

KLIMAFREUNDLICH GEWÄSSER SCHÜTZEN

CO₂-FUSSABDRUCK VERKLEINERN BEI DER ELIMINATION ORGANISCHER SPURENSTOFFE AUF KLÄRANLAGEN

Die Behandlung des kommunalen Abwassers mit Ozon oder Aktivkohle verringert den Eintrag an organischen Spurenstoffen in die Gewässer. Aufgrund der notwendigen Betriebsmittel werden dabei die Treibhausgasemissionen erhöht. Der vorliegende Artikel zeigt auf, welche Massnahmen ARA-Betreiber ergreifen können, um diesen Anstieg des CO₂-Fussabdrucks zu minimieren. Vielfach können mit diesen Massnahmen auch die Betriebskosten gesenkt werden.

Aline Meier*, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»

Christian Remy, Kompetenzzentrum Wasser Berlin

RÉSUMÉ

PROTÉGER LES COURS D'EAUX EN RESPECTANT LE CLIMAT: DIMINUER L'EMPREINTE CARBONE LORS DE L'ÉLIMINATION DES MICRO- POLLUANTS ORGANIQUES DANS LES STATIONS D'ÉPURATION

L'utilisation d'ozone ou de charbon actif dans les STEP diminue l'apport de micropolluants organiques dans les cours d'eaux. L'augmentation des gaz à effet de serre (GES) qui en résulte participe au réchauffement climatique. Les STEP ne sont certes responsables que d'environ 1% des émissions de GES en Suisse et l'élimination des micropolluants ne représente qu'une petite partie de leurs émissions. Cependant, les émissions supplémentaires doivent être réduites au minimum. La présente étude examine l'empreinte CO₂ des différents procédés d'élimination des micropolluants. Il en résulte que c'est l'ozonation qui émet le moins de GES lorsque l'on prend en compte le mix électrique des consommateurs suisses. L'empreinte CO₂ de ce procédé a été comparée avec celle des installations au charbon actif en poudre (six fois plus élevée), et celle des filtres au charbon actif en grains (deux fois plus élevée), lorsque la houille est utilisée comme matière première pour la production de charbon actif. Le mix électrique a un impact important sur l'empreinte CO₂ des ozonations alors que la matière première a une grande influence sur celle des procédés au charbon actif. À titre d'exemple, l'étude de l'influence des matériaux de construction des étapes de traitement des micropolluants des STEP d'Altenrhein et de Fehrltorf montre que l'infrastructure

HINTERGRUND

Organische Spurenstoffe wie Rückstände von Arzneimitteln oder Kosmetika können auf Wasserlebewesen bereits in geringen Konzentrationen negative Auswirkungen haben [1]. In der Schweiz werden bis 2040 ausgewählte Abwasserreinigungsanlagen (ARA) mit Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination ausgerüstet. Heute sind bereits auf zehn Kläranlagen die neuen Reinigungsstufen in Betrieb. Für diesen ARA-Ausbau eignen sich Verfahren mit Ozon, Pulverkohle (PAK) oder granulierter Aktivkohle (GAK) [2]. Die Belastung der Gewässer durch organische Spurenstoffe geht dadurch deutlich zurück, was zu einer Verbesserung der Wasserqualität führt [1, 3].

Der Nutzen dieser Reinigungsstufen ist somit unbestritten. Deren Betrieb benötigt aber zusätzliche Betriebsmittel, was wiederum Treibhausgasemissionen und andere Umweltauswirkungen verursacht. ARA tragen nur im tiefen Prozentbereich zu den gesamten Schweizer Treibhausgasemissionen bei, und die Spurenstoffelimination ist lediglich eine von mehreren Reinigungsstufen. Dennoch sollten die mit dem Betrieb dieser zusätzlichen Reinigungsstufen verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt möglichst gering ausfallen.

Der vorliegende Artikel verdeutlicht, welche Faktoren stark zum CO₂-Fussabdruck der verschiedenen Verfahren auf Schweizer

* Kontakt: aline.meier@vsa.ch

Umweltschäden	Indikatoren			
	Primärenergieverbrauch	CO ₂ -Fussabdruck	Umweltbelastungspunkte	...
Klimaerwärmung		✓	✓	
Ressource Energie	✓		✓	
Ressource Landnutzung			✓	
Gesundheitsschäden			✓	
...			✓	

Tab. 1 Vereinfachte Bewertung der Umweltschäden der Spurenstoffelimination – es wird im Modell lediglich der CO₂-Fussabdruck und somit der Effekt auf die Klimaerwärmung betrachtet (grün markiert).

Kläranlagen beitragen. Dieses Wissen kann bei der Planung und hauptsächlich bei der Betriebsoptimierung von Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination unterstützen. Viele CO₂-sparende Massnahmen führen auch dazu, dass die Kosten für Betriebsmittel und Strom sinken. Klimafreundlicher Gewässerschutz kann sich also auch aus wirtschaftlicher Sicht lohnen.

VORGEHEN ZUR BEWERTUNG DER UMWELTAUSWIRKUNGEN

Die Beurteilung der Umweltauswirkungen von technischen Systemen wird in der Regel mit Ökobilanzen durchgeführt [4, 5]. Diese beinhalten eine umfassende Analyse aller potenziellen Umweltauswirkungen auf Boden, Luft und Wasser, zudem berücksichtigen sie auch sämtliche Stoffströme in vor- und nachgelagerten Systemen von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung.

Sie stellen zudem die zusätzlich entstehenden Umweltauswirkungen und Kosten von Massnahmen direkt ihrem Nutzen gegenüber. Auf die Spurenstoffelimination übertragen bedeutet dies, dass zur Beurteilung des Nutzens die Verbesserung der Gewässerqualität dank der Spurenstoffelimination quantifiziert werden muss. Vereinzelt Studien beinhalten eine solche Bewertung des Nutzens anhand weniger Substanzen, zum Beispiel [6-10]. In der vorliegenden Studie wird aber darauf verzichtet, stattdessen gehen die Autoren davon aus, dass alle genannten Verfahren denselben Umweltnutzen generieren, indem sie die gesetzlich geforderte Reinigungsleistung von über 80% für ausgewählte Spurenstoffe einhalten. Unter Berücksichtigung des heutigen Wissensstands sind allfällige Unterschiede vernachlässigbar.

Es handelt sich somit nicht um eine vollständige Ökobilanz, sondern um eine Ab-

schätzung der Umweltschäden. Deren Bewertung für verschiedene Verfahren zur Spurenstoffelimination kann beispielsweise auf Basis einzelner Indikatoren wie Primärenergieverbrauch oder Treibhauseffekt erfolgen oder aggregiert anhand spezifischer Umweltbelastungspunkte (Tab. 1). Die Autoren entschieden sich für den Indikator Treibhauseffekt, stellt er doch einen der drängendsten aktuellen Umweltschäden dar. Der Treibhauseffekt wird durch CO₂-Äquivalente respektive durch den CO₂-Fussabdruck ausgedrückt und ist ein Mass für den menschlichen Beitrag zur Klimaerwärmung. Der Faktor Primärenergie ist ein Mass für die Nutzung begrenzter fossiler Ressourcen. Er ist indirekt bereits im Treibhausgas-Indikator über die mit der Nutzung verbundenen Treibhausgasemissionen enthalten. Der Indikator Treibhauseffekt wird hier nach dem international anerkannten Modell des *Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC) als *Global warming potential* über einen Zeitraum von 100 Jahren berechnet [11]. Die Nutzung erneuerbarer Energie wird in dieser Studie nicht als negativ berücksichtigt.

Zusätzlich legen die Autoren zur Vereinfachung der Berechnung den Fokus auf die Betriebsmittel Aktivkohle und Ozon inklusive deren Herstellung sowie den

Stromverbrauch, denn gemäss [6] können damit über 80% der Treibhausgasemissionen der Spurenstoffelimination erklärt werden. Die gegebenenfalls zusätzlich notwendige Schlammbehandlung und -entsorgung, der Verbrauch von Fäll- und Flockungshilfsmitteln, die Bautätigkeit und der Materialverbrauch für den Bau von Becken und Gebäuden spielten für den Treibhauseffekt in [6] eine deutlich kleinere Rolle. Den letzten Punkt der Materialverbräuche beim Bau wird im Abschnitt «Bedeutung der Infrastruktur» für den Standort Schweiz dennoch genauer unter die Lupe genommen. Soziale oder wirtschaftliche Aspekte werden in der Studie nicht berücksichtigt.

