

Leitfaden "Energie in ARA" Elimination Mikroverunreinigungen

Kapitel "Energieeffizienz in MV-Anlagen"



Mit Unterstützung von

Winterthur, 17.01.2018

Auftraggeber:

InfraWatt
Ernst A. Müller
Kirchhofplatz 12
8200 Schaffhausen
www.infrawatt.ch, E-Mail: info@infrawatt.ch

Autoren:

Hunziker Betatech AG
Andreas Büeler, Ruedi Moser
Pflanzschulstrasse 17
8400 Winterthur
Tel. 052 234 50 50, E-Mail: info@hunziker-betatech.ch

VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen"
Pascal Wunderlin
Überlandstrasse 133
8600 Dübendorf
Tel. 058 765 50 37, E-Mail: info@micropoll.ch

Ryser Ingenieure AG
Andreas Hurni, Beat Kobel
Engestrasse 9
3012 Bern

Mit Unterstützung von:

EnergieSchweiz
Bundesamt für Energie BFE
3003 Bern
www.energieschweiz.ch
www.bfe.admin.ch

EnergieSchweiz:	Herr Christoph Blaser, Leiter Aus- und Weiterbildung
BFE-Projektleiterin:	Frau Denise Wiedmaier
BFE-Vertragsnummer:	SI/402254-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen	4
2.1	Übersicht	4
2.2	Ozonung	5
2.3	Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK)	6
2.4	Verfahren mit granulierter Aktivkohle (GAK)	7
2.5	Verfahrenskombinationen	7
3	Energieverbrauch in MV-Anlagen	8
3.1	Energieverbrauch von Ozonanlagen	10
3.2	Energieverbrauch von PAK-Verfahren	11
3.3	Energieverbrauch von GAK-Verfahren	11
3.4	Energieverbrauch von Verfahrenskombinationen	12
4	Energieeffizienz bei Planung / Erstellung	13
5	Energieeffizienz im Betrieb	15
6	Checkliste für Planung und Betrieb	17
7	Ausblick	18
8	Grundlagen	19

1 Einleitung

Am 1. Januar 2016 trat die neue Gesetzgebung bezüglich organischer Spurenstoffe in Kraft (Gewässerschutzgesetz und Gewässerschutzverordnung). Organische Spurenstoffe, auch Mikroverunreinigungen (MV) genannt, sind Stoffe, welche in tiefer Konzentration (ng/l bis µg/l) im Wasser vorkommen und nachteilige Auswirkungen auf Organismen haben können. Sie können natürlichen Ursprungs sein (z. B. Hormone) oder aus synthetischer Herstellung stammen (z. B. Medikamentenwirkstoffe, Arzneimittel, Pflanzenschutzmittel, Nahrungsmittelzusätze, Inhaltsstoffe von Reinigungsmitteln, Kosmetika oder Materialschutzmittel etc.).

Die Mikroverunreinigungen werden über unterschiedliche Wege in die Gewässer eingetragen; zu einem grossen Teil über gereinigtes kommunales Abwasser. Sie werden zwar in der biologischen Stufe der Abwasserreinigungsanlagen (ARA) teilweise entfernt, die Eliminationsleistung mit biologischen Verfahren ist insgesamt aber ungenügend. Durch eine weitergehende bzw. zusätzliche Reinigungsstufe soll der Eintrag von Mikroverunreinigungen aus ARA in die Gewässer verringert werden. Die revidierte Gewässerschutzverordnung listet die Kriterien auf, gemäss denen Schweizer ARA zu dieser zusätzlichen Reinigungsstufe verpflichtet werden. Zusammengefasst werden demnach gezielt die grössten ARA, grosse ARA im Einzugsgebiet von Seen sowie ARA an belasteten Gewässern eine MV-Stufe bauen müssen.

Mit dem revidierten Gewässerschutzgesetz wurde eine gesamtschweizerische Spezialfinanzierung geschaffen. Diese wird über eine neue Abwasserabgabe gespiesen. Die Höhe der Abgabe pro ARA bemisst sich anhand der angeschlossenen Einwohner und beträgt maximal 9 CHF pro Einwohner und Jahr. Der Bund gewährt aus dieser Finanzierung Abgeltungen von 75% an die Erstellung und Beschaffung von Anlagen und Einrichtungen zur Elimination von MV in ARA. Die Abgeltungen werden gewährt, wenn mit der baulichen Umsetzung spätestens 2035 begonnen wurde.

Die für die Elimination von MV zur Anwendung kommenden Verfahren werden den Energieaufwand für den Betrieb der Kläranlagen erheblich erhöhen. Es wird geschätzt, dass der **Energieverbrauch um 5 bis 30% steigt** (ohne Filter). Der zusätzliche Energieverbrauch kann aber in Abhängigkeit der Anlagengrösse, der Abwasserqualität und des gewählten Verfahrens auch höher sein. Insgesamt wird für die neue Reinigungsstufe mit einem zusätzlichen Stromverbrauch auf den ARA in der Schweiz von einem Achtel gerechnet [11]. Dementsprechend gross ist das Potenzial, mittels systematischer Massnahmen zur Energieoptimierung in Planung und Betrieb die Energieeffizienz der MV-Anlagen zu verbessern.

Die nachzurüstenden Kläranlagen müssen für MV einen Reinigungseffekt von 80%, bezogen auf Rohabwasser, erfüllen. Der Reinigungseffekt wird anhand von zwölf Leitsubstanzen überprüft, welche in der Verordnung 814.201.231 des UVEK festgelegt sind. Es werden dabei ausschliesslich organische Spurenstoffe gemessen, die üblicherweise verbreitet im biologisch gereinigten Abwasser vorkommen. Als mögliche Verfahren zur Elimination von MV stehen derzeit die Adsorption an Aktivkohle oder die Oxidation durch Ozonung im Vordergrund. Mit diesen Verfahren lässt sich eine grosse Bandbreite von Stoffen aus dem Abwasser entfernen und die Wasserqualität signifikant verbessern. Mit beiden Verfahren lässt sich das gesetzlich vorgeschriebene Reinigungsziel grundsätzlich erreichen, das am besten geeignete Verfahren ist aber jeweils im Einzelfall abzuklären.

Im Folgenden werden die gebräuchlichen Verfahren zur Elimination von MV und deren Energiebedarf beschrieben. Daraus abgeleitet werden Effizienzmassnahmen zur Energieeinsparung in Planung und Betrieb einer MV-Stufe aufgezeigt.

Das hier vorliegende Kapitel "Energieeffizienz in MV-Anlagen" soll im Leitfaden "Energie in ARA" [1] die bisher fehlende MV-Stufe abdecken. Der Leitfaden hilft den Kläranlagen-Betreibern und Planern dabei, den Energieverbrauch von Kläranlagen generell zu senken und systematisch zu optimieren. Das Ziel dieses ergänzenden Kapitels ist es, den Betreibern und Planern spezifisch für die MV-Stufe die praxiserprobten Arbeitsinstrumente und die neusten Entwicklungen zur systematischen Energieoptimierung zugänglich zu machen.

2 Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen

2.1 Übersicht

Geeignete Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser müssen eine Breitbandwirkung aufweisen. Das heisst, eine möglichst breite Palette problematischer Spurenstoffe muss weitgehend entfernt werden. Zudem müssen die Verfahren technisch machbar und wirtschaftlich tragbar sein. Diese Anforderungen erfüllen nach aktuellem Stand der Technik oxidative Verfahren (Ozonung) und adsorptive Verfahren (Aktivkohle). Die jeweiligen Verfahren benötigen die Bereitstellung von Betriebsmitteln, einen Kontaktreaktor sowie in der Regel eine Nachbehandlung.

Die Ozonung kann als eigenständiges Verfahren realisiert werden, oder in Kombination mit einer nachgeschalteten Aktivkohle-Stufe. Die Aktivkohle-Anwendung ist in unterschiedlichen Verfahrensvarianten möglich. Alle Verfahren haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile, das heisst es gibt kein Verfahren, welches in allen Fällen zu bevorzugen ist. Eine Übersicht über die Verfahrensvarianten ist in Tabelle 1 aufgeführt. Ein detaillierter Beschrieb der nach heutigem Stand der Technik (2017) wichtigsten Verfahren ist in den folgenden Kapiteln gegeben.

Tabelle 1: Wichtigste Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen nach Stand der Technik (Übersicht)

