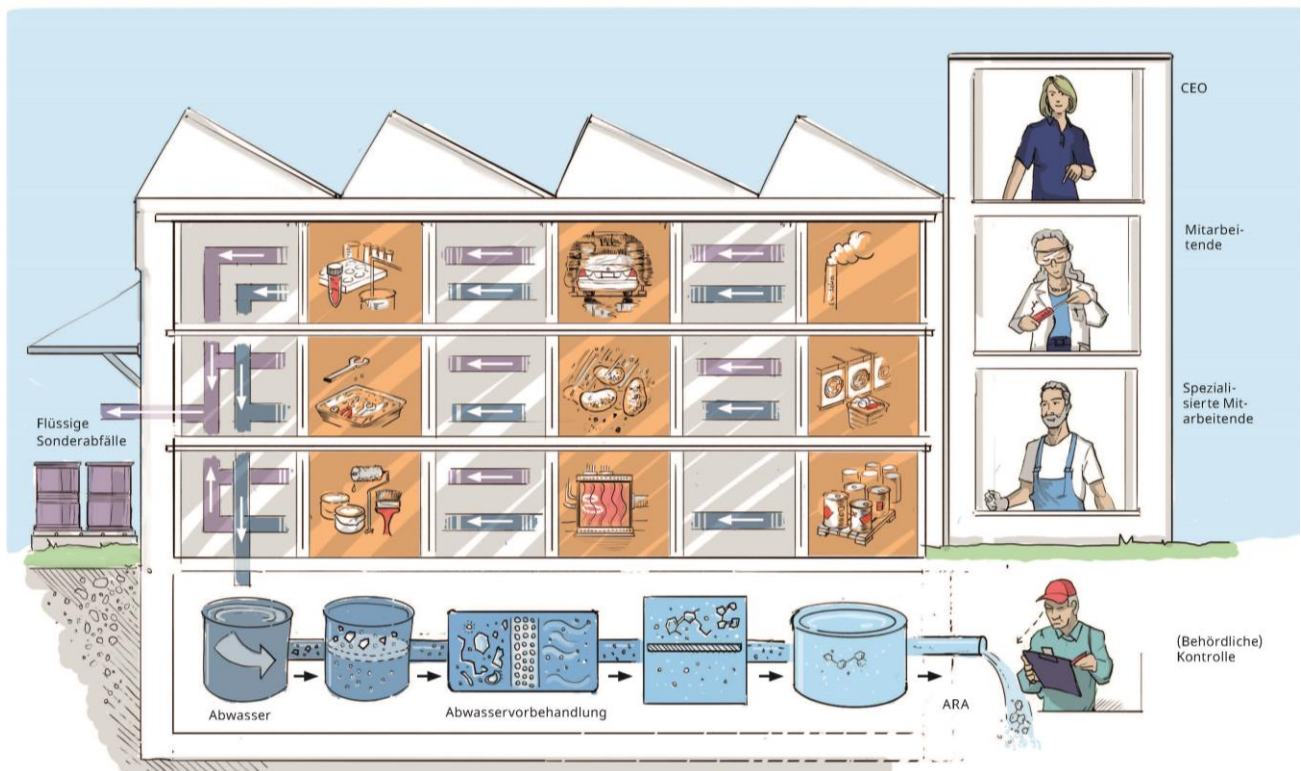


INDUSTRIEABWASSER UND DEREN BEHANDLMÖGLICHKEITEN



Stand: 03. November 2022

Impressum

Die vorliegende Publikation wurde mit aller Sorgfalt und nach bestem Gewissen erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität kann der VSA jedoch keine Gewähr übernehmen. Haftungsansprüche wegen Schäden materieller oder immaterieller Art, welche durch die Anwendung der Publikation entstehen können, werden ausgeschlossen.

Autoren

Pascal Wunderlin, VSA Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen», Glattbrugg
Fabienne Eugster, VSA Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen», Glattbrugg