CO₂-FUSSABDRUCK DER SPURENSTOFFELIMINATION

ANNAHMEN

Die vorliegende Studie beinhaltet ein Modell für die Spurenstoffelimination einer Schweizer Kläranlage für die drei Verfahren Ozonung mit Sandfiltration, PAK mit Sandfiltration und GAK-Filtration. Die Grundlagen zur Berechnung des CO₂-Fussabdrucks sind in *Tabelle 2* aufgeführt, während *Figur 1* die verwendete Systemgrenze sowie Annahmen zur Menge der notwendigen Betriebsmittel zeigt. Die im Modell enthaltenen Annahmen zur Dosiermenge und zum Stromverbrauch basieren auf dem Projekt *Micropoll* [12], Pilotversuchen und ersten Erkenntnissen aus grosstechnischen Realisierungen. Alle Berechnungen beziehen sich auf einen Kubikmeter Abwasser aus dem Ablauf einer Nachklärung mit für die Schweiz typischen Ablaufwerten (*Fig. 1*); bezüglich Rohabwasser – ARA-Zufluss – werden die Spurenstoffe zu mindestens 80% eliminiert. Als Grundlage für die Berechnung des Aufwands der Aktivkohle-

	Wert	Einheit	Quelle
CO ₂ -Äquivalente Strom	181	g CO ₂ -Äq./kWh	Verbraucher Strommix gemäss [14]
CO ₂ -Äquivalente Flüssigsauerstoff-Herstellung Schweiz	260	g CO ₂ -Äq./kgO ₂	Ecoinvent, angepasst auf Strommix Schweiz
Strombedarf Ozon-Produktion	12,50	kWh/kg Ozon	[15]
Strombedarf Sand- resp. GAK-Filter inkl. Hebewerk	0,03	kWh/m ³	[16]
CO ₂ -Äquivalente Frischkohle Braun-/Stein-/Kokosnussskohle	14,3 / 11,7 / 6,4	t CO ₂ -Äq./t Aktivkohle	Hersteller-Umfrage DWA 2016, [13]
CO ₂ -Äquivalente Reaktivkohle Braun-/Stein-/Kokosnussskohle	2,1 / 1,9 / 1,1	t CO ₂ -Äq./t Aktivkohle	Hersteller-Umfrage DWA 2016, [13]
Stromverbrauch PAK auf ARA	0,02	kWh/m ³	[17]

Tab. 2 Annahmen für die Berechnungen des CO₂-Fussabdrucks.

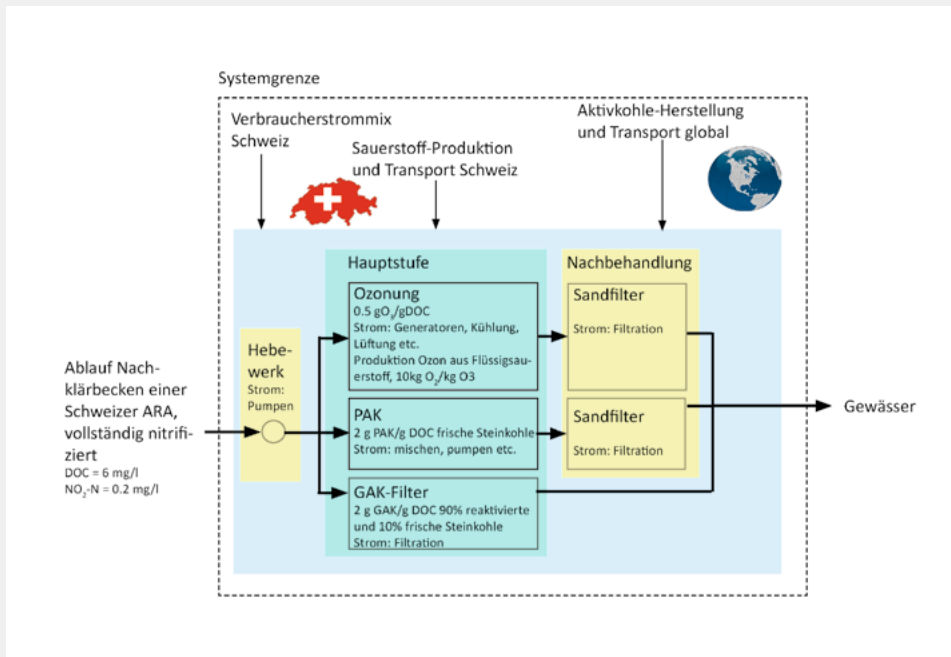


Fig. 1 Systemgrenze der modellierten Spurenstoffelimination einer Schweizer ARA, betrachtete Verfahren, Stromverbräuche und Annahmen zur Dosierung von Ozon und Aktivkohle; gelb = Nachbehandlung und Hebewerk (wird nachfolgend zusammen betrachtet), grün = Hauptstufe Spurenstoffelimination, blau = gesamte Spurenstoff-Stufe.

Herstellung diente ein Tool, das speziell für diese Abschätzungen erstellt wurde. Die Grundlagen dafür sind in [13] enthalten. Das Modell basiert auf der Annahme, dass PAK aus 100% Frischkohle besteht, während GAK regenerierbar ist und nur der dabei verlorene Anteil von 10% über Frischkohle, das sogenannte *Make-up*, ersetzt werden muss.

Der CO₂-Fussabdruck von grosstechnischen Anlagen kann grundsätzlich bereits mit den VSA-Kennzahlen zur Spurenstoffelimination aus jährlichen Betriebsdaten berechnet werden [18]. Im vorliegenden Modell jedoch wird ein Schweizer Strommix mit höherem CO₂-Fussabdruck (Verbraucherstrom gemäss [14]) verwendet, der auch Importe nicht-erneuerbarer Energie berücksichtigt. Angenommen wird zudem, dass der Flüssigsauerstoff in der Schweiz und nicht in der EU produziert wird. Das Modell erlaubt eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Einflussfaktoren und die Simulation verschiedener Szenarien.

Da der Schweizer Strommix (182 g CO₂-Äq./kWh) einen deutlich geringeren CO₂-Fussabdruck als der Europäische (450 g CO₂-Äq./kWh [19]) aufweist, spielt er in der Gesamtbetrachtung für die Schweiz eine entsprechend geringere Rolle für den Treibhauseffekt als in vergleichbaren Studien wie [6]. An Bedeutung gewinnen dürfte hingegen die Infrastruktur. Aus

diesem Grund folgt eine genauere Untersuchung, ob der Einfluss des Materialverbrauchs zur Erstellung der Infrastruktur auch für Schweizer ARA eine untergeordnete Rolle spielt.

BEDEUTUNG DER INFRASTRUKTUR

Der maximale Einfluss der Infrastruktur wird anhand zweier Beispiele grob

abgeschätzt; berechnet wird der CO₂-Fussabdruck des Materialverbrauchs für die Infrastruktur mit einem eigens für die Studie entwickelten Tool [13]. Einerseits wurden die verbauten Materialien der Ozonung mit nachfolgender GAK-Filtration der ARA Altenrhein analysiert. Mit dieser bereits realisierten Anlage lässt sich ein maximaler Einfluss der Infrastruktur bei Ozonungen abschätzen, weil alle Bauwerke neu erstellt wurden und die Nachbehandlung im Vergleich zu einem Sandfilter grösser ausfiel. Andererseits wurde die geplante PAK-Stufe mit PAK-Reaktor, Sedimentation und Filtration (*Ulmer-Verfahren*) der ARA Fehraltorf untersucht. Mit dieser Anlage lässt sich der maximale Einfluss der Infrastruktur bei PAK-Verfahren abschätzen, weil es sich um das bauintensivste Verfahren und eine Vollstrom-Behandlung handelt. Der Materialverbrauch für die Infrastruktur wird dabei über die Lebensdauer der Bauwerke verrechnet [13], addiert wird eine Reserve von 20% für nicht betrachtete Materialien und Unsicherheiten.

Figur 2 zeigt die Berechnungen für die Ozonung mit nachfolgender GAK-Filtration: Die Infrastruktur macht 18% des CO₂-Fussabdrucks einer Ozonung mit GAK-Filtration aus; die Materialien Beton und Bewehrungsstahl sind für über die Hälfte des CO₂-Fussabdrucks der Infrastruktur dieses Kombi-Verfahrens (Kuchendiagramm in Fig. 2) verantwort-

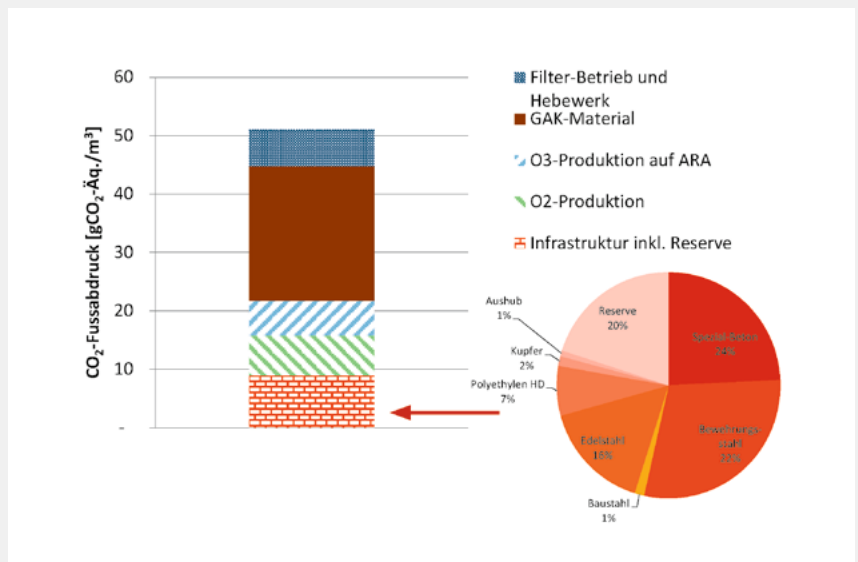


Fig. 2 Berechnung des CO₂-Fussabdrucks der Spurenstoffelimination der ARA Altenrhein unter Berücksichtigung des Betriebsmittelverbrauchs und der Infrastruktur, Inbetriebnahme Herbst 2019, Annahmen für zukünftige Dosierung Ozon: 0,2 g O₃/g DOC bei DOC=8 mg/l plus Ozonverbrauch für 0,2 mg NO₂/l und GAK: 1 g GAK/g DOC, halb so viel wie im Modell aufgrund Vorozonung, Produktion 90% des Flüssigsauerstoffs in CH, 10% EU, Abschätzung der Menge an Baumaterialien durch Experten.