Wirkprinzip	Name des Verfahrens	MV-Betriebsmittel	MV-Reaktionsstufe (Hauptstufe)	MV-Nachbehandlung	Besonderheiten / sinnvolle Anwendungsfälle
Oxidation mit Ozon (O₃)	Ozonung	- Flüssigsauerstoff (LOX) oder Druckluft (für VPSA-, PSA- oder Luftanlage)	- Ozonreaktor	Biolog. Nachbehandlung: - Sandfilter - (Wirbelbett)	- Für rein kommunal geprägte Abwässer gut geeignet - Abklärung Verfahrenseignung zwingend [4]
Adsorption an Pulveraktivkohle (PAK)	PAK mit Sedimentation und Filtration ("Ulmer Verfahren")	- PAK, - Fällmittel, - Flockungshilfsmittel (FMH)	- PAK-Kontaktreaktor - Sedimentationsstufe	Polzeifilter: - Sandfilter - Tuchfilter	- Rückführung PAK in Belebungsbecken prüfen/empfohlen - grosser Platzbedarf
	PAK mit Lamellenklärer und Filtration (Kompaktverfahren)	- PAK - Fällmittel - FHM - Mikrosand	- PAK-Kontaktreaktor - Sedimentation (Lamellenklärer)	Polzeifilter: - Tuchfilter - Sandfilter	- Evtl. Rückführung PAK in Belebungsbecken - Diverse patentierte Verfahren verfügbar
	PAK-Dosierung vor den Sandfilter	- PAK - Fällmittel - (evtl. FHM)	- Flockungsreaktor (und Sandfilter)	Abtrennung PAK durch: - Sandfilter	- Rückführung PAK in Belebungsbecken prüfen/empfohlen
	PAK-Direktdosierung in die Biologie	- PAK - Fällmittel - evtl. FHM	- Belebungsbecken	Polzeifilter: - Sandfilter - Tuchfilter	- Höhere Dosierung als bei nachgeschalteten Verfahren notwendig - Bei beengten Platzverhältnissen interessant
	PAK mit Membranfiltration (Dosierung in MBR)	- PAK	- Belebungsbecken	Abtrennung PAK durch: - Membrane	- Bei sehr beengten Platzverhältnissen - Bei bereits bestehendem MBR interessant
Adsorption an granulierten Aktivkohle (GAK)	Granulierte Aktivkohle (GAK)	- GAK als Festbettfilter oder - Feine GAK im Wirbelbett	- GAK-Filter	Keine notwendig (evtl. Filter bei Wirbelbett)	- GAK regenerierbar - Einfacher Betrieb
Verfahrenskombination: Oxidation und Adsorption (komplementär)	Ozonung + PAK	- Flüssigsauerstoff oder Druckluft - PAK - Fällmittel & FHM	- Ozonreaktor - PAK-Reaktor (div. Varianten, siehe oben)	Bioaktive Stufe & Abtrennung PAK durch: - Sandfilter	- Rückführung PAK in Belebungsbecken prüfen/empfohlen
	Ozonung + GAK	- LOX / Druckluft - GAK	- Ozonreaktor - GAK-Filter	Bioaktive Stufe: - GAK-Filter	- GAK regenerierbar

2.2 Ozonung

Ozon (O_3) ist ein sehr reaktives Gas, welches mit den Wasserinhaltsstoffen reagiert und auch biologisch schwer abbaubare Verbindungen angreift. Die organischen Spurenstoffe werden oxidiert, das heisst in Transformationsprodukte umgewandelt, und verlieren dadurch ihre Wirkung. Zudem entstehen biologisch gut abbaubare Verbindungen, die in der Nachbehandlung wieder effizient eliminiert werden. Am besten ist für diese Nachbehandlung nach aktuellem Stand der Technik eine biologisch aktive Raumfiltration (z. B. Sandfilter) geeignet. Die Eliminationseffizienz der Spurenstoffe ist von der spezifischen Ozondosis abhängig.

Ozon reagiert nicht nur mit den organischen Spurenstoffen, sondern auch sehr unspezifisch mit anderen Abwasserinhaltsstoffen, wie beispielsweise DOC (gelöste organische Stoffe) und Nitrit.

Durch die Reaktion von Ozon mit weiteren Abwasserinhaltsstoffen (z. B. Bromid) können problematische Oxidationsnebenprodukte gebildet werden, wie beispielsweise Bromat oder Nitrosamine. Einige dieser Stoffe werden durch die Nachbehandlung wieder teilweise abgebaut, andere nicht (z. B. Bromat). Aus diesem Grund ist es wichtig, diese problematischen Abwässer frühzeitig (vor dem Variantenentscheid) zu identifizieren und von einer Ozonbehandlung auszuschliessen. Das detaillierte Vorgehen dazu ist in der VSA-Empfehlung "Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung" [4] beschrieben.

Ozon wird in einem Ozonerzeuger aus Sauerstoff (O_2) und elektrischer Energie hergestellt. Das Ozon muss bedarfsgerecht vor Ort hergestellt werden, da es instabil ist und somit nicht gelagert werden kann. Der benötigte Sauerstoff kann über folgende Wege bereitgestellt werden:

- Als Flüssigsauerstoff (Liquid Oxygen, LOX), von extern angeliefert und in einem Tank gespeichert,
- Mittels Sauerstoffanreicherung vor Ort per Vakuum-Druckwechseladsorption (Vacuum-Pressure Swing Adsorption, VPSA) oder Druckwechseladsorption (Pressure Swing Adsorption, PSA),
- Verwendung des Sauerstoffes in getrockneter, öl- und fettfreier Druckluft ohne Anreicherung.

Das gasförmige Ozon wird in einer Gewichtskonzentration von bis zu rund 12% zusammen mit dem Trägergas (Sauerstoff oder Luft) in das Abwasser eingetragen. Der Ozoneintrag kann mittels Diffusoren oder mit einem System aus Pumpe und Injektor erfolgen. Beim System mit Pumpe und Injektor erfolgt der Ozoneintrag üblicherweise zuerst in einem Abwasserteilstrom, der anschliessend mit dem Hauptstrom vermischt wird. Es ist zusätzlich Energie zum Betrieb der Pumpe erforderlich, weshalb aus energetischer Sicht ein Eintragungssystem mit Diffusoren vorzuziehen ist.

Wegen des Druckverlusts im Sandfilter ist meist ein Hebewerk nötig, das abermals Strom braucht.

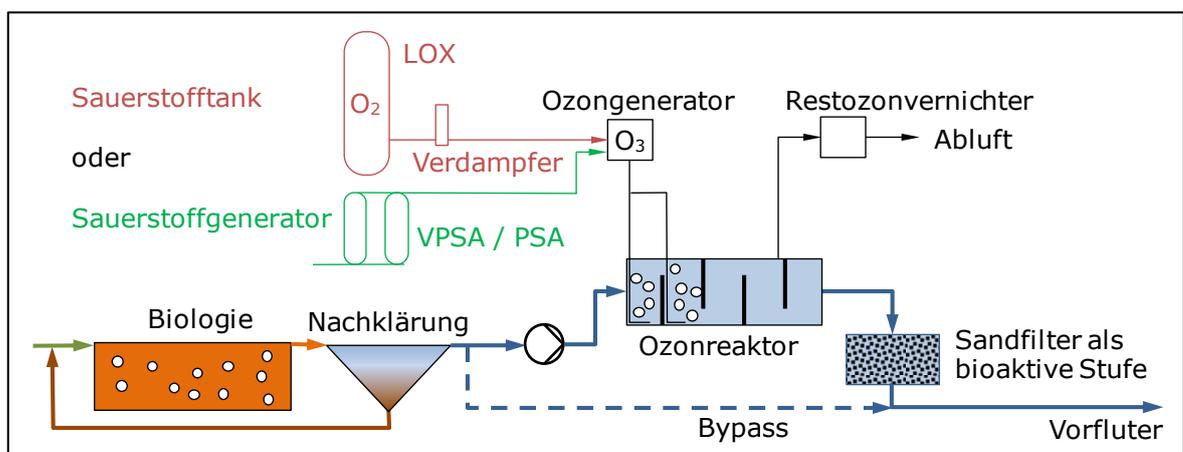


Abbildung 1: Fließschema für eine Ozonung mit Sandfiltration; Sauerstoffbereitstellung als LOX oder mittels VPSA-Anlage

2.3 Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK)

Aktivkohle kann aus verschiedenen Rohstoffen, wie Steinkohle, Braunkohle oder Torf, aber auch aus nachwachsenden Ressourcen wie Holz oder Kokosnussschalen, hergestellt und in unterschiedlichen Formen eingesetzt werden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Pulveraktivkohle (PAK); ein fein gemahlenes, pulverförmiges Produkt mit einer Korngrösse von einigen μm und einer extrem hohen inneren Oberfläche. Im Kontakt des Abwassers mit der PAK werden die MV an die Aktivkohle adsorbiert. Aufgrund der porösen Struktur sowie der grossen spezifischen Oberfläche ist die MV-Eliminationsleistung der PAK sehr gross. Mit der nachfolgenden Abtrennung der PAK aus dem Abwasser werden auch die adsorbierten MV effizient aus dem System entfernt. Um dies am besten zu erreichen und um eine zusätzliche Belastung der Umwelt zu vermeiden, muss der PAK-Schlupf minimal gehalten werden.

Die Eliminationsleistung einer spezifischen Kohle hängt sehr stark vom Rohstoff, dem Aktivierungsprozess sowie der Korngrössenverteilung ab. Die Eliminationsleistung eines Aktivkohleverfahrens verbessert sich generell bei einer höheren Dosiermenge ($\text{g PAK}/\text{m}^3$) und längerer Kontaktzeit, da die Adsorptionsprozesse relativ langsam ablaufen. Zur besseren Ausnützung der Adsorptionskapazität kann die PAK zudem in die biologische Stufe zurückgeführt werden. Dort wird sie mit dem Belebtschlamm vermischt, gelangt in die Schlammbehandlung und wird verbrannt.

Das am besten geeignete PAK-Produkt muss im Rahmen von Voruntersuchungen (mittels Schüttelversuchen) ermittelt werden, da die Abwässer sehr unterschiedlich zusammengesetzt sind. Zudem ist zu bedenken, dass die organische Hintergrundmatrix mit den MV um die freien Bindungsstellen auf der PAK konkurriert. Bei erhöhten DOC-Konzentrationen steigt daher der PAK-Verbrauch entsprechend an. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wird dadurch entscheidend beeinflusst bzw. verschlechtert.

PAK kann auf verschiedene Arten eingesetzt werden. Das "klassische" Verfahren (auch bekannt unter dem Namen "Ulmer-Verfahren") ist der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet und besteht aus einem Kontaktreaktor, einer Sedimentation und einer Filtration. Der Flächenbedarf ist bei diesem Verfahren relativ hoch. Eine Reduktion der Sedimentationsfläche ist mittels Lammellenklärer möglich. Alternativ kann die PAK direkt in die Flockungsreaktoren und somit vor den Sandfilter, oder direkt in die biologische Reinigungsstufe dosiert werden. Bei allen genannten Verfahrensvarianten ist eine möglichst vollständige Abtrennung der PAK vom behandelten Abwasser notwendig, das heisst der Aktivkohle-Schlupf muss auf ein Minimum reduziert werden.

