94 [mg/l]
zu denitrifizierende Stickstoffkonzentration	$N_{d,m}^{**}$	37,73 [mg/l]
<b><u>Berechnung des gesamten Schlammalters</u></b>		
erforderliches gesamtes Schlammalter	$t_{TS,G}$	25,00 [d]
<b><u>P-Fällung</u></b>		
P-Fällung vorgesehen		Ja
inkorporierter Phosphor	$P_{ink}$	1,58 [mg/l]
zu fällender Phosphor	$P_{fäll}$	7,02 [mg/l]
Molverhältnis	$\beta$	1,500 [-]
erforderliches Fällmittel (Eisen(II) oder Eisen(III))	$Fe$	18,981 [mg/l]
<b><u>Berechnung der Überschussschlammproduktion</u></b>		
biol. Überschussschlammproduktion	$ÜS_R$	0,13 [kg/(m <sup>3</sup> *d)]
Heterotrophe Biomasse	$X_H$	0,512 [kg/m <sup>3</sup> ]
Autotrophe Biomasse	$X_A$	0,044 [kg/m <sup>3</sup> ]
Inerte Biomasse	$X_I$	2,744 [kg/m <sup>3</sup> ]
Fällungsprodukte	$X_F$	0,500 [kg/m <sup>3</sup> ]

Tabelle A 54: Bemessung Belebung nach HSG, 26.000 E, Teil 4

<b><u>Berechnung der Beckenvolumina</u></b>		
zu nitrifizierende Stickstoffkonzentration	$N_{n,m}$	49,73 [mg/l]
Hilfsgröße P	P	313,27 [g/m <sup>3</sup> ]
Raumbeschickung	$q_R$	0,421 [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·d)]
erforderliches Gesamtvolumen der Belebung	V	11.567 [m <sup>3</sup> ]
erforderliches aerobes Volumen der Belebung	$V_N$	<b>8.330</b> [m <sup>3</sup> ]
erforderliches anoxisches Volumen der Belebung	$V_D$	<b>3.237</b> [m <sup>3</sup> ]

Tabelle A 55: Berechnung Luftbedarf für 20.000 E (Ausbaugröße 26.000 E), Teil 1

<b><u>Zulaufmengen</u></b>		<b>20.000</b>
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	3.750 m <sup>3</sup> /d
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	5.150 m <sup>3</sup> /d
<b><u>Zulaufmengen zur Belebung</u></b>		
CSB	$B_{d,CSB,ZB}$	2.400 kg/d
BSB <sub>5</sub>	$B_{d,BSB,ZB}$	1.200 kg/d
TKN	$B_{d,TKN,ZB}$	220 kg/d
NO <sub>3</sub> -N	$B_{d,NO3,ZB}$	0 kg/d
P <sub>ges.</sub>	$B_{d,P,ZB}$	36 kg/d
TS <sub>0</sub>	$B_{d,TS,ZB}$	1.400 kg/d
<b><u>Zulaufkonzentrationen zur Belebung</u></b>		
CSB	$C_{CSB,ZB}$	640,0 mg/l
BSB <sub>5</sub>	$C_{BSB,ZB}$	320,0 mg/l
TKN	$C_{TKN,ZB}$	58,7 mg/l
NO <sub>3</sub> -N	$S_{NO3,ZB}$	0,0 mg/l
Gesamtstickstoff im Zulauf BB	$C_{N,ZB}$	58,7 mg/l
P <sub>ges.</sub>	$C_{P,ZB}$	9,6 mg/l
TS <sub>0</sub>	$X_{TS,ZB}$	373,3 mg/l
<b><u>Überwachungswerte</u></b>		
CSB	$C_{CSB,AN}$	60,0 mg/l
BSB <sub>5</sub>	$C_{BSB,AN}$	20,0 mg/l
NH <sub>4</sub> -N	$C_{NH4-N,AN}$	7,0 mg/l
N <sub>ges. anorg.-N</sub>	$C_{Nges,AN}$	18,0 mg/l
P <sub>ges.</sub>	$C_{P,AN}$	1,5 mg/l
<b><u>Mittlere Ablaufwerte</u></b>		
org. Stickstoff im Ablauf BB	$S_{orgN,AN}$	0,0 mg/l
Ammoniumstickstoff im Ablauf BB	$S_{NH4,AN}$	1,0 mg/l
Nitratstickstoff im Ablauf BB	$S_{NO3,AN}$	11,0 mg/l