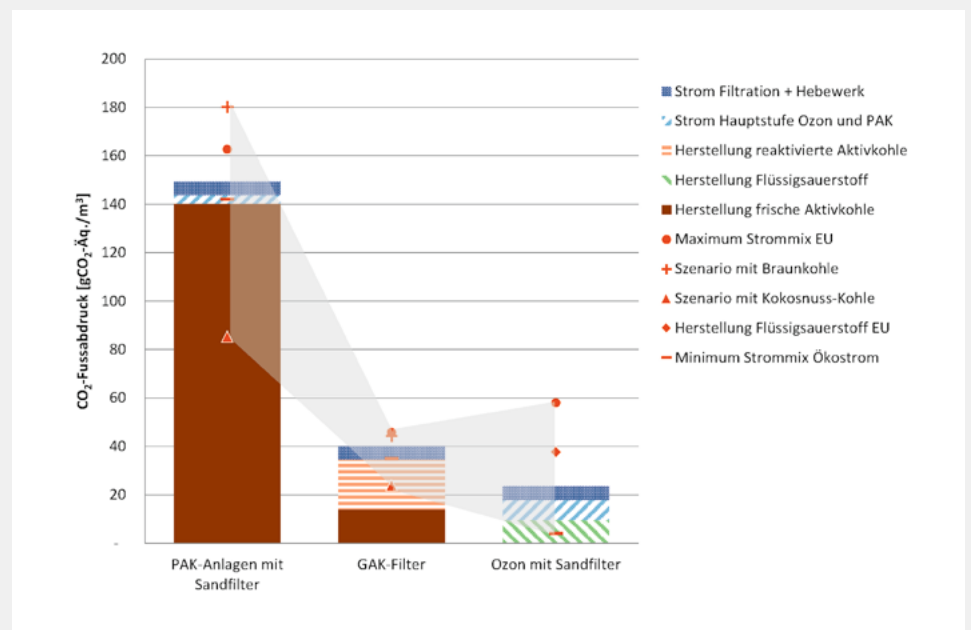
lich. Für eine Ozonung mit Sandfiltration würde weniger Baumaterial benötigt, da Sandfilter kleiner als GAK-Filter dimensioniert werden. Gleichzeitig würde jedoch der gesamte in *Figur 2* dargestellte CO_2 -Fussabdruck für eine reine Ozonung mit höherer Ozondosis, jedoch ohne GAK, um etwa $10 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalenten/m}^3$ tiefer ausfallen. Mit den auf der ARA Altenrhein verwendeten Baumaterialien würde sich der Anteil der Infrastruktur für eine reine Ozonung dabei nur leicht erhöhen: auf 22%.

Für die geplante ARA Fehraltorf liegen lediglich Daten zu den voraussichtlich notwendigen Baustoffen Beton und Bewehrungsstahl vor. Da für das *Ulmer*-Verfahren viele Becken und anteilmässig wenige Leitungen und andere Anlagenteile nötig sind, lässt sich mit diesen Daten dennoch grob der Anteil der Infrastruktur abschätzen. Mit den Annahmen zum PAK-Verbrauch aus *Figur 1* und einer Reserve für nicht beachtete Baustoffe von 20% resultiert ein Anteil der Infrastruktur von 27% am CO_2 -Fussabdruck. Ohne Sedimentationsbecken würde die Infrastruktur in diesem Beispiel noch 19% ausmachen. Dies entspräche etwa dem Verfahren PAK-Dosierung direkt vor eine Sandfiltration.

Die Schlussfolgerung ist, dass der Einfluss des Materialverbrauchs durch den hiesigen eher grünen Strommix zwar vergleichsweise wichtiger ist als beispielsweise in Deutschland, aber nicht dominiert. Dennoch ist es sinnvoll, bestehende Bauwerke zu nutzen und den Aufwand an Investitionskosten und auch an damit verbundenen Umweltwirkungen zu minimieren. Andere Massnahmen, um den Materialverbrauch zu senken, spielen hingegen für den CO_2 -Fussabdruck nur eine untergeordnete Rolle. Der Fokus der weiteren Betrachtungen liegt daher auf dem Betriebsmittelverbrauch.

RESULTATE DER MODELL-SPURENSTOFFSTUFE

Die Resultate der Modell-Spurenstoff-Stufe in *Figur 3* mit den Annahmen aus *Figur 1* zeigen, dass für Aktivkohle-Verfahren der Grossteil des CO_2 -Fussabdrucks global bei der Herstellung und Aktivierung der Aktivkohle entsteht. Den grössten Teil der Produktion der Frischkohle machen die Rohstoffgewinnung, der Abbrand des Rohstoffes und der bei der Aktivierung benötigte Dampf aus, während die Anteile für Strom und



*Fig. 3 Vergleich des CO_2 -Fussabdrucks der Betriebsmittel verschiedener Verfahren zur Spurenstoff-elimination für eine Schweizer Modellkläranlage mit den Annahmen aus Tabelle 2 und Systemgrenze inklusive Annahmen zum Betriebsmitteleinsatz in *Figur 1*, Sensitivitätsbereich bezüglich Strommix (CH-Verbraucher, EU oder Ökostrom) und Aktivkohle-Rohstoff in Grau, ohne Infrastruktur.*

Transport vernachlässigbar sind. Beim Einsatz von GAK führt die regenerierte Aktivkohle trotz gleicher Dosiermengen im Vergleich zu PAK zu einem erheblich geringeren CO_2 -Fussabdruck, da für die Regeneration nur Erdgas und kein zusätzlicher Rohstoff benötigt wird. Rund zwei Drittel des CO_2 -Fussabdrucks von Ozonungen fallen hingegen durch den Stromverbrauch zur Ozonerzeugung und zum Betrieb der Nachbehandlung auf der ARA an, etwa ein Drittel kommt durch den Stromverbrauch zur Sauerstoff-Produktion in der Schweiz zustande.

Die Ozonung verursacht unter den getroffenen Annahmen mit $23 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalenten/m}^3$ den tiefsten CO_2 -Fussabdruck, gefolgt von GAK mit $40 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalenten/m}^3$ und PAK mit $149 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalenten/m}^3$ (*Fig. 3*). Der gewählte Strommix hat dabei einen grossen Einfluss. Würde sich der Schweizer Strommix dem europäischen Mix angleichen, hätte die Ozonung einen leicht höheren CO_2 -Fussabdruck als die GAK-Filtration. Unter der Annahme, dass die Flüssigsauerstoff-Produktion in der EU erfolgt und dafür der europäische Strommix angewandt wird, schneiden GAK und Ozon bezüglich CO_2 -Fussabdruck etwa gleich gut ab. Mit dem Produktionsstrommix Schweiz (ohne Importe: $29,8 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalente/kWh}$ [14]), kommt der CO_2 -Fussabdruck der Ozonung etwa um den Faktor 6 tiefer zu liegen als mit dem Verbraucher-Strommix.

Die Modellierung zeigt ebenfalls, dass die verwendeten Rohstoffe für die Aktivkohleherstellung einen grossen Einfluss auf den CO_2 -Fussabdruck haben. Wird beispielsweise für die Herstellung der Aktivkohle ein erneuerbarer Rohstoff wie Kokosnussschalen oder Holz verwendet, sinkt der CO_2 -Fussabdruck um mehr als 40%. Zudem schneiden Reaktivate viel besser ab, was bei der GAK-Filtration zum Tragen kommt.