Wegen des Druckverlusts im Sandfilter ist meist ein zusätzliches Hebewerk nötig.

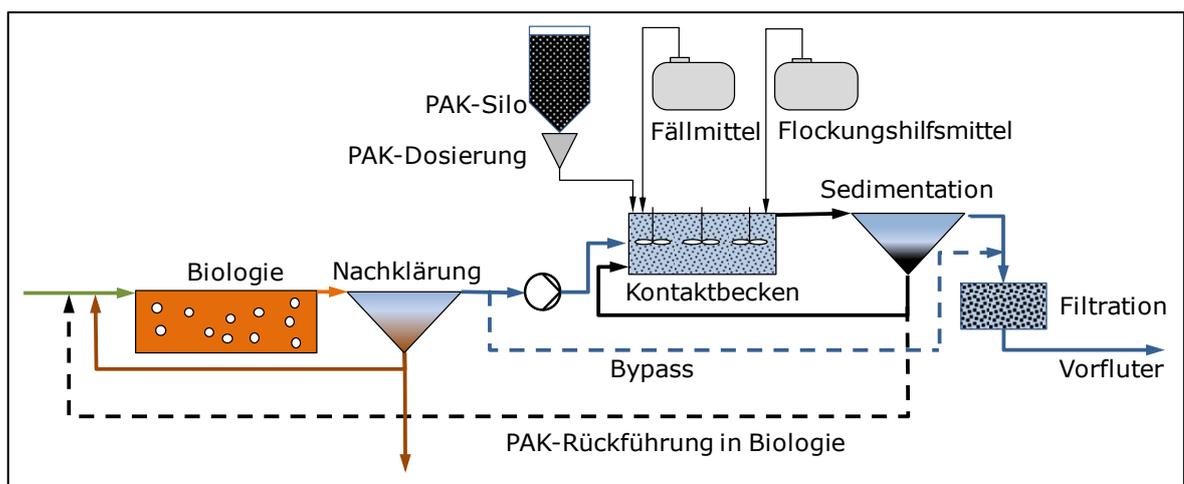


Abbildung 2: Fließschema für ein "klassisches" nachgeschaltetes Pulveraktivkohle-Verfahren mit Sedimentation und Filtration ("Ulmer Verfahren")

2.4 Verfahren mit granulierter Aktivkohle (GAK)

Im Gegensatz zur Pulveraktivkohle besitzt die granulierte Aktivkohle (GAK) eine gröbere Körnung. Die Korngrösse ist im Millimeterbereich. Der Wirkmechanismus ist aber ebenfalls die Adsorption. Bei GAK-Verfahren findet die Adsorption an die granulierte Aktivkohle in einem Raumfilter statt, der vom Abwasser durchströmt wird. Der DOC, im Vergleich zu den Spurenstoffen in weit höheren Konzentrationen vorliegend, konkurriert mit den Spurenstoffen um die freien Adsorptionsplätze auf der GAK. Dies reduziert die Standzeiten. Aufgrund der zunehmenden Beladung muss die Aktivkohle periodisch ausgewechselt bzw. regeneriert werden. Im Laufe des Betriebs kann sich auf der Oberfläche der Aktivkohle ein Biofilm entwickeln, der einen zusätzlichen Effekt auf die Spurenstoffelimination haben kann [7]. Zur Eliminationsleistung von GAK gelten grundsätzlich dieselben Aussagen wie für PAK-Verfahren: Eine genügend lange Kontaktzeit ist der entscheidende Betriebsparameter. Derzeit bestehen aber noch einige Unsicherheiten bei der Auslegung von GAK-Verfahren (notwendige Kontaktzeit, erreichbare Standzeiten). Auch für GAK-Verfahren ist meist ein zusätzliches Hebewerk nötig.

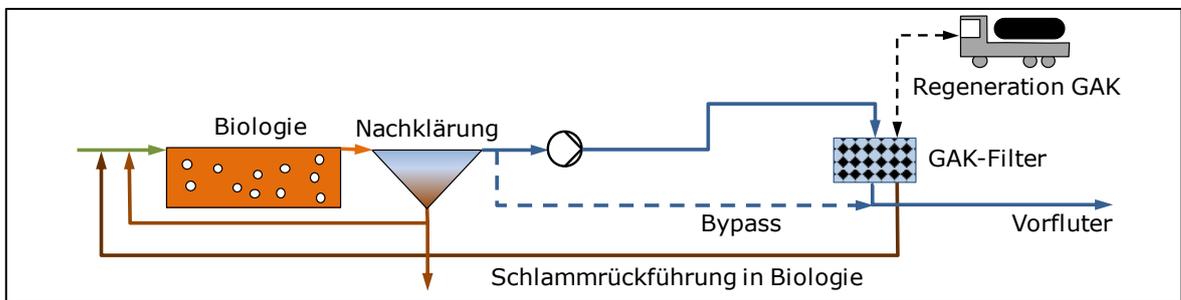


Abbildung 3: Fließschema für ein Verfahren mit granulierter Aktivkohle

2.5 Verfahrenskombinationen

Verfahrenskombinationen nutzen die komplementären Wirkmechanismen Oxidation (Ozonung) und Adsorption (PAK oder GAK). Aktuell wird davon ausgegangen, dass bei einer Verfahrenskombination aufgrund dieser komplementären Wirkung ein grösseres Spektrum an organischen Spurenstoffen eliminiert werden kann. Dabei geht es darum, die Vorteile einer Ozonung (Oxidation) mit den Vorteilen von Aktivkohleverfahren (Adsorption) zu kombinieren, ohne dass die Nachteile (z. B. übermässige Bildung von Oxidationsnebenprodukten, PAK-Verluste, kurze Standzeiten) überwiegen [6]. Zu diesen Aspekten kann gegenwärtig aber noch keine abschliessende Aussage gemacht werden, Projekte dazu sind am Laufen. Es gilt aber zu beachten, dass bei einer Verfahrenskombination die kritischen Aspekte einer alleinigen Ozonbehandlung nicht automatisch beseitigt sind. Es müssen daher auch bei einer Verfahrenskombination die relevanten Randbedingungen rechtzeitig abgeklärt und in die Planung sowie in den Betrieb mit einbezogen werden ([4]; siehe auch Kapitel 2.2).

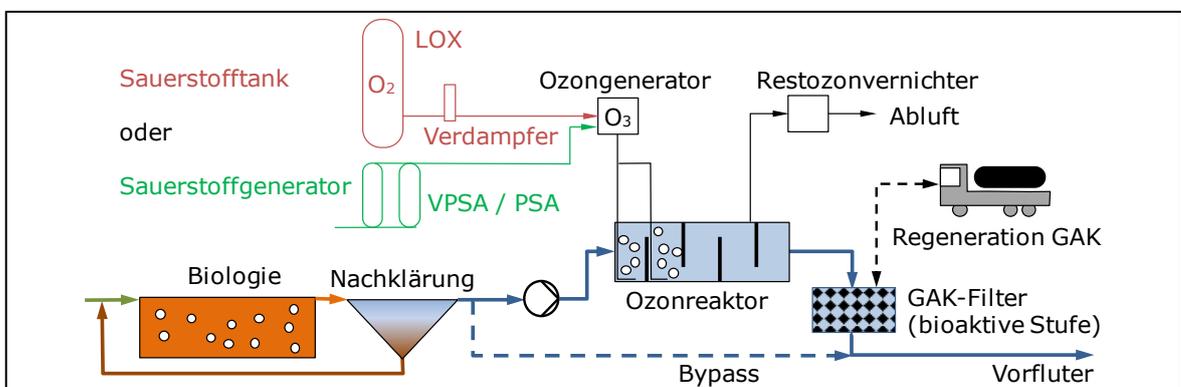


Abbildung 4: Fließschema für eine Verfahrenskombination Ozonung und granulierte Aktivkohle

3 Energieverbrauch in MV-Anlagen

Die Verfahrensstufen der MV-Anlagen sind Untersysteme der Abwasserreinigung. Die Abgrenzung der MV-Anlage vom Rest der ARA erfolgt gemäss der VSA-Empfehlung "Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA" [5]. Die Abbildung 5 zeigt, innerhalb welcher Systemgrenzen die Prozesse der MV-Stufe mit relevanten Energieverbräuchen anzuordnen sind.

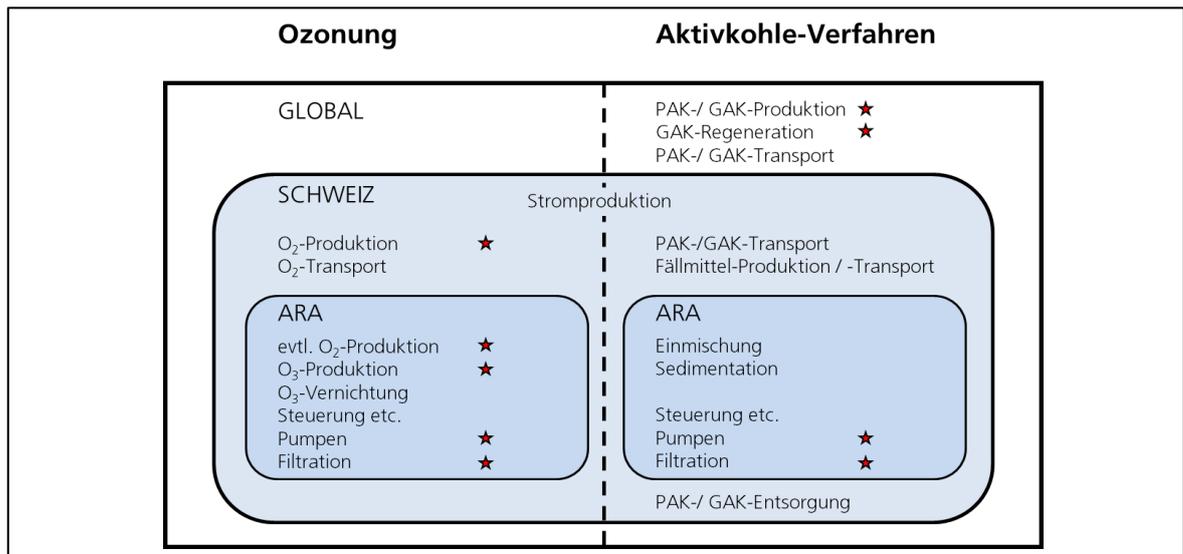


Abbildung 5: Systemgrenzen und Energieverbräucher der MV-Stufe (★ : wichtigste Verbraucher) [9, angepasst]

Sowohl die Ozonung als auch die Anwendung von Aktivkohle benötigt zusätzliche Energie, wobei sich die Art der Energie unterscheidet. Bei der Ozonung wird die Energie in Form von Strom benötigt, während sie bei der Aktivkohle vor allem in Form von Kohle und Wärme verbraucht wird. Um die verschiedenen Energieformen miteinander vergleichen zu können, wird mittels Primärenergiefaktoren der Primärenergieverbrauch abgeschätzt. Im Primärenergieverbrauch ist der gesamte Energieverbrauch für die Herstellung, den Betrieb sowie die Entsorgung enthalten.