Erarbeitung der fachlichen Grundlagen zu den Verfahren

F. Rey, EnviroChemie AG, Eschenbach
N. Siegenthaler, EnviroChemie AG, Eschenbach

Expertengruppe

C. Arnold, Syngenta, Monthey (vorher Lonza, Visp / scienceindustries, Zürich)
A. Buss, AUE, Baselland, Liestal
S. Bitterwolf, Kuster+Hager Ingenieurbüro AG, St. Gallen
R. Däppen, ehemals BASF Schweiz AG, Basel
P. Foa, TBF + Partner AG, Lugano
H. Färber, Färber & Schmid AG, Dietikon
R. Kottelat, ESCO conseil, Yverdon-les-Bains
L. Kren, scienceindustries, Zürich
S. Lehmann, BAFU, Bern
M. Lambert, CSD Engineers, Lausanne
A.-K. McCall, OST, Rapperswil
B. Mancini, BVU, Aarau
M. Mettler, AfU, Herisau
J. Muff, ecoSign, Rheinfelden
M. Mattle, Holinger AG, Lausanne
M. Ratkovic, EnviroChemie AG, Eschenbach
J.M. Stoll, OST, Rapperswil
M. Schärer, BAFU, Bern
Th. von Kürten, AFRY Schweiz AG, Zürich
Th. Wintgens, RWTH, Aachen (vorher FHNW, Muttentz)
S. Zimmermann-Steffens, BAFU, Bern

Danksagung

Ein grosses Dankeschön geht an alle Personen, die in irgendeiner Form zu diesem Bericht beigetragen haben.

Herausgeber

Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
Association suisse des professionnels de la protection des eaux
Associazione svizzera dei professionisti della protezione delle acque

Titelbild, Illustrationen

Zeichenfabrik, Roland Ryser, Zürich

Bezugsquelle

VSA, Europastrasse 3, Postfach, CH-8152 Glattbrugg,

Telefon 043 343 70 70, sekretariat@vsa.ch, www.vsa.ch

Zitierung

Wunderlin, P., Eugster, F. (2022). Industrieabwasser und deren Behandlungsmöglichkeiten. Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Glattbrugg.

INHALT

Zusammenfassung	6
1 Hintergrund	7
1.1 Verschiedene Typen von Abwässern fallen an	7
1.2 Verschiedene Behandlungsarten notwendig	7
1.3 Benötigen Sie Unterstützung bei der Auswahl von Abwasserbehandlungsverfahren?	7
2 Mechanisch-physikalische Verfahren	9
2.1 Mineralölabscheider (Koaleszenz-/Schwerkraftabscheider)	9
2.2 Emulsionsspaltung	10
2.3 Fettabscheider	11
2.4 Schlammfang, Schlammstammler	11
2.5 Absetzbecken	11
2.6 Siebung	12
2.7 Filtration	12
2.8 Flotation	13
2.9 Membranfiltration	13
2.10 Adsorption	14
2.11 Verdampfung/Rektifikation	14
2.12 Flüssig-flüssig Extraktion	15
2.13 Verbrennen des Abwassers	16
2.14 Ionentauscher	16
2.15 Strippen	16
2.16 Elektrolyse/Elektrodialyse	17
2.17 Inaktivierung von biologisch kontaminiertem Abwasser	17
Mechanisch-physikalische Verfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Zielstoffe	19
3 Chemische Verfahren	20
3.1 Neutralisation	20
3.2 Fällung (mit Umkomplexierung)	21
3.3 Flockung	22
3.4 Oxidation	22
3.5 Reduktion	23
Chemische Verfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Zielstoffe	25
4 Biologische Verfahren	26
4.1 Aerobe Abwasserbehandlung	27

4.2	Anaerobe Abwasserbehandlung	28
	Biologische Verfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Zielstoffe	29
5	Verfahrensübergreifende Aspekte	30
6	Gängige Praxis	31

ZUSAMMENFASSUNG

Industrie- und Gewerbebetriebe reinigen ihre Abwässer bevor sie diese in die Kanalisation einleiten. Das ist notwendig, um die gesetzlichen Vorgaben einzuhalten und die Gewässer zu schützen. Man spricht hier von einer Behandlung an der Quelle. Das hat den Vorteil, dass die zu eliminierenden Stoffe in konzentrierter Form vorliegen, was eine effiziente und kostengünstige Behandlung ermöglicht.

Es ist wichtig, dass die Betriebe den aktuellen Stand der Technik anwenden. Dieser ist aber nicht schweizweit dokumentiert. Kommt dazu, dass die Behandlungsmöglichkeiten vielfältig sind und die Auswahl im Einzelfall sehr anspruchsvoll ist. Eine Hilfestellung dazu bietet dieser Bericht und richtet sich insbesondere an Betriebe und Behörden.

Der Bericht unterscheidet – basierend auf ihrer Wirkungsweise – zwischen mechanisch-physikalische Verfahren, chemischen Verfahren und biologischen Verfahren. Für jedes Verfahren beschreibt der Bericht deren Funktionsweise, den Betriebsaufwand und gibt Beispiele für typische Branchen, wo das Verfahren zum Einsatz kommt. Ebenfalls schätzt er für jedes Verfahren ein, wie gut es die Abwasserinhaltsstoffe eliminiert. Mitbetrachtet wurden auch die organisch-synthetischen Stoffe – die sogenannten Mikroverunreinigungen.