Tabelle A 56: Berechnung Luftbedarf für 20.000 E (Ausbaugröße 26.000 E), Teil 2

<b><u>Sauerstoffbedarf (nach BSB)</u></b>		
Schlammalter	$t_{TS, Bem}$	25,0 d
$C_{CSB}/C_{BSB5}$		2,00 g/g
Stoßfaktor C	$f_C$	1,00 ---
Stoßfaktor N	$f_N$	1,00 ---
angestrebter Sauerstoffgehalt	$C_x$	1,50 mg/l
Nitrat im Zulauf	$S_{NO_3, ZB}$	0,0 mg/l
Nitrat im Ablauf	$S_{NO_3, AN}$	11,0 mg/l
in Biomasse eingebaute N-Fracht (BSB)	$X_{org, N, BM}$	8,9 mg/l
zu denitrifizierende Nitratkonzentration	$S_{NO_3, D}$	37,73 mg/l
zu nitrifizierende Ammoniumkonzentration	$S_{NH_4, N}$	48,73 mg/l
Sauerstoffverbrauch für Nitrifikation	$OV_{d, N}$	786 kgO <sub>2</sub> /d
Sauerstoffgewinn durch Denitrifikation	$OV_{d, D}$	410 kgO <sub>2</sub> /d
Temperatur	T	13,00 °C
Standardsättigungskonzentration für T	$C_{SS, T}$	10,54 mg/l
Sauerstoffsättigungskonzentration für $t_E$	$C_S$	13,09 mg/l
Temperaturfaktor	$F_T$	0,87 -
Kohlenstoffatmung	$OV_{d, C, Abb.}$	672 kgO <sub>2</sub> /d
endogene Atmung	$OV_{d, C, end.}$	833 kgO <sub>2</sub> /d
Sauerstoffverbrauch für C-Elimination	$OV_{d, C}$	1.505 kgO <sub>2</sub> /d
Spezifischer Sauerstoffverbrauch	$OV_{C, BSB}$	1,25 kgO <sub>2</sub> /kgBSB
Kohlenstoffstoß ( $f_N = 1, f_C = 1,00$ )	$OV_h$	78 kgO <sub>2</sub> /h
Stickstoffstoß ( $f_C = 1, f_N = 1,00$ )	$OV_h$	78 kgO <sub>2</sub> /h
max. erforderliche Sauerstoffzufuhr	$erf. \alpha OC_h$	89 kgO <sub>2</sub> /h
<b>mittl. tägl. Sauerstoffzufuhr (C+N-DN)</b>	<b><math>\alpha OC_d</math></b>	<b>2.124 kgO<sub>2</sub>/d</b>
<b><u>Luftbedarf</u></b>		
mittlere Einblastiefe	$t_E$	5,00 m
Grenzflächenfaktor	$\alpha$	0,69 -
spez. Sauerstoffzufuhr	$OC_{L, h}$	21,00 g/Nm <sup>3</sup> /m
max. erforderliche Sauerstoffzufuhr in Reinwasser	$erf. OC_h$	128,3 kgO <sub>2</sub> /h
Sauerstoffzufuhr	$OC_R$	105 g/Nm <sup>3</sup>
maximaler Luftbedarf	$Q_{Luft}$	1.222 Nm <sup>3</sup> /h