Pro Einwohner und Tag führt die Spurenstoffelimination mit den Grundannahmen dieser Studie und einem täglichen Abwasseranfall von 300 Liter pro Einwohner zu einem zusätzlichen CO_2 -Fussabdruck zwischen $7 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalente}$ für Ozon und $45 \text{ g CO}_2\text{-Äquivalente}$ für PAK-Verfahren. Bei Letzteren entspricht dies etwa 200 Meter Autofahren am Tag. Gesamthaft verursacht eine PAK-Anlage einer mittleren ARA mit 30 000 EW täglich etwa so viele CO_2 -Äquivalente wie 100 Personen im Durchschnitt in der Schweiz. Damit diese Werte im gesamten Klärprozess der ARA eingeordnet werden können, liefert der nächste Abschnitt einen Vergleich der Treibhausgasemissionen der verschiedenen Reinigungsschritte.

VERGLEICH MIT ANDEREN REINIGUNGSPROZESSEN DER ARA

Neben der Spurenstoffelimination verursachen auch die anderen Reinigungsstufen auf der ARA CO_2 -Emissionen. Dabei

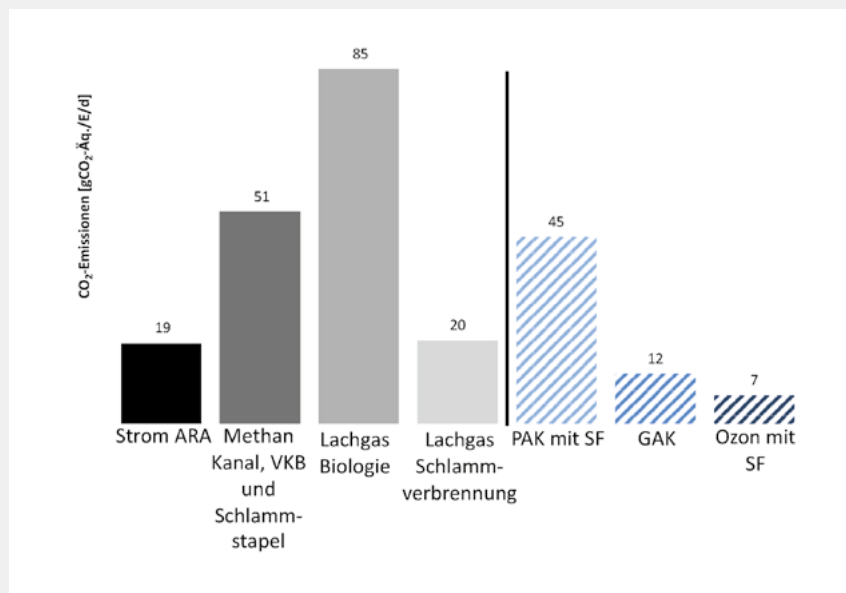


Fig. 4 Treibhausgasemissionen einer typischen Schweizer ARA pro Einwohner und Tag sowie Vergleich mit den modellierten Verfahren zur Spurenstoffelimination. Abschätzung gemäss [20], aber mit Schweizer Verbraucher-Strommix. 2% des umgesetzten Stickstoffs entweichen als Lachgas [21] (starke Streuung je nach Kläranlage), zusätzlich entweichen 5% des Klärgases aus nicht-abgedeckten Schlammstapeln [22], mit den Resultaten aus Figur 3, Abwasseranfall 300l/E/d, Strombedarf ARA = 39 kWh/Person/Jahr [23]; VKB = Vorklärbecken, SF = Sandfiltration.

sind gemäss [20] und [21] vor allem der Stromverbrauch der Belüftung der Biologie, die Lachgas-Emissionen aus der Biologie und der Schlammverbrennung sowie Methan-Emissionen in der Kanalisation, dem Vorklärbecken und aus nicht-abgedeckten Schlammstapeln relevant (Fig. 4). Eine grobe Abschätzung hat ergeben, dass diese Prozesse mit Verbraucherstrommix Schweiz total etwa 175 g CO₂-Äquivalente pro Einwohner und Tag verursachen, was gut 1% der Schweizer CO₂-Emissionen entspricht. Der Anteil der Spurenstoffelimination an den gesamten Treibhausgasemissionen einer ARA liegt somit zwischen 4% für Ozon und 20% für PAK-Verfahren. Die Spurenstoffelimination spielt folglich eine untergeordnete Rolle bei den Gesamtemissionen einer ARA.

VERGLEICH MIT BETRIEBSDATEN REALISierter ANLAGEN

Der Vergleich der modellierten Treibhausgasemissionen für die Modell-Spurenstoff-Stufe mit Betriebsdaten gross technischer PAK-Anlagen ist in Figur 5 und derjenige mit Ozonanlagen in Figur 6 dargestellt.

PAK-Anlagen

Basierend auf Betriebsdaten der Jahre 2017 (A.1) und 2018 (A.2) weist ARA A tendenziell höhere Treibhausgasemissio-

nen auf als die Modell-Spurenstoff-Stufe. Eine Erklärung dafür ist das stark industriell geprägte Einzugsgebiet, weshalb das Abwasser erhöhte DOC-Frachten aufweist, was zu einem erhöhten PAK-Verbrauch führt. Zudem ist bei dieser ARA eine Frischkohle auf Braunkohlebasis im Einsatz, die höhere Treibhausgasemissionen verursacht als die model-

lierte Steinkohle. Die ARA B hat einen geringeren CO₂-Fussabdruck, weil deren PAK-Verbrauch tiefer ist als derjenige der Modell-Spurenstoff-Stufe. Der CO₂-Fussabdruck der Aktivkohle, die auf der ARA C verwendet wird, ist niedriger als derjenige einer frischen Steinkohle. Zudem weist die ARA C eine vergleichsweise tiefe DOC-Konzentration im Zulauf zur PAK-Stufe auf. Deshalb ist der CO₂-Fussabdruck dieser PAK-Anlage sehr niedrig.

Ozonanlagen

Die untersuchten drei grosstechnischen Ozonungen verursachen tiefere Treibhausgasemissionen als die Modell-Spurenstoff-Stufe. Dies liegt teilweise an geringeren Ozondosen, beispielsweise infolge optimierter Steuerung/Regelung, an tieferen Konzentrationen an gelösten organischen Substanzen (DOC) und Nitrit oder am geringeren Stromverbrauch der Nachbehandlung.

Stromverbräuche

In Tabelle 3 sind die Stromverbräuche der realisierten Anlagen aufgeführt, damit ein direkter Vergleich mit den Modell-Annahmen (s. letzte Spalte) möglich ist. Die Daten der grosstechnischen Umsetzungen zeigen, dass der Stromverbrauch von PAK- und Ozonanlagen ohne Nachbehandlung in einem ähnlichen Bereich bei 0,02-0,03 kWh/m³ liegt, also nahe den Annahmen für PAK. Dies ist erstaunlich, da bisher für Ozonungen der dreifache

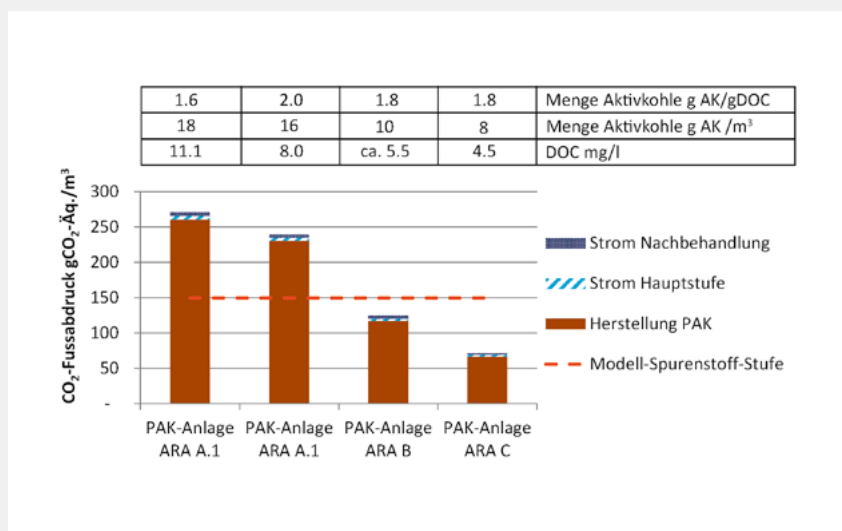


Fig. 5 Zusammensetzung des CO₂-Fussabdrucks grosstechnischer Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination mit dem Ulmer-Verfahren (ARA A und B) und einer PAK-Dosierung vor die Sandfiltration (ARA C) in der Schweiz, aus jährlichen Betriebsdaten 2017 (A.1) und 2018 (A.2) resp. Daten des repräsentativen Monats Oktober 2019 (ARA C, da erst seit 2019 in Betrieb). Systemgrenze und Annahme Strommix gemäss Figur 1, bezogen auf total behandelte Wassermenge der ARA.