Verschiedenste Verfahren eliminieren Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser und kommen in einzelnen Betrieben zum Einsatz. In den meisten Betrieben ist deren Abwasserbehandlung aber nicht auf Mikroverunreinigungen ausgerichtet¹. Künftig sind daher auch Mikroverunreinigungen miteinzubeziehen, insbesondere in die Planung, Auslegung, die Überwachung sowie bei der Optimierung der betrieblichen Abwasserbehandlung. Auch ist es wichtig, dass die Industrie- und Gewerbebetriebe diese Anlagen sachgemäss betreiben, unterhalten und den Reinigungseffekt mit geeigneten Methoden überwachen.

¹ Wunderlin, P., Gulde, R. (2022). Situationsanalyse «Stoffeinträge aus Industrie und Gewerbe in Gewässer». VSA, Glattbrugg.

1 HINTERGRUND

Industrie- und Gewerbebetriebe reinigen ihre Abwässer bevor sie diese in die Kanalisation einleiten. Das ist notwendig, um die gesetzlichen Vorgaben einzuhalten und die Gewässer zu schützen. Die Behandlungsmöglichkeiten sind jedoch vielfältig und die Auswahl im Einzelfall ist sehr anspruchsvoll.

Der vorliegende Bericht dient als Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Behandlungsmöglichkeiten im Einzelfall und richtet sich insbesondere an Betriebe und Behörden.

1.1 Verschiedene Typen von Abwässern fallen an

In Industrie- und Gewerbebetrieben fallen verschiedene Typen von Abwässern an. Die Betriebe erfassen diese Abwässer und bewerten sie anhand der gesetzlich geregelten Inhaltsstoffe sowie anhand allfälliger interner Vorgaben. Wichtige Kriterien, die zur Abwassereinstufung dienen, sind:

- Wie hoch ist der Verschmutzungsgrad?
- Wie ist die stoffliche Zusammensetzung: Sind organische Stoffe enthalten? Sind anorganische Stoffe enthalten?
- Beeinträchtigt oder stört das Abwasser den Betrieb der kommunalen Kläranlage?
- Was sind die gesetzlichen und internen Vorgaben?
- Ist eine betriebsinterne Wasserwiederverwendung möglich?

Mithilfe dieser Einstufung legen die Betriebe gemeinsam mit den zuständigen Behörden fest, welche Abwässer wie zu behandeln sind.

1.2 Verschiedene Behandlungsarten notwendig

In den meisten Fällen leiten die Betriebe ihr Abwasser in die öffentliche Kanalisation ein. Es erfolgt somit eine zusätzliche Abwasserbehandlung durch eine kommunale Kläranlage. Bei nicht verschmutzten Abwässern besteht die Möglichkeit diese zu versickern oder direkt ins Gewässer einzuleiten. Das muss allerdings die zuständige Behörde im Einzelfall prüfen und bewilligen.

Betriebe behandeln ihre Abwässer bevor sie diese in die öffentliche Kanalisation einleiten, wenn sie die Anforderungen gemäss Anhang 3.2. der GSchV nicht einhalten. Man spricht in solchen Fällen von einer sogenannten «Behandlung an der Quelle». Die Abwasserinhaltsstoffe sind an dieser Stelle noch nicht mit anderen Abwässern verdünnt und mit anderen Abwasserinhaltsstoffen vermischt. Es ist daher effizient und kostengünstig die Abwässer an der Quelle zu behandeln. Dabei ist wichtig, dass die Betriebe modernste Behandlungsverfahren einsetzen. Diese müssen dem sogenannten «Stand der Technik» entsprechen². Im Einzelfall ist es sehr anspruchsvoll eine Behandlungsart festzulegen, weil der Stand der Technik in der Schweiz nicht dokumentiert ist.