Auf der Ebene einer einzelnen ARA führt die Ozonung zu einer stärkeren Erhöhung des Stromverbrauchs als Aktivkohleverfahren. Unter Berücksichtigung der Herstellung aller Betriebsmittel liegt aber der Primärenergieverbrauch der Aktivkohleverfahren etwas höher. In Tabelle 2 ist der durchschnittliche Energieverbrauch der beiden Verfahren für eine vergleichbare Reinigungsleistung aufgelistet [7], [8]. Mit zunehmenden Betriebserfahrungen müssen diese Zahlen künftig allenfalls korrigiert werden.

Tabelle 2: Strom- und Primärenergieverbrauch für Ozonung / PAK-Verfahren (ohne Nachbehandlung) [7]

Parameter	Einheit	Ozonung	PAK-Verfahren
Dosis für vergleichbare Reinigungsleistung	[g/m ³]	5	12
Stromverbrauch für MV-Stufe auf ARA (ohne Sauerstoff-Produktion)			
- Pro m ³ Abwasser	[kWh/m ³]	0.06	0.02
- Pro Einwohnerwert und Jahr	[kWh/EW/a]	8	2.5
Primärenergieverbrauch für MV-Stufe (Annahme: PAK aus Steinkohle frisch, siehe Kapitel 3.2, [16])			
- Pro m ³ Abwasser	[kWh/m ³]	0.28	0.37
- Pro Einwohnerwert und Jahr	[kWh/EW/a]	34	46

Tabelle 3 zeigt die abgeschätzten Auswirkungen der zusätzlichen Reinigungsstufe auf den Energieverbrauch der Schweiz anhand von drei Szenarien. Bei Szenario 1 würden alle betroffenen ARA mit einer Ozonung ausgerüstet, bei Szenario 2 alle mit einem PAK-Verfahren und bei Szenario 3 je eine Hälfte der ARA mit einer Ozonung und die andere Hälfte mit einem PAK-Verfahren. Annahmen: Die Sauerstoffproduktion erfolgt zentral in der Schweiz, die Aktivkohle wird im Ausland hergestellt und nach Gebrauch zusammen mit dem Klärschlamm thermisch verwertet [8].

Tabelle 3: Zusätzlicher (Primär-)Energieverbrauch für MV-Verfahren auf 100 ARA in der Schweiz [8]

Parameter	Einheit	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Anteil Ozonung (Dosis: 5g O ₃ /m ³)	[%]	100	0	50
Anteil PAK-Verfahren (Dosis: 12g PAK/m ³)	[%]	0	100	50
Stromverbrauch CH exkl. Filter	[GWh/a]	70	15	40
Stromverbrauch CH inkl. Filter	[GWh/a]	90	35	60
Primärenergie exkl. Filter	[GWh/a]	200	280	240
Primärenergie inkl. Filter	[GWh/a]	260	340	300

Die Reinigungsstufen zur Elimination von MV werden in der Schweiz nach dem in Tabelle 3 dargestellten Szenario 3 zu einem Mehrverbrauch von rund 60 GWh/a führen [8]. In diesem Szenario wird bei der Hälfte der auszubauenden Anlagen eine Ozonung realisiert, und bei der anderen Hälfte eine Aktivkohle-Stufe.

Gemäss der Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt "Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA" wird der heutige Stromverbrauch aller Schweizer ARA auf rund 450 GWh/a geschätzt [11]. Die zusätzlichen 60 GWh/a für die MV-Stufen entsprechen somit einem Mehrverbrauch von 13% bzw. gut einem Achtel des heutigen Stromverbrauchs der Kläranlagen in der Schweiz.

Laut derselben Studie wird für alle Schweizer ARA ein Einsparpotenzial an elektrischem Strom von knapp 100 GWh/a abgeschätzt, und ein Potenzial zur Steigerung der Stromproduktion von knapp 110 GWh/a. Insgesamt könnte unter Berücksichtigung des Optimierungspotenzials und der zusätzlichen Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen der Fremdstrombezug aller Schweizer ARA theoretisch um rund 40% gesenkt werden [11]. Es muss also das Ziel sein, den Mehrverbrauch an Strom für die MV-Stufe durch Massnahmen zur Energieoptimierung mindestens zu kompensieren.



Abbildung 6: Ozongenerator



Abbildung 7: PAK-Dosierstation

3.1 Energieverbrauch von Ozonanlagen

Der Betrieb einer Ozonung benötigt zusätzliche elektrische Energie auf der ARA selbst, insbesondere für die Herstellung von Ozon im Ozonerzeuger. Bei Anlieferung des Betriebsmittels Sauerstoffs als Flüssigsauerstoff (LOX) fällt der Energieverbrauch der Sauerstoffproduktion nicht auf der ARA, sondern beim Sauerstoffhersteller an. Falls der Sauerstoff vor Ort hergestellt bzw. angereichert wird, wird auch dafür signifikant Energie verbraucht. Ein Ozongenerator hat eine hohe Anschlussleistung, wodurch allenfalls die Energieversorgung angepasst werden muss und / oder zusätzliche Trafos notwendig werden.

Der Energiebedarf einer Ozonung wird von der Abwasserzusammensetzung (notwendige Dosierung) und den Betriebsbedingungen bestimmt. Die notwendige Dosierung hängt vor allem von der Hintergrundbelastung des zu behandelnden Abwassers ab, insbesondere von den DOC- und NO_2 -Konzentrationen. Um die erforderliche Reinigungsleistung von 80% zu erreichen, werden in der Regel die folgenden spezifischen Ozondosen benötigt:

- f_{DOC} = 0.4 bis 0.8 g O_3 /g DOC (abwasserspezifisch)
- $f_{\text{NO}_2\text{-N}}$ = 3.4 g O_3 /g $\text{NO}_2\text{-N}$ (stöchiometrisch)

Bei bekannten Frachten errechnet sich somit der Ozonbedarf wie folgt:

$$\text{O}_3\text{-Bedarf [kg/h]} = Q [\text{m}^3/\text{h}] * (f_{\text{DOC}} [\text{g O}_3/\text{g DOC}] * c_{\text{DOC}} [\text{g/m}^3] + f_{\text{NO}_2\text{-N}} [\text{g O}_3/\text{g NO}_2\text{-N}] * c_{\text{NO}_2\text{-N}} [\text{g/m}^3]) / 1000$$

Weitere Faktoren, die den Energieverbrauch erhöhen können, sind ein zusätzliches Hebewerk und die nachgeschaltete bioaktive Stufe, sofern eine Filtration nicht sowieso vorhanden ist.

Eine Ozonung erhöht den Energieverbrauch um 0.03 bis 0.1 kWh/m³ [17]. Dazu kommt der Energiebedarf für eine Sandfiltration von ca. 0.01 bis 0.05 kWh/m³. Der Energieverbrauch einer ARA erhöht sich durch eine Ozonung somit insgesamt um ca. 10 bis 30% [7].

Abbildung 8 zeigt für das Beispiel der Pilotanlage in Regensdorf den spezifischen Energieverbrauch für die Ozonproduktion bei konstantem Gasfluss (15 Nm³/h). Die Kurven zeigen den Stromverbrauch des Ozongenerators alleine (O_3 -Produktion), den gesamten Stromverbrauch der Ozonanlage auf der ARA (O_3 ARA) und den Stromverbrauch unter Berücksichtigung der Sauerstoffproduktion (inkl. O_2) [7]. Dies gibt einen Überblick, wie sich die Anteile der wichtigsten Energieverbraucher zusammensetzen. Zudem wird ersichtlich, dass grundsätzlich der spezifische Energieverbrauch stark ansteigen kann, wenn die Anlage nicht in ihrem optimalen Bereich gefahren wird. Es ist zu beachten, dass diese Darstellung nicht allgemein gültig ist, sondern wegen der unterschiedlichen Ausgangslage anlagenspezifisch ermittelt werden muss.