Stromverbrauch von PAK-Anlagen erwartet wurde. Die Annahme zum Stromverbrauch der Filtration inklusive Hebewerk von 0,03 kWh/m³ stimmt hingegen gut mit den beobachteten Werten überein. Der Anteil des Stromverbrauchs der Spurenstoffelimination inklusive Hebewerk und Filtration an der gesamten ARA beträgt bei den aufgeführten Beispielen zwischen 5 und 25%, was weniger ist als erwartet. Das Modell ermöglicht nicht nur Vergleiche mit Daten grosstechnischer Anlagen, sondern auch die Simulation verschiedenster Optimierungsmassnahmen, um den CO₂-Fussabdruck zu senken. Diese sind im nächsten Abschnitt enthalten.

MASSNAHMEN ZUR REDUKTION DES CO₂-FUSSABDRUCKS

Die Spurenstoffelimination leistet einen wichtigen Beitrag zum Gewässerschutz. Das geeignete Verfahren dafür ist an jedem Standort individuell zu bestimmen. Der Treibhauseffekt kann dabei in die Bewertung der Verfahren einfließen, ist jedoch nicht das entscheidende Kriterium. Wie die vorhergehenden Abschnitte gezeigt haben, erhöht jedes der Verfahren zur Spurenstoffelimination den CO₂-Fussabdruck einer ARA. Die Betreiber sollten daher versuchen, diesen für ihr Verfahren so gering wie möglich zu halten. Für sie bieten sich am meisten Möglichkeiten zur Optimierung, wenn sie die Spuren-

stoffelimination zusammen mit den restlichen Reinigungsstufen betrachten [17]. Die folgenden Abschnitte beinhalten die Resultate der Modellierung verschiedener Massnahmen bei Verfahren mit PAK, GAK und Ozon und zeigen, welche theoretisch den grössten Einsparungseffekt bieten. Ob diese Massnahmen im Einzelfall umsetzbar sind, ist zu prüfen.

WIRKUNGSVOLLSTE MASSNAHMEN PAK

Figur 7 zeigt die Resultate der Modellierung von fünf Optimierungsmassnahmen für PAK-Verfahren und vergleicht diese mit der Modell-Spurenstoff-Stufe aus Figur 3. Die wirkungsvollsten Massnahmen werden im Folgenden beschrieben.

PAK aus erneuerbarem Rohstoff oder PAK mit hohem Anteil an Reaktivat
 Eine PAK aus einem erneuerbaren Rohstoff wie Holz reduziert den CO₂-Fussabdruck der PAK-Stufe um gut 40%. Im Projekt *Empyrion* zeigte sich, dass solche Holz-PAK eine ähnliche Leistung haben können wie etablierte PAK-Produkte [24]. Zudem führt die Eawag gegenwärtig eine breit angelegte Untersuchung der Eliminationsleistung von kommerziell erhältlichen, erneuerbaren PAK-Produkten durch (Bericht folgt auf *micropoll.ch*). Von einer solchen PAK könnten ARA-Betreiber theoretisch beinahe doppelt so viel dosieren, bis der totale CO₂-Fussabdruck der Steinkohle-PAK-Anlage erreicht ist. Auch eine PAK mit 50% Reaktivat hat einen etwa gleich grossen Effekt bezüglich CO₂-Reduktion wie eine erneuerbare PAK. Aber dabei besteht die Schwierigkeit, dass viele Hersteller den Reaktivat-Anteil häufig nicht genau angeben. Falls die Möglichkeit besteht, PAK mit noch genügend hoher Reinigungsleistung aus einem anderen Einsatzbereich wie der

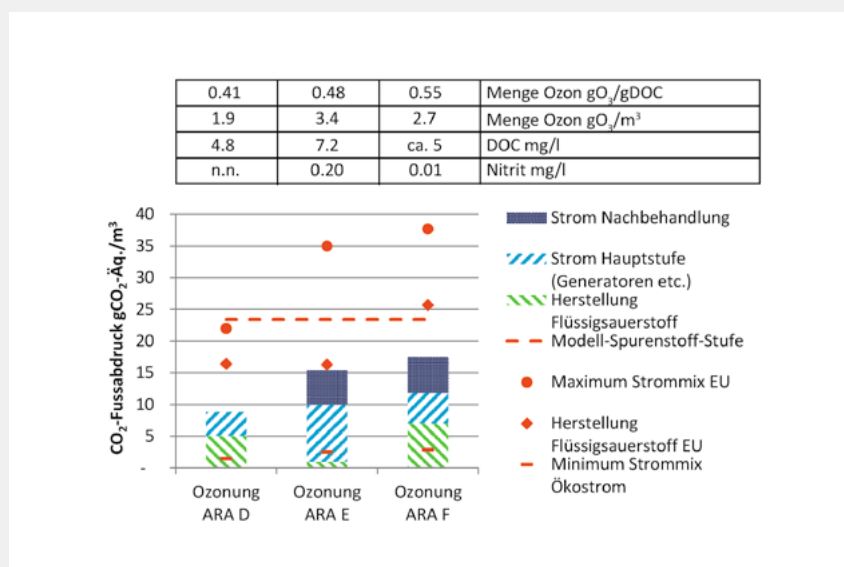


Fig. 6 Zusammensetzung des CO₂-Fussabdrucks von grosstechnischen Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination mit Ozon in der Schweiz, aus jährlichen Betriebsdaten 2018 oder 2019. Systemgrenze und Annahme Strommix aus Figur 1, bezogen auf total behandelte Wassermenge der ARA, ARA D muss das Abwasser direkt vor der Ozonung nicht heben und der Betrieb der Filtration benötigt keinen Strom, ARA E produziert 90% des Sauerstoffs auf der ARA; blau = Generatoren und VPSA, grün = extern produziertes LOX (Flüssigsauerstoff).

Energieverbrauch	Einheit	ARA A.1 (PAK)	ARA A.2 (PAK)	ARA B (PAK)	ARA C (PAK)	ARA D (Ozon)	ARA E (Ozon)	ARA F (Ozon)	Annahmen Modell
Hauptstufe Spurenstoffelimination gemäss Fig. 1	kWh/m ³	0,030	0,026	0,017	0,018*	0,021	0,026 / 0,049 inkl. VPSA	0,020	0,020 für PAK 0,060 für Ozon
Nachbehandlung gemäss Fig. 1	kWh/m ³	0,025	0,022	0,026	0,011**	-	0,030***	0,024	0,030
Anteil Spurenstoffelimination an gesamter ARA	%	20	20	11	18	5	25	k. A.	5–30 (ohne Filtration)

Tab. 3 Stromverbrauch auf der ARA, Betriebsdaten grosstechnischer Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination in der Schweiz. Systemgrenze Figur 1, bezogen auf total behandelte Abwassermenge der ARA, VPSA = Vakuum-Druckwechsel-Adsorption zur Herstellung von Sauerstoff auf der ARA, ARA D muss das Abwasser direkt vor der Ozonung nicht heben und der Betrieb der Filtration verbraucht keinen Strom, ARA C ist erst seit Januar 19 in Betrieb: Schätzung gemäss Betriebserfahrung eines repräsentativen Monats; *zusätzlich Hebewerk, **ohne Hebewerk, ***zusätzlich Lüftung und Kühlung.

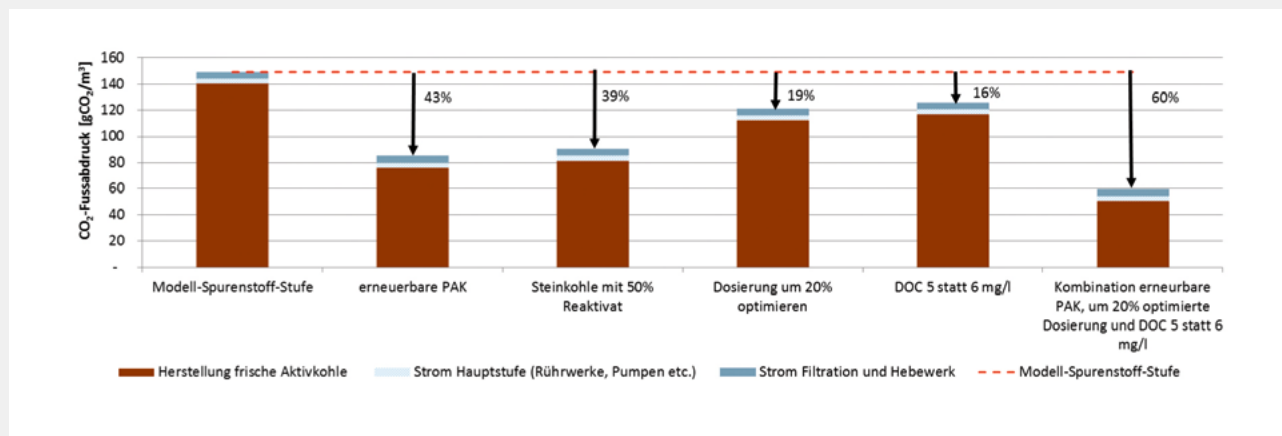


Fig. 7 Modellierter CO₂-Fussabdruck für PAK-Anlagen mit den Annahmen aus Tabelle 2 und Systemgrenze in Figur 1 sowie verschiedene Massnahmen zur Reduktion des Treibhauseffekts.