Tabelle A 57: Bemessung Nachklärung, 26.000 E

<b><u>Eingabedaten</u></b>		
Mischwasserzufluß gesamt	$Q_{M,ges}$	718 [m <sup>3</sup> /h]
Schlammindex	ISV	100 [l/kg]
Rücklaufverhältnis	$RV_{max}$	0,75 [-]
Abminderungsfaktor für $TS_{RS}$		0,7 [-]
Schlammvolumenbeschickung	$q_{SV}$	500 [l/(m <sup>2</sup> *h)]
Eindickzeit für $TS_{BS}$	$t_E$	2,00 [h]
<b><u>Schlammkennwerte</u></b>		
Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken	$TS_{BB}$	3,78 [kg/m <sup>3</sup> ]
Trockensubstanzgehalt an der Nachklärbeckensohle	$TS_{BS}$	12,60 [kg/m <sup>3</sup> ]
Trockensubstanzgehalt des Rücklaufschlammes	$TS_{RS}$	8,82 [kg/m <sup>3</sup> ]
Vergleichsschlammvolumen	VSV	377,98 [l/m <sup>3</sup> ]
<b><u>Beckenoberfläche</u></b>		
Flächenbeschickung	$q_A$	1,3 [m/h]
erf. Netto-Beckenoberfläche	$A_{NB}$	543 [m <sup>2</sup> ]
<b><u>Beckentiefe</u></b>		
Klarwasserzone	$h_1$	0,50 [m]
Trennzone	$h_2$	1,86 [m]
Speicherzone	$h_3$	0,79 [m]
Eindick- und Räumzone	$h_4$	1,39 [m]
Gesamttiefe auf 2/3-Fließweg	$h_{ges}$	4,54 [m]
<b><u>Beckenvolumen</u></b>		
erf. Netto-Volumen	$V_{ges,erf}$	2.462 [m <sup>3</sup> ]
<b><u>Gewählte Beckenabmessungen:</u></b>		
Beckenanzahl	n	1 [stk]
Sohlneigung	i	0,07 [-]
Innendurchmesser	$d_i$	28,00 [m]
Durchmesser Mittelbauwerk	$d_i$	5,00 [m]
Randwassertiefe	$h_{Rand}$	4,23 [m]
Gesamttiefe auf 2/3 Fließweg	$h_{2/3}$	4,54 [m]
Wassertiefe in Beckenmitte	$h_{Mitte}$	5,16 [m]
Netto-Beckenoberfläche je Becken	$A_{netto,Becken}$	596 [m <sup>2</sup> ]
Netto-Beckenoberfläche gesamt	$A_{netto,ges}$	596 [m <sup>2</sup> ]
Netto-Beckenvolumen je Becken	$V_{netto,Becken}$	2.705 [m <sup>3</sup> ]
Netto-Beckenvolumen gesamt	$V_{netto,ges}$	2.705 [m <sup>3</sup> ]
Hydraulische Aufenthaltszeit bei Regenwetter	t	3,8 [h]

**Tabelle A 58: Berechnung der Schlammengen Ozon, 26.000 E (20.000 E Anschluss)**

		<b>Anschluss</b>
Einwohner	E	20.000 [E]
<b>aerob Stabilisierter Schlamm</b>		
Schlammanfall	Q	50,0 [g/(E·d)]
Fracht TS RS	TS <sub>RS</sub>	1.000 [kg <sub>TS</sub> /d]
Schlammmenge	m <sub>TS</sub>	1,0 [t TS /d]
TS Gehalt aerob stabilisierter Schlamm	TS <sub>RS</sub>	2,50 [%]
<b>Rohschlammmenge</b>	<b>Q<sub>RS</sub></b>	<b>40 [m<sup>3</sup>/d]</b>

**Tabelle A 59: Berechnung der Schlammengen PAK, 26.000 E (20.000 E Anschluss)**

		<b>Anschluss</b>
Einwohner	E	20.000 [E]
<b>aerob Stabilisierter Schlamm</b>		
Schlammanfall	Q	50,0 [g/(E·d)]
Fracht TS RS	TS <sub>RS</sub>	1.000 [kg <sub>TS</sub> /d]
Schlammmenge	m <sub>TS</sub>	1,0 [t TS /d]
TS Gehalt aerob stabilisierter Schlamm	TS <sub>RS</sub>	2,50 [%]
<b>Rohschlammmenge +5% aus PAK</b>	<b>Q<sub>RS</sub></b>	<b>42 [m<sup>3</sup>/d]</b>

## 5. Tabellen zum Energiebedarf 20.000 E (für Ausbaugröße 26.000 E)

**Tabelle A 60: Hebewerk, 20.000 E**

<u>Wassermengen</u>		Min	Max	gewählt
Einwohnerwerte	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,am}$	5.150 [m <sup>3</sup> /d]	5.150 [m <sup>3</sup> /d]	5.150 [m <sup>3</sup> /d]
<u>Zulaufhebewerk</u>				
Wirkungsgrad	$\eta$	0,60 [-]	0,50 [-]	0,55 [-]
Förderhöhe	h	3,00 [m]	3,00 [m]	3,00 [m]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s <sup>2</sup> ]	9,81 [m/s <sup>2</sup> ]	9,81 [m/s <sup>2</sup> ]
Durchfluss	Q	0,06 [m <sup>3</sup> /s]	0,06 [m <sup>3</sup> /s]	0,06 [m <sup>3</sup> /s]
Pumpenleistung	P	2,9 [kW]	3,5 [kW]	3,2 [kW]
Energieverbrauch absolut berechnet	$E_{abs,HW}$	70,2 [kWh/d]	84,2 [kWh/d]	76,5 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,HW}$	13,6 [Wh/m <sup>3</sup> ]	16,4 [Wh/m <sup>3</sup> ]	14,9 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,HW}$	1,28 [kWh/(E·a)]	1,54 [kWh/(E·a)]	1,40 [kWh/(E·a)]