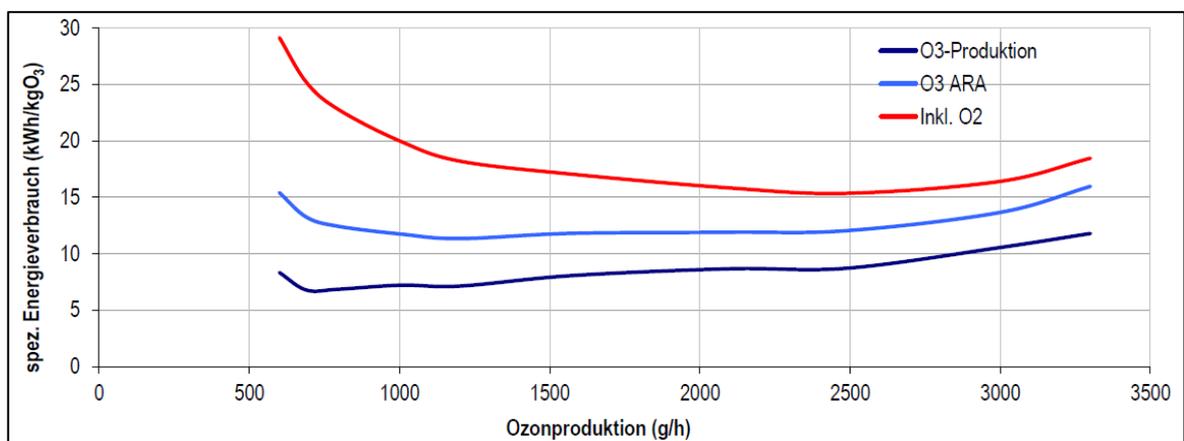


Abbildung 8: Spezifischer Energieverbrauch (Strom) in Abhängigkeit der Ozonproduktion [7]

3.2 Energieverbrauch von PAK-Verfahren

Der Einsatz von PAK führt zu einer geringen Erhöhung des Energieverbrauchs für die ARA im Bereich von 5% [7]. Die wichtigsten Energieverbraucher sind die Rührwerke des Kontaktreaktors sowie die Pumpen für die Rezirkulation. Als weiterer allenfalls relevanter Energieverbraucher ist die PAK-Abtrennung zu berücksichtigen. Wird die PAK beispielsweise mittels Sandfiltration abgetrennt, beträgt der Energiebedarf dafür ca. 0.01 bis 0.05 kWh/m³. Bei einer Direktdosierung in einen Membranbelebungsreaktor (MBR) hingegen wird für die PAK-Abtrennung nur zusätzliche Energie benötigt, wenn infolge der PAK in der Biologie häufiger rückgespült werden muss.

Ausserhalb der ARA wird vor allem für die Herstellung von Aktivkohle Energie benötigt. Die Herstellung von PAK ist sehr energieintensiv. Die Datenlage zur Aktivkohleherstellung ist zwar nach wie vor relativ dünn, einen guten Überblick verschafft aber der 2016 publizierte Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 [16]. Nach Auskunft der Hersteller liegt demnach der Rohstoffbedarf zur Herstellung von 1 kg frischer Aktivkohle je nach Material und Qualität des Produkts bei 3.5 bis 5 kg Steinkohle, 5 bis 6.5 kg Braunkohle und 10 bis 13 kg Kokosnussschalen.

Einen grossen Einfluss auf den Primärenergieverbrauch (und damit auf die CO₂-Emissionen) von Aktivkohle hat die Herkunft des Rohstoffs (fossil oder erneuerbar). Ebenfalls ist entscheidend, wie hoch der Anteil an Reaktivaten ist. Eine Übersicht über den Primärenergieverbrauch und den CO₂-Fussabdruck (in CO₂-Äquivalenten) der Herstellung von Aktivkohle ist in Tabelle 4 dargestellt. Dabei wird differenziert zwischen den Rohstoffen Stein-, Braun-, und Kokosnussschalen, sowie jeweils zwischen Frischkohle und Reaktivat [16]:

Tabelle 4: Primärenergieverbrauch und CO₂-Fussabdruck von Aktivkohle aus unterschiedlichen Rohstoffen [16]

Rohstoff	Aufbereitung	Primärenergieverbrauch (fossil)		CO ₂ -Fussabdruck
		[GJ/t _{Aktivkohle}]	[kWh/kg _{Aktivkohle}]	[kg _{CO2-Äqu.} /kg _{Aktivkohle}]
Steinkohle	Frischkohle	109-124	30-35	11-18
	Reaktivat	17-29	5-8	2-3
Braunkohle	Frischkohle	152-184	42-51	14-18
	Reaktivat	20-37	6-10	2-4
Kokosnussschalen	Frischkohle	28-51	8-14	5-7
	Reaktivat	9-14	2.5-4	1

Der gesamte Schlammanfall einer ARA erhöht sich durch eine PAK-Nachbehandlung rechnerisch um rund 5 bis 10%, bei einer Dosierung direkt in die biologische Stufe um rund 10 bis 30%. Dieser zusätzliche Schlamm muss entsorgt werden. Idealerweise wird der PAK-Schlamm in der bestehenden Schlammbehandlung verarbeitet [7].

Detaillierte Untersuchungen zeigen, dass weder Entwässerbarkeit noch Heizwert des Schlammes durch die PAK signifikant verändert werden. Zudem konnte auch gezeigt werden, dass in der Faulung keine signifikante Rücklösung der adsorbierten Spurenstoffe stattfindet [15].

3.3 Energieverbrauch von GAK-Verfahren

Der Energiebedarf für den Betrieb eines GAK-Filters bewegt sich auf der ARA in einem ähnlichen Rahmen wie für eine Sandfiltration, das heisst 0.01 bis 0.05 kWh/m³ [7]. Im Unterschied zu Ozon- und PAK-Verfahren muss kein zusätzlicher Energieverbrauch der Nachbehandlung respektive Abtrennung berücksichtigt werden, da dies schon Teil des Verfahrens ist.

Für eine Gesamtbilanz muss der Energieverbrauch für die Herstellung und die Regenerierung von Aktivkohle berücksichtigt werden. In der Herstellung unterscheidet sich granuliert Aktivkohle von Pulveraktivkohle einzig durch den fehlenden Schritt des Mahlens. Für GAK können daher die gleichen Primärenergiefaktoren wie für PAK gemäss Tabelle 4 verwendet werden.

Im Gegensatz zu PAK kann die GAK (mit Verlusten) regeneriert werden, was deutlich weniger Energie benötigt als die Herstellung von frischer Aktivkohle. Auch die Primärenergieverbräuche von Reaktivaten können der Tabelle 4 entnommen werden. Bei der Regenerierung bzw. Reaktivierung muss nur der Kohleverlust als Folge des Abbrands mit frischer Aktivkohle ersetzt werden. Die Verluste bei der Reaktivierung betragen laut Herstellerangaben je nach Rohstoff 5 bis 13% für Aktivkohle aus Steinkohle, 5 bis 20% für Aktivkohle aus Braunkohle und 3 bis 15% für Aktivkohle aus Kokosnussschalen. Aus diesem Grund weist eine regenerierte Aktivkohle einen rund 5-mal geringeren Primärenergieverbrauch auf als eine Frischkohle. Die Reaktivierung ist aber nicht in jedem Fall sinnvoll. So ist ein Mindestmass an Kornhärte und Grösse sowie an verbliebenen Adsorptionsplätzen Grundvoraussetzung [16].

Die Standzeit der granulierten Aktivkohle ist für den Energieverbrauch entscheidend. Die Standzeit von GAK-Filtern wird ausgedrückt in durchgesetzten Bettvolumen (Bed Volume Treated, BVT). Um eine vergleichbare oder bessere wirtschaftliche und energetische Bilanz gegenüber PAK-Verfahren aufzuweisen, müssen genügend lange Standzeiten der GAK erreicht werden. Erste Ergebnisse bezüglich erreichbarer Standzeiten aus Pilotversuchen auf der ARA Bülach sind viel versprechend. Der spezifische Verbrauch an Aktivkohle dürfte dort bei genügend hoher Kontaktzeit (Leerbettkontaktzeit > 25 min) in einem ähnlichen Bereich liegen wie bei einem PAK-Verfahren unter vergleichbaren Bedingungen.

Abbildung 9 zeigt beispielhaft, wie der Primärenergie- und Kohleverbrauch eines GAK-Filters von der Filterstandzeit (in BVT) abhängig ist [7]. Es ist zu beachten, dass diese Darstellung nicht allgemein gültig ist, sondern von den anlagenspezifischen Rahmenbedingungen abhängig ist.

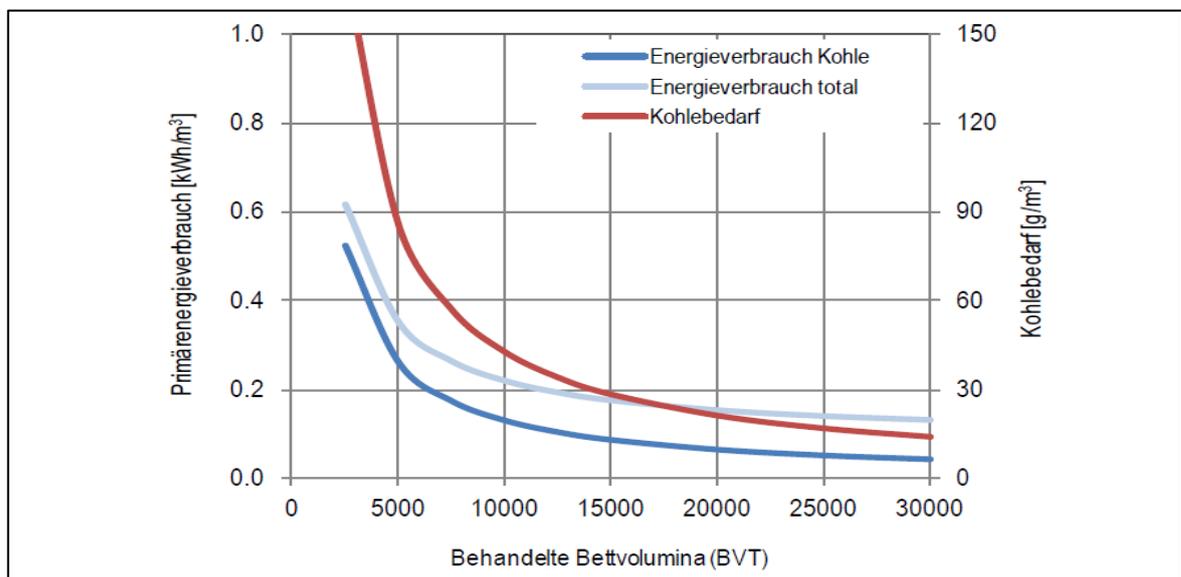


Abbildung 9: Primärenergieverbrauch und Kohlebedarf eines GAK-Filters in Abhängigkeit der Filterstandzeit [7]

3.4 Energieverbrauch von Verfahrenskombinationen

Der Energiebedarf von Verfahrenskombinationen setzt sich aus dem Energiebedarf der einzelnen Verfahren zusammen und ist stark von den Randbedingungen abhängig. Unter Berücksichtigung der grauen Energie dürfte der Energiebedarf in der Regel eher höher sein als bei Einzelverfahren. Ein Kombiverfahren wird allenfalls zwecks Optimierung der Reinigungsleistung gewählt (Nutzen der komplementären Wirkprinzipien), aber kaum zur Optimierung des Energiebedarfs.