Trinkwasseraufbereitung weiter zu nutzen, kann auch dies den CO₂-Fussabdruck senken.

PAK-Dosiermenge minimieren

Eine Optimierung der spezifischen Dosiermenge einer Steinkohle-PAK um 20% bei gleichbleibender Reinigungsleistung reduziert den CO₂-Fussabdruck um beinahe 20%. Dies erreichen ARA-Betreiber, indem sie beispielsweise mit Schüttelversuchen eine für ihr Abwasser passende PAK mit hoher Leistung wählen [25] und bedarfsgerecht dosieren.

Zudem spielt die Verfahrensvariante eine Rolle, denn Verfahren mit Rückführung der PAK in die Biologie weisen eine höhere PAK-Beladung auf, wodurch weniger PAK notwendig ist und zusätzlich die Ablaufkonzentration des DOC aus der Biologie gesenkt wird. Sollte sich in der Praxis zeigen, dass das Ulmer-Verfahren mit PAK-Sedimentation im Vergleich zur Dosierung vor die Sandfiltration oder in die Biologie markant tiefere Dosiermen-

gen erlaubt, könnte für dieses Verfahren das Umweltkriterium besser bewertet werden. Denn der Beckenbau schlägt sich grundsätzlich weniger im CO₂-Fussabdruck nieder als der Betriebsmittelverbrauch. Erste Betriebserfahrungen der ARA C aus Figur 5 deuten jedoch darauf hin, dass der PAK-Verbrauch beim Verfahren PAK-Dosierung vor die Sandfiltration vergleichbar mit den Ulmer-Verfahren ist. In diesem Fall hätte die PAK-Dosierung vor den Filter den Vorteil, dass keine Sedimentation nötig ist und dadurch der CO₂-Fussabdruck sinkt.

Falls eine Verringerung der DOC-Konzentration im Ablauf der Biologie von 6 mg/l auf 5 mg/l möglich ist, reduziert dies die notwendige PAK-Menge um einen Sechstel und senkt den CO₂-Fussabdruck um gut 15%. Erhöhte Konzentrationen an schlecht abbaubaren organischen Stoffen in stark industriell geprägten Abwässern wirken sich folglich nachteilig auf den CO₂-Fussabdruck von PAK-Anlagen aus. Es ist daher wesentlich, gemeinsam

mit Industrien Lösungen zur Behandlung der hochkonzentrierten Abwässer an der Quelle zu prüfen.

Wenn es möglich ist, eine erneuerbare PAK mit tieferem DOC im Zulauf zur PAK-Stufe sowie einer geringeren spezifischen Dosiermenge zu kombinieren, reduziert dies den CO₂-Fussabdruck im Vergleich zur Modell-Spurenstoff-Stufe um etwa 60%.

WIRKUNGSVOLLSTE MASSNAHMEN GAK

Die Resultate von vier Optimierungen bei GAK-Filtrationen im Vergleich zur Modell-Spurenstoff-Stufe sind in Figur 8 dargestellt. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Massnahmen mit dem grössten Effekt.

GAK aus erneuerbarem Rohstoff einsetzen Analog der PAK können ARA-Betreiber auch für GAK-Filtrationen den CO₂-Fussabdruck mit einem erneuerbaren Rohstoff um beinahe 40% reduzieren. Für GAK eignen sich harte Rohstoffe wie Kokosnuss-

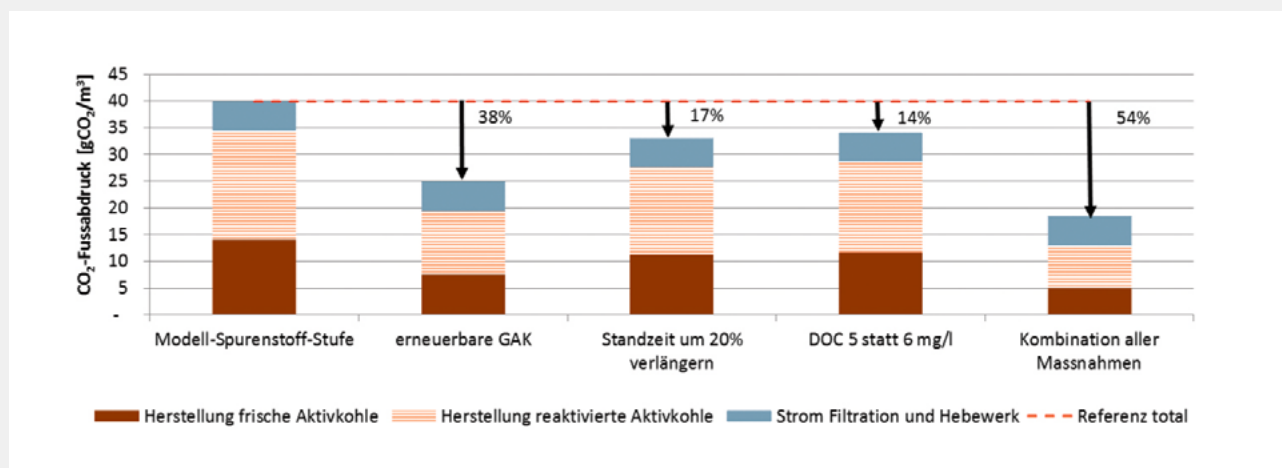


Fig. 8 CO₂-Fussabdruck der Modell-Spurenstoff-Stufe für GAK-Filtrationen mit den Annahmen aus Tabelle 2 und Systemgrenze in Figur 1 sowie verschiedene Massnahmen zur Reduktion der Umweltauswirkungen.

schalen, wobei gegenwärtig nur wenige Produkte und zu einem viel höheren Preis oder mit geringerer Reinigungsleistung auf dem Markt sind.

GAK-Verbrauch minimieren

Wenn ein Betreiber die Standzeiten der GAK bei gleicher Reinigungsleistung um 20% optimiert, sinkt der CO₂-Fussabdruck um rund 15%. Längere Standzeiten können beispielsweise durch die Wahl eines für das vorliegende Abwasser passenden GAK-Produkts mit hoher Leistung erreicht werden, wobei gegenwärtig noch kein standardisiertes Testverfahren dafür vorliegt. Eine andere Möglichkeit ist, die Filterzellen gestaffelt mit GAK unterschiedlichen Alters zu betreiben, die die Reinigungsleistung untereinander ausgleichen, damit die einzelnen Filterzellen längere Standzeiten aufweisen. Erfahrungen zur praktischen Umsetzung dieser gestaffelten Fahrweise gibt es bisher jedoch keine. Eine weitere Massnahme, um die Standzeiten zu verlängern, ist ein tiefer DOC im Zulauf zur GAK-Filtration, der allenfalls durch Massnahmen bei Industrien erreicht wird. Kann der DOC im Zulauf der GAK-Stufe von 6 auf 5 mg/l gesenkt werden, reduziert sich der CO₂-Fussabdruck um 15%.

Falls eine Kombination aller in *Figur 8* aufgeführten Massnahmen möglich ist, würde dies den CO₂-Fussabdruck für GAK-Verfahren im Vergleich zur Modell-Spurenstoff-Stufe um fast 55% senken. Da beim Verfahren GAK im Schwebbett auch eine reaktivierbare GAK zum Einsatz kommt, ist dessen CO₂-Fussabdruck wahrscheinlich ähnlich wie derjenige der GAK-Filtrationen. Bei Anlagen mit GAK im Schwebbett würde zwar allenfalls

die abschliessende Filtration wegfallen, jedoch käme der Stromverbrauch für die Dosierung, die Vorbereitung der GAK und eventuell eine interne Rezirkulation zur Aufrechterhaltung eines minimalen Durchflusses dazu. Zudem bestehen allgemein bei GAK-Verfahren Unsicherheiten zum Kohleverbrauch.

WIRKUNGSVOLLSTE MASSNAHMEN OZONUNG

Der CO₂-Fussabdruck von Ozonungen wird fast ausschliesslich durch Stromverbrauch verursacht. Davon fallen je etwa ein Drittel auf der ARA durch Hauptstufe und Nachbehandlung und ein Drittel bei der Produktion des Flüssigsauerstoffs an. *Figur 9* enthält die Resultate von fünf modellierten Optimierungsmassnahmen und vergleicht sie mit der Modell-Spurenstoff-Stufe aus *Figur 3*. Die nächsten zwei Abschnitte zeigen, mit welchen Massnahmen aus *Figur 9* am meisten CO₂ eingespart werden kann.