**Tabelle A 61: Rechen, 20.000 E**

<u>Wassermengen</u>		Min	Max	gewählt
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,am}$	5.150 [m <sup>3</sup> /a]	5.150 [m <sup>3</sup> /a]	5.150 [m <sup>3</sup> /a]
<u>Rechen</u>				
spezifischer Energieverbrauch	$e_{spez}$	0,05 [kW/(E·a)]	0,10 [kW/(E·a)]	0,08 [kW/(E·a)]
Einwohner nach CSB	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
Energieverbrauch absolut	$E_{a,R}$	2,7 [kWh/d]	5,5 [kWh/d]	4,1 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,R}$	0,5 [Wh/m <sup>3</sup> ]	1,1 [Wh/m <sup>3</sup> ]	0,8 [Wh/m <sup>3</sup> ]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,R}$	0,05 [Wh/(E·a)]	0,1 [Wh/(E·a)]	0,1 [Wh/(E·a)]

Tabelle A 62: Sandfang, 20.000 E

<u>Wassermengen</u>		Min	Max	gewählt
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	5.150 [m³/d]	5.150 [m³/d]	5.150 [m³/d]
<b>Sandfang</b>				
<b>Gebälse:</b>				
Anzahl Sandfang, mit 2 Kammern	$n_{SF}$	1 [stk]	1 [stk]	1 [stk]
Querschnittsfläche je SF	$A_{SF}$	4 [m²]	4 [m²]	4 [m²]
Länge Sandfang	$l_{SF}$	30 [m]	30 [m]	30 [m]
Volumen je Sandfang	$V_{SF}$	120 [m³]	120 [m³]	120 [m³]
Volumen gesamt	$V_{SF,ges}$	120 [m³]	120 [m³]	120 [m³]
Einblastiefe	$h_E$	2,7 [m]	2,7 [m]	2,7 [m]
Aufenthaltszeit	$t_{SF}$	10,0 [min]	10,0 [min]	10,0 [min]
Luft eintrag nach Stein	$Q_{L,SF}$	0,5 [m³/(m³h)]	1,3 [m³/(m³h)]	0,9 [m³/(m³h)]
Gesamtluftbedarf	$Q_{L,SF,ges}$	60,0 [m³/h]	156,0 [m³/h]	108,0 [m³/h]
Rohrleitungsverluste angenommen	$\xi$	0,3 [m WS]	0,3 [m WS]	0,3 [m WS]
Wirkungsgrad	$\eta_{SF}$	62 [%]	55 [%]	60 [%]
mittlere Gebläseleistung	$P_{Gebi}$	0,7 [kW]	2,1 [kW]	1,3 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFG}$	17,1 [kWh/d]	50,1 [kWh/d]	31,8 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFG}$	3,3 [Wh/m³]	9,7 [Wh/m³]	6,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFG}$	0,31 [kWh/(E·a)]	0,91 [kWh/(E·a)]	0,58 [kWh/(E·a)]
<b>Räumer:</b>				
Anzahl der Räumer	$n_{Räumer}$	1,00 [stk]	1,00 [stk]	1,00 [stk]
Laufzeit	$t_{SFR}$	1,00 [h/d]	1,00 [h/d]	1,00 [h/d]
Leistung Räumer	$P_{SFR}$	0,30 [kW]	1,00 [kW]	0,80 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFR}$	0,3 [kWh/d]	1,0 [kWh/d]	0,8 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFR}$	0,06 [Wh/m³]	0,19 [Wh/m³]	0,16 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFR}$	0,01 [kWh/(E·a)]	0,02 [kWh/(E·a)]	0,01 [kWh/(E·a)]
<b>Sandentnahmepumpe</b>				
Laufzeit	$t_{SFP}$	1,00 [h/d]	1,00 [h/d]	1,00 [h/d]
Leistung Pumpe	$P_{SFP}$	4,00 [kW]	4,00 [kW]	4,00 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFP}$	4,0 [kWh/d]	4,0 [kWh/d]	4,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFP}$	0,8 [Wh/m³]	0,8 [Wh/m³]	0,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SFP}$	0,07 [kWh/(E·a)]	0,07 [kWh/(E·a)]	0,07 [kWh/(E·a)]
<b>Sandgutwäscher</b>				
Laufzeit	$t_{SFW}$	1,00 [h/d]	1,00 [h/d]	1,00 [h/d]
Leistung wäscher	$P_{SFW}$	10,00 [kW]	10,00 [kW]	10,00 [kW]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SFW}$	10,0 [kWh/d]	10,0 [kWh/d]	10,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	1,9 [Wh/m³]	1,9 [Wh/m³]	1,9 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	0,18 [kWh/(E·a)]	0,18 [kWh/(E·a)]	0,18 [kWh/(E·a)]
<b>Summe Sandfang</b>				
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,SF}$	31,39 [kWh/d]	65,08 [kWh/d]	46,58 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	6,09 [Wh/m³]	12,64 [Wh/m³]	9,0 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,SF}$	0,57 [kWh/(E·a)]	1,19 [kWh/(E·a)]	0,85 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 63: Belebungs, 20.000 E