4 Energieeffizienz bei Planung / Erstellung

Anwendung von energieeffizienten Verfahren:

Bei der Bewertung der Verfahrensvarianten soll eine ganzheitliche energetische Betrachtung durchgeführt werden. Dabei sind auch die Aufwendungen zur Herstellung der Betriebsmittel (Aktivkohle bzw. Sauerstoff) zu beachten. Die unterschiedlichen Transportwege sind im Vergleich dazu vernachlässigbar. Eine Berücksichtigung des Primärenergiebedarfs oder eine CO₂-Bilanzierung sind daher sinnvoll.

Es wird empfohlen, die unterschiedlichen Energieträger mithilfe von Primärenergiefaktoren miteinander zu vergleichen, zum Beispiel mit dem Excel-Tool der VSA-Empfehlung "Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA" [5]. Eine Aktivkohle mit schlechterem Primärenergiefaktor kann insgesamt trotzdem besser abschneiden, wenn sie schon mit geringerer Dosis die MV-Eliminationsleistung erreicht (PAK) oder eine längere Standzeit aufweist (GAK). Da es sehr unterschiedliche Aktivkohlen gibt, soll die anlagenspezifisch am besten geeignete Aktivkohle rechtzeitig ermittelt werden. Bezüglich Auswahl und Qualitätsüberwachung von Aktivkohle besteht noch Forschungsbedarf.

Optimale Einbindung in die bestehende Anlage:

Die Reinigungsleistung der vorgeschalteten Stufen auf der ARA muss bei der Verfahrensauswahl berücksichtigt werden. Der Energiebedarf für die MV-Stufe soll in erster Priorität durch eine gute Vorreinigung optimiert werden. Konkret bedeutet dies, dass die Konzentrationen an DOC, GUS und Nitrit (letzteres im Fall einer Ozonung) im Ablauf der Nachklärung bzw. im Zulauf der MV-Stufe so niedrig wie möglich sein sollen. DOC wird durch Ozon oxidiert und adsorbiert an die Aktivkohle. Eine erhöhte Ablaufkonzentration von DOC führt somit zu einem höheren Betriebsmittel-Verbrauch. Auch die Ablaufkonzentration an Nitrit sollte möglichst gering sein, da Nitrit durch Ozon sehr rasch zu Nitrat oxidiert wird. Dies verbessert zwar die Ablaufqualität, benötigt aber bedeutend mehr Ozon, was sich wiederum auf den Energieverbrauch auswirkt. Hohe Feststoffgehalte erfordern eine häufigere Rückspülung der Filter. Um den Betriebsmittelbedarf möglichst gering zu halten, soll die MV-Stufe daher nach einer weitgehenden biologischen Reinigung (ganzjährige Nitrifikation für eine Ozonung) eingesetzt werden. Allgemein gilt: Je tiefer die Belastung im Zulauf zur MV-Stufe, desto wirtschaftlicher können die Betriebsmittel zur Elimination von MV eingesetzt werden. Jeglicher zusätzliche Bedarf an Betriebsmitteln mindert nicht nur die Wirtschaftlichkeit, sondern auch die Energieeffizienz.

Die hydraulische Verlusthöhe der Filtration ist bei der Planung zu beachten. Je nach Anlagenlayout und Verfahrensvariante lässt sich die MV-Stufe gegebenenfalls hydraulisch so in die Anlage einbinden, dass kein Zwischenhebewerk notwendig ist. Die hydraulische Einbindung ist ein Kriterium, welches beim Vergleich bewertet werden muss.

Das EMSRL-Konzept soll so geplant werden, dass später die Betriebsdaten gemäss der VSA-Empfehlung "Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA" [5] ausgewertet werden können.

Optimale Dimensionierung der MV-Stufe:

Bezüglich Dimensionierung und Redundanzen der MV-Stufe gilt es, sich an die VSA-Empfehlung "Zu behandelnde Abwassermenge und Redundanz von Reinigungsstufen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen" [2] zu halten. Nicht nur aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, sondern auch aus Gründen der Energieeffizienz soll eine MV-Stufe nach dieser Empfehlung ausgelegt werden. Eine Überdimensionierung ist diesem Zusammenhang nicht zielführend.

Die Ozonerzeugung sollte so dimensioniert sein, dass die Ozongeneratoren möglichst oft im idealen Bereich betrieben werden können (beispielhaft dargestellt in Abbildung 8). Der spezifische Energiebedarf (kWh/kg O₃) soll also nicht nur bei Maximallast, sondern insbesondere auch im Teillastbereich betrachtet werden. Dieser lässt sich zur Beurteilung mittels vorab definierten Lastfällen vergleichen.

Im Weiteren ist für einen energieeffizienten Betrieb ein guter Eintragswirkungsgrad der Betriebsmittel wichtig. Der Eintragswirkungsgrad lässt sich durch eine gute Strömungseffizienz in den Reaktoren und die Wahl des optimalen Eintragungssystems verbessern. Die Beckengeometrie und die Hydraulik lassen sich mittels CFD-Analysen optimieren. Dazu gehören insbesondere die Beckentiefe, die Anordnung der Begaser oder Rührwerke und die Anordnung der Eintrags- und Reaktionskammern. Die Eintragungssysteme sollen so ausgelegt werden, dass der Transfer des Ozons bzw. die Verteilung der Aktivkohle ins Abwasser sowie die Elimination von MV über den gesamten Regelbereich mit hoher Effizienz erfolgt.

Es soll ein Regelkonzept geplant werden, welches Überdosierungen an Betriebsmitteln verhindert. Dazu müssen die benötigten Messungen vorgesehen werden (siehe Kapitel 5).

Wahl energieeffizienter Aggregate:

Unabhängig von der Verfahrenswahl gilt es auch für die MV-Stufe, besonders energiesparsame Aggregate einzusetzen (Ozongeneratoren, Pumpen, Kompressoren, Ventilatoren, Rührwerke) und den Betrieb energieeffizient zu gestalten [10]. Auslegung und Einsatz von Pumpen mit Frequenzumrichter nach aktuellem Stand der Technik sorgen für eine bedarfsabhängige Regelung.

Für die meisten Schweizer ARA dürfte die Ozonproduktion aus flüssigem Sauerstoff am wirtschaftlichsten sein. Die Effizienz der Ozonerzeugung direkt aus getrockneter Luft ist aufgrund des tieferen Sauerstoffanteils geringer als bei der Nutzung von Sauerstoff als Einsatzgas. Die Herstellung des Sauerstoffs vor Ort wiederum dürfte aus betrieblichen Gründen eher nur für grössere Anlagen vertretbar sein. Aufgrund des stark schwankenden Ozonbedarfs von ARA ist aus energetischer Sicht ein Betrieb mit variablem Gasfluss vorteilhaft. PSA bzw. VPSA-Anlagen werden aber vorteilhaft mit einem relativ konstanten Gasstrom betrieben.

Wärmerückgewinnung:

Von der eingetragenen Energie werden im Ozonerzeuger rund 90% in Wärme umgewandelt. Diese muss abgeführt werden und ist deshalb möglichst sinnvoll zu nutzen. Die Kühlung der Ozongeneratoren erfolgt fast ausschliesslich durch Wärmeabgabe an zugeführtes Kühlwasser. Durch Rückgewinnung der Wärme der Kühlanlage lässt sich eventuell der Heizenergiebedarf der Betriebsgebäude optimieren bzw. teilweise decken. Da das Kühlwasser des Ozonerzeugers möglichst kühl sein soll, kann die Abwärme aber normalerweise nicht direkt genutzt werden. Aufgrund des tiefen Temperaturniveaus und des stark schwankenden Anfalls dieser Abwärme ist eine Nutzung zur Schlammwärmeharung für die Faulung eher nicht realistisch.

Fallbeispiel Energieeffizienz bei Planung:

Oft bietet die Sanierung oder der Ausbau einer ARA die Gelegenheit für eine ganzheitliche Energieoptimierung, welche nicht auf die MV-Stufe beschränkt bleibt. Effiziente und optimal aufeinander abgestimmte Verfahrensstufen können sogar den Mehrverbrauch einer MV-Stufe überkompensieren, wie folgendes Fallbeispiel zeigt: Die ARA Kloten Opfikon muss hydraulisch und frachtbezogen erweitert werden, um die steigende Belastung aus dem Wachstum des Einzugsgebietes behandeln zu können. Die ARA wird in diesem Zuge in allen Verfahrensstufen erneuert bzw. ausgebaut. Zusätzlich wird eine Ozonung zur Elimination von Mikroverunreinigungen gebaut, bei bestehender Sandfiltration.