Ozon-Verbrauch minimieren

Kann ein ARA-Betreiber bei gleichbleibender Reinigungsleistung die Ozondosis von 0,5 g O₃/g DOC auf 0,4 g O₃/g DOC senken (s. [26] und [27]), reduziert sich der Treibhauseffekt der Spurenstoff-Stufe um gut 10%. Kann der DOC durch Massnahmen im Einzugsgebiet gesenkt werden, wirkt sich auch dies in einer ähnlichen Grössenordnung aus. Eine halbierte Nitrit-Konzentration im Ozonzulauf infolge ausreichender Belüftung führt bei der Modell-Spurenstoff-Stufe zu einem gut 5% kleineren CO₂-Fussabdruck. Als positiver Nebeneffekt würden sich dadurch die Lachgas-Emissionen verringern, was einen grossen Einfluss auf die gesamten Treibhausgasemissionen der ARA hat.

Stromverbrauch auf der ARA reduzieren

Ein um 20% reduzierter Stromverbrauch der Ozon-Generatoren beispielsweise aufgrund optimierter Fahrweise sowie der Filtration und des Hebwerks resultiert in gut 10% weniger Treibhauseffekt. [17] enthält Ideen für verschiedenste Einsparungen. Hier können auch die Planer viel beitragen, indem sie die Aggregate möglichst auf deren zukünftige Betriebsbedingungen auslegen.

Eine Kombination aller in *Figur 9* aufgeführten Massnahmen würde den CO₂-Fussabdruck einer Ozonung um etwa 35% reduzieren.

Grünen Strom beziehen

Wie *Figur 3* zeigt, können ARA-Betreiber die verursachten Treibhausgase ihrer Ozonung massiv reduzieren, indem sie auf der ARA Strom aus erneuerbaren Quellen einsetzen und sicherstellen, dass ihr Flüssigsauerstoff in der Schweiz produziert wird.

Weitere Einsparungen

Wenn im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung die Abluft der Ozonung in der Biologie weiter genutzt wird, anstelle der Abgabe in die Atmosphäre, muss dementsprechend weniger belüftet werden. Die ARA D kann auf diese Weise etwa 2% des gesamten Stromverbrauchs der ARA einsparen, was in diesem Beispiel 50% des Stromverbrauchs der Ozonanlage entspricht. Der Grund dafür ist, dass das Offgas beinahe ausschliesslich aus reinem Sauerstoff besteht. Dies reduziert den CO₂-Fussabdruck der Gesamtanlage deutlich. Ob eine solche Nutzung umsetzbar ist, ist im Einzelfall zu prüfen und bedingt beispielsweise geeignete

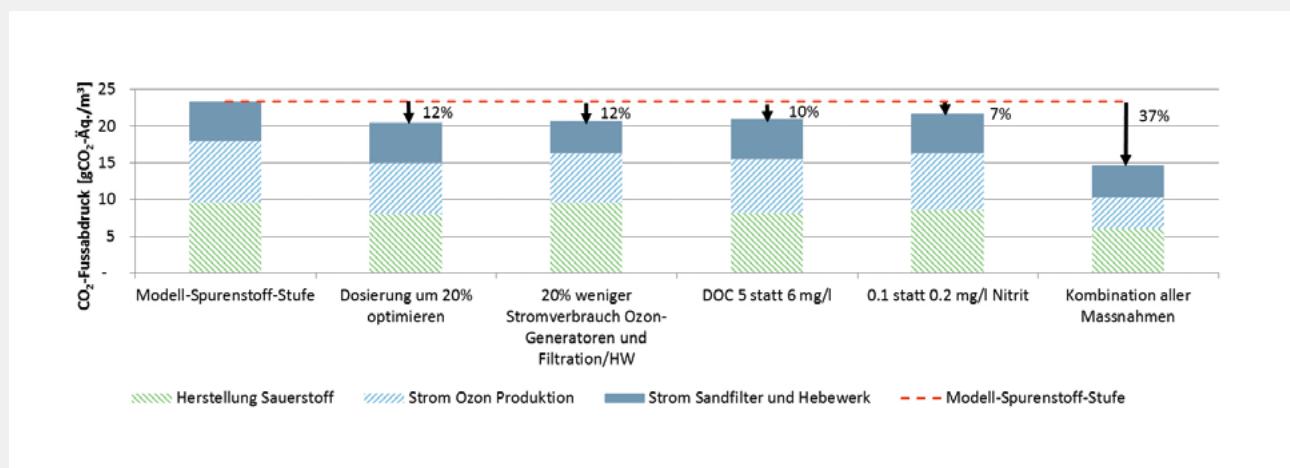


Fig. 9 CO₂-Fussabdruck der Modell-Spurenstoff-Stufe für Ozonanlagen mit den Annahmen aus Tabelle 2 und Systemgrenze in *Figur 1* sowie verschiedene modellierte Massnahmen zur Reduktion der Umweltauswirkungen; HW = Hebwerk.

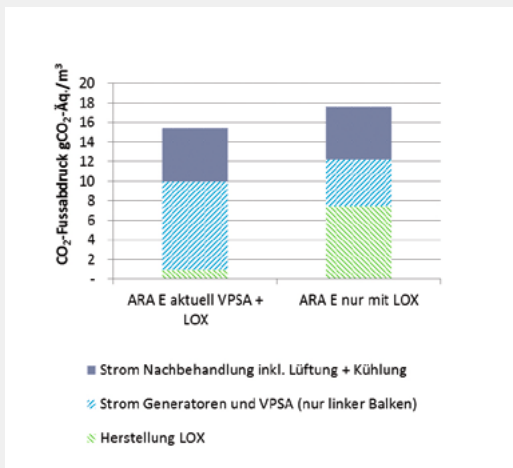


Fig. 10 Beispiel CO₂-Fussabdruck Ozonung der ARA E.

Vergleich aktuelle Situation (Sauerstoffherzeugung vor Ort für 88% des Sauerstoffs kombiniert mit Flüssigsauerstoff-Anlieferung für 12% des Sauerstoffs) mit hypothetischer Lösung mit lediglich Flüssigsauerstoff.

Belüftungssysteme und kurze Wege zwischen Ozonung und Biologie.

Einen anderen Ansatz verfolgt die ARA E. Sie nutzt die Abwärme der Generatoren im Winter, um das Betriebsgebäude zu heizen. Im Sommer wird diese Abwärme ans Abwasser abgegeben und indirekt über eine Abwasserwärmenutzung gebraucht, wobei sich dadurch die Abwassertemperatur nur geringfügig erhöht.

Zudem hat sich die ARA E für eine Kombination aus Vor-Ort-Sauerstoffherzeugung mit VPSA und Flüssigsauerstoff-Anlieferung zur Deckung der Spitzenverbräuche entschieden. In *Figur 10* sind sowohl der aktuelle CO₂-Fussabdruck der ARA E als auch eine hypothetische Lösung für diese ARA mit lediglich Flüssigsauerstoff dargestellt. Dabei ist berücksichtigt, dass der Betreiber der ARA E die Fahrweise der Generatoren mit Flüssigsauerstoff auf einen tiefen Gasfluss und eine hohe Ozonkonzentration anpassen würde, wobei die produzierte Ozonmenge gleich bleibt. Es wird davon ausgegangen, dass die Generatoren für die veränderte Fahrweise dieselbe Menge an Strom benötigen. Mit der

Kombination aus VPSA und Flüssigsauerstoff spart die ARA E 12% des CO₂-Fussabdrucks der Ozonung im Vergleich zu einer reinen Flüssigsauerstoff-Lösung. Weitere Überlegungen zur Vor-Ort-Erzeugung versus der Anlieferung befinden sich in [17].

FAZIT

Beim Treibhauseffekt handelt es sich nicht um das entscheidende Kriterium bei der Verfahrenswahl zur Spurenstoffelimination auf ARA, aber er kann in die Bewertung der Verfahren einfließen und Hinweise für Betriebsoptimierungen liefern.

Mithilfe des Modells für eine Spurenstoff-Stufe einer typischen Kläranlage in der Schweiz unter Berücksichtigung der Betriebsmittel haben wir gezeigt, dass die Ozonung unter den getroffenen Annahmen die geringsten Treibhausgasemissionen verursacht. Verglichen damit ist der CO₂-Fussabdruck von Pulveraktivkohle-Anlagen etwa um Faktor sechs und derjenige von granulierten Aktivkohlefiltern um Faktor zwei höher. Die GAK schneidet deutlich besser ab als die PAK, weil sie regenerierbar ist. Die Annahme zum Strommix hat einen grossen Einfluss auf den CO₂-Fussabdruck der Ozonung und diejenige zum Rohstoff auf die Aktivkohle. Folglich ist es wichtig, bei der Gegenüberstellung von Verfahren stets die getroffenen Annahmen diesbezüglich zu kommunizieren und verschiedene Szenarien zu rechnen.

Der Beitrag der Spurenstoffentfernung an die Treibhausgasemissionen der gesamten ARA liegt je nach Verfahren bei maximal einem Fünftel. Zudem verursachen ARA nur rund 1% der Schweizer Treibhausgasemissionen. Trotzdem sollen die zusätzlichen Emissionen möglichst gering ausfallen. Die Verringerung des Materialaufwands für die Infrastruktur hat dabei eine untergeordnete Bedeutung. Die grössten Einsparungen sind durch einen optimierten Betrieb der Spurenstoffelimination möglich.