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
Jahreswassermenge Mischwasser	$Q_M$	1.879.750 [m³/a]	1.879.750 [m³/a]	1.879.750 [m³/a]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,AM}$	5.150 [m³/d]	5.150 [m³/d]	5.150 [m³/d]
Volumen Deni	$V_D$	3.237 [m³]	3.237 [m³]	3.237 [m³]
Volumen Nitri	$V_N$	8.330 [m³]	8.330 [m³]	8.330 [m³]
<b>Belüftung</b>				
Einblastiefe BB	$h_{E,BB}$	5,0 [m]	5,0 [m]	5,0 [m]
Grenzflächenfaktor	$\alpha_{BB}$	0,69 [-]	0,69 [-]	0,69 [-]
Luftdichte bei 20°C	$\rho$	1,2 [kg/m³]	1,2 [kg/m³]	1,2 [kg/m³]
Massenprozentanteil O <sub>2</sub> in Luft	$C_{O_2,Luft}$	23,14 [%]	23,14 [%]	23,14 [%]
erforderliche mittlere Sauerstoffzufuhr pro Tag	erf. $\alpha OC_d$	2.124 [kgO <sub>2</sub> /d]	2.124 [kgO <sub>2</sub> /d]	2.124 [kgO <sub>2</sub> /d]
erforderliche mittlere Sauerstoffzufuhr pro Stunde	erf. $\alpha OC_h$	89 [kgO <sub>2</sub> /h]	89 [kgO <sub>2</sub> /h]	89 [kgO <sub>2</sub> /h]
Sauerstoffbedarf für BB in Reinwasser	$OC_R$	3.100 [kgO <sub>2</sub> /d]	3.100 [kgO <sub>2</sub> /d]	3.100 [kgO <sub>2</sub> /d]
spez. Sauerstoffzufuhr	$OC_{L,h}$	21,00 g/Nm³/m	21,00 g/Nm³/m	21,00 g/Nm³/m
Luftbedarf BB pro Tag	$Q_{L,d,BB}$	30.000 [Nm³/d]	30.000 [Nm³/d]	30.000 [Nm³/d]
Gebüsedruck	$\Delta P$	6,00 [mWS]	6,00 [mWS]	6,00 [mWS]
Wirkungsgrad Gebläse	$\eta$	0,55 [%]	0,62 [%]	0,60 [%]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,BB}$	892 [kWh/d]	791 [kWh/d]	817 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,BB}$	173,2 [Wh/m³]	153,6 [Wh/m³]	158,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,BB}$	16,3 [kWh/(E·a)]	14,4 [kWh/(E·a)]	14,9 [kWh/(E·a)]
<b>Rezipumpen</b>				
Rezipverhältnis	R	3,0 [-]	3,0 [-]	3,0 [-]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
zu fördernde Wassermenge	Q	15.450,0 [m³/d]	15.450,0 [m³/d]	15.450,0 [m³/d]
Förderhöhe	h	0,5 [m]	0,5 [m]	0,5 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,80 [-]	0,65 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,8 [m/s²]	9,8 [m/s²]	9,8 [m/s²]
Pumpenleistung	P	1,1 [kW]	1,3 [kW]	1,3 [kW]
Laufzeit	t	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	$E_{abs,RZ}$	26,3 [kWh/d]	16,2 [kWh/d]	15,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RZ}$	10,2 [Wh/m³]	6,3 [Wh/m³]	5,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RZ}$	1,0 [kWh/(E·a)]	0,6 [kWh/(E·a)]	0,5 [kWh/(E·a)]
<b>Rührwerke</b>				
Laufzeit	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Volumen zur Umwälzung Deni	$V_D$	3.237 [m³]	3.237 [m³]	3.237 [m³]
spezifische Energie	$E_{spez}$	1,5 [Wh/m³]	1,5 [Wh/m³]	1,5 [Wh/m³]
Energiebedarf im Becken	$E_{Becken}$	4.855,8 [W]	4.855,8 [W]	4.855,8 [W]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,RW}$	116,54 [kWh/d]	116,54 [kWh/d]	116,54 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RW}$	22,6 [Wh/m³]	22,6 [Wh/m³]	22,6 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RW}$	2,1 [kWh/(E·a)]	2,1 [kWh/(E·a)]	2,1 [kWh/(E·a)]
<b>RLS Pumpwerk</b>				
Rücklaufverhältnis	RV	1,0 [-]	1,0 [-]	1,0 [-]
Gefördernde Wassermenge	Q	5.150 [m³/d]	5.150 [m³/d]	5.150 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	2,0 [stk]	2,0 [stk]	2,0 [stk]
Förderhöhe	h	1,5 [m]	1,5 [m]	1,5 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,75 [-]	0,65 [-]	0,70 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpenleistung	P	1,2 [kW]	1,3 [kW]	1,3 [kW]
Laufzeit	t	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]
Energieverbrauch absolut je Pumpe	$E_{abs,RLS}$	14,0 [kWh/d]	16,2 [kWh/d]	15,0 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RLS}$	5,5 [Wh/m³]	6,3 [Wh/m³]	5,8 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,RLS}$	0,51 [kWh/(E·a)]	0,59 [kWh/(E·a)]	0,55 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 64: Fällmitteldosierung, 20.000 E