Die biologische Reinigung wird neu mittels Nereda[®]-Verfahren erfolgen. Nereda[®] ist ein Verfahren zur biologischen Abwasserreinigung auf Basis des Sequencing Batch Reactor (SBR)-Verfahrens. Als grosser Vorteil sticht der sehr tiefe spezifische Energieverbrauch heraus. Der Effizienz-Gewinn des Nereda[®]-Verfahrens (ca. 10 kWh/EW/a), ist grösser als der zusätzliche Stromverbrauch durch die Ozonung (ca. 6 kWh/EW/a). So wird insgesamt trotz der zusätzlichen MV-Stufe weniger Strom verbraucht als bei einer konventionellen Belebtschlammanlage ohne MV-Stufe [13].

5 Energieeffizienz im Betrieb

Beste Voraussetzung für die effiziente Elimination von MV ist das Aufrechterhalten eines gut funktionierenden Betriebs der vorgeschalteten Reinigungsstufen auf der ARA. Niedrige Ablaufwerte ab Nachklärbecken (DOC, CSB, $\text{NO}_2\text{-N}$) führen zu einem tieferen Bedarf an Betriebsmitteln (Ozon, PAK) für die gleiche Eliminationsleistung bezüglich Mikroverunreinigungen. Bei GAK-Anlagen führen die guten Werte im Zulauf der GAK-Filtration zu längeren Standzeiten der GAK. Die GUS-Konzentration beeinflusst die Häufigkeit der Filtrerrückspülungen.

Für einen effizienten Betrieb sind robuste Steuerungs- und Regelungsstrategien sowie eine zuverlässige Betriebsüberwachung gefragt. Durch eine optimale und für das Reinigungsziel adäquate Dosierung lässt sich der Verbrauch an Betriebsmitteln und somit Energie minimieren. Es wurden bereits neue Regelungsstrategien entwickelt und in der Praxis erprobt. Durch diese Lösungsansätze lässt sich der Betriebsmittelverbrauch besser dem tatsächlichen Bedarf anpassen. Dadurch können Überdosierungen vermieden werden, was den Energiebedarf sinken lässt.

Anstelle einer rein zuflussproportionalen Steuerung bietet sich eine Regelung nach der UV-Absorbanz an. Die UV-Absorbanz ist eine Messgröße für organische Stoffe (Summenparameter) und korreliert gut mit Spurenstoffen. Die UV-Absorbanz-Messung ist darum ein geeigneter Ersatzparameter für die chemische Spurenstoffanalytik. Die Messung lässt sich darüber hinaus zur Regelung der Dosierung von Ozon oder PAK nutzen. Das Messprinzip lässt sich wie folgt beschreiben: Mit einer UV-Sonde wird bei einer Wellenlänge von 254 nm die Lichtschwächung durch eine definierte Wasserschicht gemessen. Der Messwert wird als Spektraler Absorptions-Koeffizient ($\text{SAK}_{254\text{nm}}$) bezeichnet und hat die Masseneinheit 1/m.

Es wird heute ergänzend zur periodischen Messung der Spurenstoffe empfohlen, die UV-Absorbanz bei 254 nm im Zu- und Ablauf der MV-Stufe (ΔUV) für die Überwachung der Reinigungsleistung zu messen. Dazu kann eine Online-Messung eingesetzt werden, entsprechende Sonden sind kommerziell verfügbar. Es ist aber auch möglich, durch periodische UV-Messungen von Sammelpunkten im Labor Informationen über den Spurenstoffabbau zu erhalten [3]. Die Regelung der MV-Stufe auf der ARA Neugut in Dübendorf beruht auf der ΔUV -Absorbanzmessung ([14]; siehe auch folgendes Fallbeispiel).



Abbildung 10: UV-Sonden auf der ARA Neugut [14]



Abbildung 11: UV-Sonde mit Durchflussarmatur [14]

Bei allen Massnahmen ist davon auszugehen, dass die Lebensdauer von Pumpen und Gebläsen in einer ARA ca. 15 bis 20 Jahre beträgt. Es gilt also im laufenden Werterhalt, den idealen Zeitpunkt nicht zu verpassen, um veraltete Aggregate durch Geräte zu ersetzen, welche auch energetisch dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

Generell wird für die MV-Verfahren eine umfassende und einheitliche Erhebung von Kennzahlen empfohlen. Dazu dient die VSA-Empfehlung "Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA", samt zugehörigem Excel-Tool [5]. Die vereinheitlichte Erfassung und Berechnung umfasst insbesondere Kosten und Energieverbrauch sowie den Verbrauch der Haupt-Betriebsmittel. Dies ermöglicht Vergleiche zwischen ARA. Bezüglich Energieeffizienz und Energieoptimierung im Betrieb einer MV-Stufe sind aus dem komplett zu erfassenden Datensatz folgende Eingangsgrößen von besonderem Interesse:

- Stromverbrauch für die Erzeugung des Trägergases für die Ozonherstellung [kWh/a], sofern diese auf der ARA erfolgt. Extern produzierter Flüssigsauerstoff gehört nicht dazu,
- Stromverbrauch der MV-Hauptstufe [kWh/a],
- Stromverbrauch der MV-Nachbehandlung [kWh/a]; wird wegen des Druckverlusts in der Filtration ein Hebewerk benötigt, gehört dessen Stromverbrauch ebenfalls dazu,
- Verbrauchte Menge der Haupt-Betriebsmittel (LOX, Ozon, Aktivkohle) zur Elimination von MV [t/a],
- Behandelte Abwassermenge [m³/a].

Aus diesen Eingangsgrößen können dann unter anderem Energie-Kennzahlen abgeleitet werden:

- Primärenergieverbrauch MV, ohne und mit importierter graue Energie [kWh/a],
- Spezifische Kennzahlen wie Strom- und Primärenergieverbrauch pro Einwohnerwert [kWh/EW/a]), pro angeschlossenen Einwohner [kWh/E_{ang.}/a]) oder pro behandelter Abwassermenge [kWh/m³],
- Anteil Stromverbrauch MV am gesamten Stromverbrauch der ARA [%].

Dabei sind sowohl die absoluten Werte als auch die Entwicklung der spezifischen Werte zu ermitteln und zu bewerten. Die Ursachen von hohen Energiewerten sind zu ergründen und vor allem auch Massnahmen zur Senkung des Energieverbrauches vorzunehmen. Dabei leistet die VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen" Unterstützung bei der Datenerhebung. Des Weiteren verwaltet die VSA-Plattform diese Daten und wertet sie insbesondere zu Vergleichszwecken auch aus.

Fallbeispiel Energieeffizienz im Betrieb:

Die ARA Neugut in Dübendorf ist die erste ARA der Schweiz, welche im grosstechnischen Massstab Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser entfernt, und zwar mittels einer Ozonung. Um einen stabilen und optimierten Betrieb zu gewährleisten, wurde eine neue Strategie entwickelt und erfolgreich implementiert, welche sowohl Elemente einer Steuerung als auch einer Regelung umfasst. Diese sogenannte BEAR-Strategie beruht auf der Δ UV-Absorbanzmessung, beinhaltet zusätzlich aber einen speziellen Algorithmus. Damit wird die Soll-Ozonkonzentration je nach Zusammensetzung des Abwassers über unterschiedliche Logik-Module berechnet. Das Ziel ist es, den Δ UV-Wert vorzugeben und durch bedarfsgerechte Ozondosierung möglichst stabil zu halten. Diese Regelstrategie hat sich im grosstechnischen Massstab bewährt. Mit der BEAR-Strategie lässt sich auf der ARA Neugut ein stabiler Δ UV-Wert mit einer geringen Bandbreite von $\pm 2\%$ einstellen [14].

Zusammen mit der BEAR-Strategie wurde auch das LOD-Betriebskonzept (LOD: Low Ozon Dosage) von der ARA Neugut entwickelt und eingeführt. Dieses Betriebskonzept beruht auf einem variablen Einsatz der beiden Ozonungskammern wie auch der einzelnen Eintragsstränge in diesen Kammern. Mit diesem Konzept konnte der Ozoneintrag um 15 bis 20% verringert werden, unter Einhaltung der geforderten MV-Elimination von 80% [14].

Insgesamt entfernt die ARA Neugut mit einer Eliminationsleistung von $82 \pm 2\%$ zuverlässig die Mikroverunreinigungen [14]. Durch die Betriebsoptimierungen konnte innerhalb von nur zwei Jahren die zur Einhaltung des Reinigungsziels notwendige Ozondosis bereits signifikant reduziert werden. Dies verbessert direkt auch die Energieeffizienz des Verfahrens.