Falls die Ablaufkonzentrationen der Biologie bezüglich DOC und Nitrit noch nicht optimiert sind, bieten sich für ARA-Betreiber prioritär mit der Prüfung der Reduktion des inerten DOC im Einzugsgebiet und ausreichender Belüftung der Biologie grosse Einsparungsmöglichkeiten für den CO₂-Fussabdruck der Spurenstoffelimination und gleichzeitig auch der Gesamtanlage. Bei Aktivkohle-Anlagen ist die Wahl einer PAK oder GAK aus erneuerbaren Rohstoffen oder mit hohem Reaktivat-Anteil die wirkungsvollste Massnahme. Eine optimierte Dosiermenge hat ebenfalls einen grossen Einfluss. Dies erreichen ARA-Betreiber beispielsweise, wenn sie ein PAK-Produkt mit hoher Reinigungsleistung für ihr Abwasser einsetzen sowie bedarfsgerecht dosieren. Bei Ozonungen können Betreiber mit einer Kombination aus minimiertem Ozonverbrauch und Optimierungen des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate wie Generatoren sowie der bewussten Wahl eines Ökostroms den CO₂-Fussabdruck reduzieren.

Erfreulich ist, dass bereits heute viele der grosstechnischen Anlagen zur Spurenstoffelimination in der Schweiz einen geringeren CO₂-Fussabdruck aufweisen, als bei der Modell-Spurstoff-Stufe erwartet. Und die Optimierungen gehen weiter, denn der tiefe Betriebsmittelverbrauch und der niedrigere Stromverbrauch führen nicht nur zu weniger Klimaerwärmung, sondern schlagen sich auch positiv in den Betriebskosten nieder. Damit lassen sich die beiden Ziele Gewässerschutz und Klimaschutz erfolgreich in Einklang bringen und ökonomisch vertretbar realisieren.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Kienle C. et al. (2015): «Ökotoxikologische Biotests – Anwendung von Biotests zur Evaluation der Wirkung und Elimination von Mikroverunreinigungen» *Aqua & Gas* 7/8, S. 18–26
- [2] Wunderlin P. et al. (2017): «Elimination von Mikroverunreinigungen auf ARA – Aktueller Stand der Verfahren und künftige Entwicklungen» *Aqua & Gas* 11 S. 60–70
- [3] Stamm C. et al. (2017): «Einfluss von Mikroverunreinigungen. Lebensgemeinschaften in Gewässern – Ergebnisse aus dem Projekt Ecolmpact» *Aqua & Gas* 6, S. 90–95
- [4] International Standardisation Organisation (2006): «ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework» Geneva, Switzerland
- [5] International Standardisation Organisation (2016):

DANK

- Pöyry: M. Fink, H. Werhonig; TBF: D. Bühler, Ch. Alder, Ch. Fux; Hunziker: A. Büeler, R. Moser, Th. Hug; Gujer: T. Rieck; InfraWatt/EnergieSchweiz: E.A. Müller, M. Vogelsanger
- ARA-Betreiber: Ch. Egli, P. Sonderegger, B. Bangarter, P. Holderregger, M. Schachtler, Ch. Abegglen; Eawag: M. Böhler, E. Morgenroth; ETH: S. Pfister
- VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»: P. Wunderlin, J. Grelot, gesamte Arbeitsgruppe

- «ISO 14044: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines» Geneva, Switzerland
- [6] Jekel M. et al. (2015): «Abschlussbericht IST4R Vergleich verschiedener Verfahrensvarianten der weitergehenden Abwasserreinigung zur Entlastung der Berliner Gewässer» TU Berlin
- [7] Jamhoury H. (2017): «Life Cycle Assessment of Micropollutants Removal in Wastewater Treatment Plants – Masterarbeit ETHZ»
- [8] Dazio M. (2011): «Lebenszyklus-Analysen für weitergehende Behandlungsmassnahmen zur Verminderung des Eintrags von Mikroverunreinigungen in die Umwelt – Bachelorarbeit FHNW»
- [9] Dinkel F. et al. (2015): «LCA of advanced wastewater treatment to remove micropollutants – LCM conference in Bordeaux» <https://carbotech.ch/cms/wp-content/uploads/LCA-micropollutants-Dinkel-LCM-Bordeaux-2015.pdf>
- [10] Rahman S. M. et al. (2018): «Comparative Life Cycle Assessment of Advanced Wastewater Treatment Processes for Removal of Chemicals of Emerging Concern» *Environmental Science and Technology*, Bd. 52, pp. 11346–11358
- [11] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): «IPCC – Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of IPCC» Geneva, Switzerland
- [12] Abegglen C., Siegrist H. (2012): «Mikroverunreinigungen aus kommunalen Kläranlagen – Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen» BAFU – Umwelt-Wissen
- [13] Remy C. (2019): «Dokumentation zum Berechnungstool für THG-Emissionen und Primärenergieverbrauch für Infrastruktur der vierten Reinigungsstufe und Herstellung bzw. Reaktivierung von Aktivkohle – VSA-Tool» Kompetenzzentrum Wasser Berlin, auf www.micropoll.ch
- [14] Messmer A., Frischknecht R. (2016): «Umweltbilanz Strommix Schweiz, 2014» i. A. des Bundesamtes für Umwelt
- [15] Abegglen C. et al. (2009): «Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf» i. A. BAFU und AWEL
- [16] VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» (2018): «Verfahrensüberblick zur biologischen Nachbehandlung bei der Ozonung» www.micropoll.ch/Berichte
- [17] Büeler A. et al. (2018): «Leitfaden 'Energie in ARA' Elimination Mikroverunreinigungen – Kapitel Energieeffizienz in MV-Anlagen» *InfraWatt*
- [18] VSA-Empfehlung (2018): «Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen» www.micropoll.ch
- [19] Moro A.; Lonza L. (2018): «Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles» *Transportation Research, Bd. Part D 64*, pp. 5–14
- [20] Wunderlin P. et al. (2013): «Lachgas-Emissionen aus ARA – Relevanz, Bildungswege und Reduktionsstrategien» *Aqua & Gas, Bd. Nr. 2*, pp. 54–59
- [21] Gruber W. et al.: «N₂O emission in full-scale wastewater treatment: Proposing a refined monitoring strategy» *Science of the Total Environment*, geplant.
- [22] Cunningham M.; Baier U. (2015): «Methanemissionen auf Kläranlagen» *Aqua & Gas, Bd. Nr.3*, pp. 60–62
- [23] Kind E.; Levy G. (2012): «Energieeffizienz und Energieproduktion auf ARA» im Auftrag des BAFU
- [24] Hagemann N. et al. (2019): «Aktivkohle – Made in Switzerland!» *Aqua und Gas, Bd. 1/19*, pp. 32–38
- [25] Böhler M. (2019): «Laborversuche zur Bestimmung der Reinigungsleistung von Pulveraktivkohle zur Entfernung von Mikroverunreinigungen auf Kläranlagen» www.micropoll.ch
- [26] Schachtler M.; Hubaux N. (2016): «BEAR- Innovative Regelstrategie der Ozonung» *Aqua & Gas, Bd. 5*, pp. 84–93
- [27] Hubaux N.; Schachtler M. (2016): «Mehrstufiger Ozoneintrag – LOD-Konzept» *Aqua & Gas, Bd. 11*, pp. 50–56

> SUITE DU RÉSUMÉ

représente respectivement presque 20% voire bien 25% de l'empreinte CO₂. Le reste est engendré par les ressources d'exploitation, à savoir l'ozone, le charbon actif et l'électricité. Les matériaux de construction jouent donc un rôle secondaire par rapport aux ressources d'exploitation. C'est pendant la phase d'exploitation qu'il est possible de réaliser les économies les plus efficaces.

Si la réduction du COD inerte dans les industries et une aération suffisante de la biologie permettent d'améliorer la qualité de l'effluent du traitement biologique concernant le COD et le nitrite, cela réduit la dose de charbon actif ou d'ozone et diminue ainsi massivement l'empreinte CO₂.

Par ailleurs, les exploitants de STEP peuvent aussi réduire les émissions de GES des installations au charbon actif en utilisant des produits provenant de matières premières renouvelables ou de produits réactivés et en diminuant la quantité de dosage, par exemple en utilisant un produit avec un haut rendement d'épuration et adapté aux eaux usées. En ce qui concerne les installations à l'ozone, ce sont les mesures réduisant la consommation d'ozone ou d'électricité qui ont l'impact le plus important sur les les émissions de GES. De plus, choisir délibérément une électricité verte engendre des économies élevées. En ayant recours à ces optimisations, les exploitants de STEP peuvent faire des économies d'exploitation supplémentaires.

WASSER ▼ BODEN ▼ LUFT
Analytische Untersuchungen und Beratung

envilab

ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT

ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
T 062 745 70 50, www.envilab.ch