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,am}$	5.150 [m³/d]	5.150,0 [m³/d]	5.150,0 [m³/d]
Leistung Dosierpumpen	$P_{DP}$	0,5 [Wh/m³]	0,5 [Wh/m³]	0,5 [Wh/m³]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,F}$	3 [kWh/d]	3 [kWh/d]	3 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,F}$	0,05 [kWh/(E·a)]	0,05 [kWh/(E·a)]	0,05 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 65: Nachklärung, 20.000 E mit Ozonung

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,am}$	5.150 [m³/d]	5.150,0 [m³/d]	5.150,0 [m³/d]
Anzahl Becken	n	1 [stk]	1,0 [stk]	1,0 [stk]
<b>ÜSS Pumpwerk</b>				
Geförderdete Schlammmenge	Q	40 [m³/d]	40,0 [m³/d]	40,0 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	1,0 [stk]	1,0 [stk]	1,0 [stk]
Förderhöhe	h	4,0 [m]	4,0 [m]	4,0 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,8 [-]	0,6 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpeleistung	P	0,0 [kW]	0,0 [kW]	0,0 [kW]
Laufzeit	t	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]
Verbrauch je Pumpe	$E_{abs,ÜSS}$	0,3 [kWh/d]	0,4 [kWh/d]	0,31 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,ÜSS}$	0,1 [Wh/m³]	0,1 [Wh/m³]	0,06 [Wh/m³]
<b>NKB Räumler</b>				
Anzahl Räumler	n	1,0 [stk]	1,0 [stk]	1,0 [stk]
Wirkleistung Räumler	P	0,3 [kW/Becken]	1,0 [kW/Becken]	0,5 [kW/Becken]
Laufzeit Räumler	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Energiebedarf Räumler	$E_{räumer,NKB}$	7 [kWh/d]	24 [kWh/d]	12 [kWh/d]
spez Energieverbrauch	$E_{spez,NKB,R}$	1,4 [Wh/m³]	4,7 [Wh/m³]	2,3 [Wh/m³]
<b>gesamt NKB</b>				
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	1,45 [Wh/m³]	4,73 [Wh/m³]	2,39 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,14 [kWh/(E·a)]	0,44 [kWh/(E·a)]	0,22 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 66: Nachklärung 20.000 E mit PAK