6 Checkliste für Planung und Betrieb

- **Allgemein:** Massnahmen zur Energieoptimierung dürfen nicht zu Lasten der geforderten Reinigungsleistung sowie der Prozessstabilität gehen. Abwasserreinigung und Betrieb haben Vorrang. In der Praxis sind aber auch unter diesen Bedingungen durchaus Energieoptimierungen möglich, die zum Teil sogar noch positive Aspekte für den Kläranlagenbetrieb haben können.
 - **Variantenstudie:** Die eingesetzten Verfahren sind auch nach energetischen Kriterien auszuwählen. So können zum Beispiel hohe Konzentrationen an Nitrit im Ablauf der Nachklärung gegen eine Ozonung sprechen.
 - **Projektierung:** Nach Möglichkeit sind Anlagen so zu konzipieren, dass kurze Wege und kompakte Anlagen resultieren. Die Filterverluste sind zu optimieren. Lässt sich mit geschickter Wahl und Auslegung der Verfahrensvariante ein Hebewerk einsparen? Falls ein Hebewerk unabdingbar ist, soll dieses unter Berücksichtigung des Kapitels 2 aus dem Leitfaden "Energie in ARA" [1] optimal ausgelegt werden.
 - **Projektierung:** Bei der Planung der MV-Stufe ist die gesamte Anlage zu berücksichtigen. Einflüsse der biologischen Stufe auf die MV-Stufe und umgekehrt sind zu beachten.
 - **Projektierung:** Gesamtheitliche Energiekonzepte inkl. HLK sind zu erarbeiten. So soll etwa die Abwärme bei Ozonanlagen nach Möglichkeit genutzt und die Aktivkohle bei GAK-Anlagen reaktiviert werden. Die Planung einer MV-Stufe sollte immer auch zum Anlass für eine energetische Feinanalyse gemäss Kapitel 8 des Leitfadens "Energie in ARA" [1] genommen werden.
 - **Projektierung:** Strömungs- und Eintragungseffizienz von (Ozon-)Reaktoren lassen sich mittels CFD-Analysen verbessern. Ein optimierter Betriebsmitteleintrag erhöht auch die Energieeffizienz. Die Begasung bei einer Ozonung ist im Prinzip ähnlich einer Biologie-Belüftung. Deshalb soll auch das Kapitel 4 aus dem Leitfaden "Energie in ARA" [1] beachtet werden.
 - **Ausführung:** Es ist zu beachten, dass bei ökonomischen Überlegungen immer die gesamten Kosten und die Kosten über die gesamte Lebensdauer betrachtet werden. Dabei ist bei öffentlichen Anlagen gemäss SIA 480 auch immer eine Variante mit den externen Kosten aufzuzeigen. Dies reicht aber noch nicht, denn damit alleine wird der Energieverbrauch häufig nicht unbedingt optimiert. Deshalb soll auch das Kriterium "Energiebedarf" als Beurteilungskriterium bei Ausschreibungen einbezogen werden.
 - **Betrieb:** Der Energiebedarf der MV-Stufe lässt sich durch eine gute vorhergehende biologische Reinigung und Nachklärung (DOC, GUS, Nitrit) optimieren. Daher ist ein gut funktionierender Betrieb der vorgeschalteten Reinigungsstufen sicherzustellen.
 - **Betrieb:** Betriebsmittel- und Stromverbrauch der MV-Stufe sind gemäss der VSA-Empfehlung "Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA" [5] zu erfassen und auszuwerten. Basierend darauf kann der Betriebsmittel- und Stromverbrauch gezielt optimiert werden.
 - **Betrieb:** Die Verfahren sind bezüglich Energieeffizienz ständig weiterzuentwickeln. Dazu gehört zum Beispiel die laufende Optimierung der Regelkonzepte bzw. der Dosierung gemäss gewonnenen Erfahrungen und Stand der Technik.
 - **Aus- und Weiterbildung:** Die Abwasserfachleute der Kläranlagen sowie der Planungsbüros, welche mit MV zu tun haben, informieren sich ständig über den neusten Stand der Entwicklungen in diesem Bereich und der energetischen Konsequenzen.
-

7 Ausblick

Die ARA, welche gesetzlich zur Elimination von Mikroverunreinigungen verpflichtet sind, müssen bis zum Jahr 2035 mit der Realisierung begonnen haben, um abgeltungsberechtigt zu sein. Bis dahin wird der Energiebedarf durch die Verfahrensstufen zur Elimination von MV laufend an Bedeutung gewinnen. Der zusätzliche Energieverbrauch ist für jede betroffene ARA bedeutend und muss optimiert werden. Gesamtschweizerisch ist der Mehrverbrauch in Anbetracht des zusätzlichen Nutzens für den Gewässerschutz vertretbar. Es entspricht aber einer gesellschaftlichen Forderung, sämtliche Prozesse energetisch zu optimieren und den zusätzlichen Verbrauch soweit möglich mit erneuerbaren Energien zu decken. Der zusätzliche Energieverbrauch soll daher bereits auf Stufe der einzelnen Anlage durch geeignete Massnahmen kompensiert werden, welche die Energieeffizienz der ARA insgesamt verbessern. Ziel muss es sein, den erwarteten Mehrverbrauch der zukünftigen MV-Stufen auf nationaler Stufe durch eine Steigerung der Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA im Minimum zu kompensieren.

Bei der Beurteilung von Verfahren bezüglich Energieeffizienz lässt die Berücksichtigung des Primärenergiebedarfs den direkten Vergleich unterschiedlicher Verfahren zu. Durch die Umrechnung in CO₂-Äquivalente ist zudem der Vergleich mit anderen klimarelevanten Prozessen möglich. Die Energie zur Sauerstoff- und Ozonproduktion kann in der Schweiz hergestellt werden und liesse sich auch mit erneuerbaren Energien produzieren. Die Aktivkohle zunehmend aus nachwachsenden, lokalen Rohstoffen herzustellen ist wünschenswert. Gegenwärtig muss die Aktivkohle (und damit auch viel graue Energie) aber importiert werden. Es besteht somit eine gewisse Abhängigkeit von den Lieferanten.

Unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus benötigen Ozon und PAK ungefähr gleich viel Primärenergie. Bei Ozon- und PAK-Verfahren muss im Gegensatz zu GAK-Verfahren der Energieverbrauch der Nachbehandlung respektive der Aktivkohle-Abtrennung mitberücksichtigt werden [6]. GAK-Verfahren sind energetisch als sehr vielversprechend zu beurteilen, falls die erwarteten bzw. für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens benötigten Standzeiten erreicht werden können. Diese Angaben sind aber noch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Laufende und geplante grosstechnische GAK-Projekte werden in den nächsten Jahren Antworten zu diesen Fragen liefern. Nebst Aktivkohle und Ozon sind andere, neuartige Verfahren denkbar, welche in Zukunft Alternativen darstellen könnten. Auch hier gilt es, die energetischen Aspekte konsequent mit zu berücksichtigen.

Die künftige Optimierung der MV-Stufen hat ein grosses Potenzial. Bis anhin wurde dieses aber noch relativ wenig ausgeschöpft, da erst wenige grosstechnische Anlagen existieren. In den nächsten Jahren werden aber fortlaufend neue Daten über den Energieverbrauch grosstechnisch errichteter Anlagen vorliegen. Es können neue Ansätze zur Optimierung der Verfahrenskonfigurationen und der Betriebsweisen erwartet werden. Durch gezielten Erfahrungsaustausch lassen sich die Anlagen vor allem auch aus energetischer Sicht weiter optimieren. Als Hilfsmittel dazu dient die VSA-Empfehlung "Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA" [5]. Auf der Basis der fortlaufend erhobenen Zahlen, Auswertungen und entwickelten Energie-Kennzahlen könnte in einigen Jahren eine schweizweite Kampagne zur Energieoptimierung organisiert werden. Diese könnte z. B. von InfraWatt in Zusammenarbeit mit dem VSA und der Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen", mit Unterstützung von BAFU oder BFE, durchgeführt werden. Diese Kampagne besteht aus Information, Aus- und Weiterbildungsangeboten sowie Beratung.

An dieser Stelle wird auf den Internet-Auftritt der VSA-Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen" hingewiesen: www.micropoll.ch. Die VSA-Plattform dient dem Aufbau und Transfer von Wissen sowie dem Erfahrungsaustausch bezüglich technischer Verfahren zur Entfernung von Mikroverunreinigungen auf kommunalen ARA. Auch über neue Verfahren, Pilotprojekte und grosstechnische Projekte wird laufend berichtet [17].

Dieses Kapitel bezüglich Energieeffizienz in MV-Anlagen wird in rund fünf Jahren basierend auf den bis dahin gewonnenen Betriebserfahrungen aktualisiert.

8 Grundlagen

- [1] VSA, BFE 2008: "Energie in ARA - Leitfaden zur Energieoptimierung auf Abwasserreinigungsanlagen", Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA und Bundesamt für Energie BFE, Zürich/Bern
- [2] VSA 2015: "Zu behandelnde Abwassermenge und Redundanz von Reinigungsstufen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen", Empfehlung, VSA, Zürich
- [3] VSA 2016: "Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination", VSA, Zürich (Plattform "Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen")
- [4] VSA, 2017: "Abklärung Verfahrenseignung Ozonung", Empfehlung, VSA, Zürich
- [5] VSA, 2016: "Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA", Empfehlung in Vernehmlassung, VSA, Zürich
- [6] VSA, 2016: "Mikroverunreinigungen" Skript Ausbildungsstufe A3/A4/A7, VSA, Zürich
- [7] Abegglen, C., Siegrist, H. 2012: "Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen", Umwelt-Wissen Nr. 1214, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern
- [8] Abegglen, C. 2011 et. al.: "Mikroverunreinigungen - Energieverbrauch und Kosten weitergehender Verfahren auf kommunalen ARA", Gas Wasser Abwasser Nr. 7/2011 (heute Aqua & Gas)
- [9] Moser, R. 2011: "Weitergehende Abwasserreinigung: Kosten und Aufwand", Hunziker Betatech AG, Präsentation am VSA-Fortbildungskurs, Emmetten
- [10] Müller, E., Vogelsanger, M., Moser, R., Frei, U. 2015: "Elektrische Antriebe bei Infrastrukturanlagen - Potentialanalyse und Massnahmenkatalog", BFE / InfraWatt, Bern/Schaffhausen
- [11] Holinger AG, 2012: "Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA", Baden
- [12] Benstöm, F., et. al.: "Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen", Korrespondenz Abwasser, Abfall Nr. 3, 2016
- [13] TBF + Partner AG, 2016: "Abwasserreinigung Kloten Opfikon AKO – Ausbau ARA Kloten Opfikon 2020", Technischer Bericht Bauprojekt, INGE TBF – Pöyry, Zürich
- [14] Schachtler, M., Hubaux, N. 2016: "BEAR: Innovative Regelstrategie der Ozonung - UV-Messtechnik für Regelung und Überwachung der Elimination von MV", Aqua & Gas Nr. 5, 2016
- [15] Kapp H., Metzger S. 2017: "PAK in der Schlammbehandlung", Aqua & Gas Nr. 1, 2017
- [16] DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6: "Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung", Arbeitsbericht, Korrespondenz Abwasser, Abfall Nr. 12, 2016
- [17] <https://www.micropoll.ch/plattform/>