		Min	Max	gewählt
<b>Wassermengen</b>				
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,aM}$	5.150 [m³/d]	5.150,0 [m³/d]	5.150,0 [m³/d]
Anzahl Becken	n	1 [stk]	1,0 [stk]	1,0 [stk]
<b>ÜSS Pumpwerk</b>				
Geförderte Schlammmenge (inkl PAK)	Q	42 [m³/d]	42,0 [m³/d]	42,0 [m³/d]
Anzahl Pumpen	n	1,0 [stk]	1,0 [stk]	1,0 [stk]
Förderhöhe	h	4,0 [m]	4,0 [m]	4,0 [m]
Wirkungsgrad Pumpe	$\eta$	0,8 [-]	0,6 [-]	0,7 [-]
Erdbeschleunigung	g	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]	9,81 [m/s²]
Pumpenleistung	P	0,02 [kW]	0,03 [kW]	0,03 [kW]
Laufzeit	t	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]	12,0 [h/d]
Verbrauch je Pumpe	$E_{abs,ÜSS}$	0,3 [kWh/d]	0,4 [kWh/d]	0,33 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,ÜSS}$	0,1 [Wh/m³]	0,1 [Wh/m³]	0,06 [Wh/m³]
<b>NKB Räumler</b>				
Anzahl Räumler	n	1,0 [stk]	1,0 [stk]	1,0 [stk]
Wirkleistung Räumler	P	0,3 [kW/Becken]	1,0 [kW/Becken]	0,5 [kW/Becken]
Laufzeit Räumler	t	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]	24,0 [h/d]
Energiebedarf Räumler	$E_{räumer,NKB}$	7 [kWh/d]	24 [kWh/d]	12 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB,R}$	1,4 [Wh/m³]	4,7 [Wh/m³]	2,3 [Wh/m³]
<b>gesamt NKB</b>				
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	1,45 [Wh/m³]	4,73 [Wh/m³]	2,39 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,NKB}$	0,14 [kWh/(E·a)]	0,44 [kWh/(E·a)]	0,22 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 67: Ozonung, 20.000 E

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	3.750 [m³/d]	3.750 [m³/d]	3.750 [m³/d]
<b>Ozonung</b>				
Förderhöhe	h	0,0 [m]	10,0 [m]	5,0 [m]
Energie Hebewerk 70% WG	$E_{HW}$	0,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
Ozonergzeugung	$E_{O_3,Erz}$	8 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	14 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]	10 [kWh/kg O <sub>3</sub> ]
Energiebedarf für Ozonosis 5,0 g/m³	$E_{O_3,7,5}$	40 [Wh/m³]	70 [Wh/m³]	55 [Wh/m³]
Ein und Austrag	$E_{O_3,I/O}$	0,0 [Wh/m³]	20 [Wh/m³]	10,0 [Wh/m³]
katalytische Restozonvernichtung	$E_{O_3,Rest}$	0,0 [Wh/m³]	10,0 [Wh/m³]	0,0 [Wh/m³]
Kühlaggregat	$E_{O_3,Kühlung}$	10,0 [Wh/m³]	50,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
Nachbehandlung Sandfilter	$E_{SF}$	22,4 [Wh/m³]	22,4 [Wh/m³]	22,40 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ozon}$	72,40 [Wh/m³]	212,40 [Wh/m³]	127,40 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ozon}$	4,95 [kWh/(E·a)]	14,54 [kWh/(E·a)]	8,72 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 68: Pulveraktivkohle, 20.000 E

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
täglicher Trockenwetterabfluss im Jahresmittel	$Q_{T,d,aM}$	3.750 [m³/d]	3.750 [m³/d]	3.750 [m³/d]
<b>nachgeschaltet, Pulveraktivkohle, Sandfilter</b>				
Förderhöhe	h	0,0 [m]	10,0 [m]	5,0 [m]
Energie Hebewerk 70% WG	$E_{HW}$	0,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
PAK Zugabe, Rühren, Rezirkulieren	$E_{HW}$	10,0 [Wh/m³]	40,0 [Wh/m³]	20,0 [Wh/m³]
Nachbehandlung Sandfilter	$E_{SF}$	22,4 [Wh/m³]	22,4 [Wh/m³]	22,4 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,PAK}$	32,40 [kWh/m³]	102,40 [Wh/m³]	62,40 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,PAK}$	2,2 [kWh/(E·a)]	7,0 [kWh/(E·a)]	4,27 [kWh/(E·a)]
zusätzlich in BB rückgeführte Feststoffmenge 5%	$Q_{PAK}$	2,0 [m³/d]	2,0 [m³/d]	2,0 [m³/d]

Tabelle A 69: Infrastruktur, 20.000 E

		Min	Max	gewählt
<b>Infrastruktur</b>				
Einwohner	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
täglicher Mischwasserabfluss im Jahresmittel	$Q_{M,d,am}$	5.150 [m³/d]	5.150 [m³/d]	5.150 [m³/d]
<b>Betriebsgebäude</b>				
Licht, Labor Werkstatt	$E_a$	50 [kWh/d]	50 [kWh/d]	50 [kWh/d]
Licht, Labor Werkstatt	$E_{spez}$	0,18 [kWh/E·a]	0,18 [kWh/E·a]	0,18 [kWh/E·a]
<b>Betriebsmittel</b>				
Brauchwasser	$E_a$	70 [kWh/d]	70 [kWh/d]	70 [kWh/d]
Brauchwasser	$E_{spez}$	0,26 [kWh/E·a]	0,26 [kWh/E·a]	0,26 [kWh/E·a]
Druckluft	$E_a$	13 [kWh/d]	13 [kWh/d]	13 [kWh/d]
Druckluft	$E_{spez}$	0,05 [kWh/E·a]	0,05 [kWh/E·a]	0,05 [kWh/E·a]
Heizung	$E_a$	100 [kWh/d]	100 [kWh/d]	100 [kWh/d]
Heizung	$E_{spez}$	0,37 [kWh/E·a]	0,37 [kWh/E·a]	0,37 [kWh/E·a]
<b>Lüftungsanlagen</b>				
	$E_a$	40 [kWh/d]	40 [kWh/d]	40 [kWh/d]
	$E_{spez}$	0,15 [kWh/E·a]	0,15 [kWh/E·a]	0,15 [kWh/E·a]
<b>Abluftreinigung</b>				
	$E_a$	160 [kWh/d]	160 [kWh/d]	160 [kWh/d]
	$E_{spez}$	0,58 [kWh/E·a]	0,58 [kWh/E·a]	0,58 [kWh/E·a]
Energieverbrauch absolut	$E_a$	433 [kWh/d]	433 [kWh/d]	433 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_a$	1,69 [Wh/m³]	16,92 [Wh/m³]	16,92 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez}$	1,6 [kWh/E·a]	1,6 [kWh/E·a]	1,6 [kWh/E·a]

Tabelle A 70: Entwässerung, 20.000 E mit Ozonung

		Min	Max	gewählt
Einwohner	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
Schlammmenge	$Q_{FS}$	40 [m³/d]	40 [m³/d]	40 [m³/d]
<b>Hochleistungszentrifuge</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	$E_{spez,Ent}$	1,3 [kWh/m³]	1,8 [kWh/m³]	1,5 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,Ent}$	52 [kWh/d]	72 [kWh/d]	60 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ent}$	10,1 [Wh/m³]	14,0 [Wh/m³]	11,7 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ent}$	0,9 [kWh/(E·a)]	1,3 [kWh/(E·a)]	1,1 [kWh/(E·a)]

Tabelle A 71: Entwässerung, 20.000 E mit PAK

		MIN	Max	gewählt
Einwohner	E	20.000 [E]	20.000 [E]	20.000 [E]
Schlammmenge	$Q_{FS}$	42 [m³/d]	42 [m³/d]	42 [m³/d]
<b>Hochleistungszentrifuge</b>				
Energieverbrauch spezifisch (Schlamm)	$E_{spez,Ent}$	1,3 [kWh/m³]	1,8 [kWh/m³]	1,5 [kWh/m³]
Energieverbrauch absolut	$E_{abs,Ent}$	55 [kWh/d]	76 [kWh/d]	63 [kWh/d]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ent}$	10,6 [Wh/m³]	14,7 [Wh/m³]	12,2 [Wh/m³]
Energieverbrauch spezifisch	$E_{spez,Ent}$	1,0 [kWh/(E·a)]	1,4 [kWh/(E·a)]	1,1 [kWh/(E·a)]