1.3 Benötigen Sie Unterstützung bei der Auswahl von Abwasserbehandlungsverfahren?

Dann sind Sie hier genau richtig. Denn der nachfolgende Text gibt eine Übersicht über die etablierten Behandlungsverfahren. Er geht insbesondere auf deren Funktionsweise ein und nennt wichtige Punkte, die es bei der Umsetzung zu beachten gilt. Für jede Behandlungsart ist zudem angegeben, welche Abwasserinhaltsstoffe sich damit eliminieren lassen (im Bericht als «Zielstoffe» bezeichnet). Ein spezifischer Fokus liegt bei den organisch-synthetischen Stoffen – den

² Der Stand der Technik gemäss Anhang 3.2 Ziffer 1 Abs. 2 GSchV meint ein bestimmtes technologisches Niveau mit einem fortschrittlichen Entwicklungsstand, der sich über die Zeit weiterentwickelt. Die technischen Verfahren müssen sich dabei in der praktischen Anwendung bewährt haben oder müssen in der Praxis sicher durchführbar sein. Zudem müssen die Verfahren wirtschaftlich tragbar sein. Das ist nicht identisch mit der individuellen betriebswirtschaftlichen Zumutbarkeit – d.h. die Umsetzung ist im Einzelfall zu beurteilen.

sogenannten Mikroverunreinigungen - welche in den Betrieben hergestellt, verarbeitet, eingesetzt oder entsorgt werden (siehe Box). Denn diese Stoffe sind künftig noch stärker bei der Abwasserbehandlung zu berücksichtigen³.

Der Bericht lehnt sich inhaltlich an die Unterlagen des VSA-Kurses Modul 2 «Industrieabwässer und Industrieabfall» an⁴. Ergänzend dazu erfolgte ein Workshop mit Expertinnen und Experten aus kantonalen Fachstellen, der Industrie sowie aus Planungs- und Beratungsbüros, um die Inhalte weiter zu konkretisieren. Für weiterführende und vertiefende Informationen zu den einzelnen Behandlungsarten ist auf die Fachliteratur zu verweisen (z.B. ^{5,6,7}).

Box: Was sind Mikroverunreinigungen?

Der Bericht fokussiert auf die Verunreinigung der Gewässer mit organisch-synthetischen Stoffen aus Industrie- und Gewerbebetrieben. Damit sind Chemikalien gemeint, die in Betrieben hergestellt, verarbeitet, eingesetzt oder entsorgt werden. Diese Stoffe können mit dem gereinigten Betriebsabwasser über die ARA oder bei Starkregenereignissen auch über die vorhandenen Kanalisationsentlastungen in die Gewässer gelangen. Dort kommen diese Stoffe in geringen Konzentrationen vor: im Mikrogramm pro Liter ($\mu\text{g/L}$)- oder Nanogramm pro Liter (ng/L)-Bereich. Daher heissen diese Stoffe «Mikroverunreinigungen» oder «organische Spurenstoffe». In diesem Bericht wird der Begriff «Mikroverunreinigungen» verwendet.

³ Wunderlin, P., Gulde, R. (2022). Situationsanalyse «Stoffeinträge aus Industrie und Gewerbe in Gewässer». VSA, Glattbrugg.

⁴ VSA Kurs F2, Betrieb und Unterhalt komplexer Abwasservorbehandlungsanlagen. VSA-Kurse Modul 2 «Industrieabwässer und Industrieabfall», Tschuppert E., Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Juni 2005.

⁵ Hartinger Handbuch Abwasser- und Recyclingtechnik, 3., vollständig überarbeitete Auflage, 2017.

⁶ Stand der Abwassertechnik in verschiedenen Branchen: Forschungsbericht 102 06 226, Band 1, Karl-Ulrich Rudolph, Karl-Erich Köppke, Joachim Korbach, Umweltbundesamt, 1995.

⁷ Förtsch und Meinholz (2014). Handbuch betrieblicher Gewässerschutz, ISBN 978-3-658-03323-1.

2 MECHANISCH-PHYSIKALISCHE VERFAHREN

Mechanisch-physikalische Verfahren kommen dann zum Einsatz, wenn die zu eliminierenden Stoffe sich über Eigenschaften wie beispielsweise Dichte oder Korngrösse einfach aus dem Abwasser abtrennen lassen. Die Stoffe werden dabei nicht verändert oder zerstört. Vielfach wird mit mechanisch-physikalischen Verfahren das Abwasser vorbehandelt, weil die auf diese Weise eliminierten Stoffe sowohl die Kanalisation wie auch nachfolgende Behandlungsschritte negativ beeinträchtigen können. Häufig werden mechanisch-physikalische Verfahren mit chemischen Verfahren (siehe Kapitel 3) in der industriellen Abwasservorbehandlung kombiniert. So ist beispielsweise einer Fällung und Flockung eine Stufe zur Abtrennung der Fällungs-/Flockungsprodukte vom Abwasser nachzuschalten (z.B. Kammerfilterpresse, Bandfilter).

Als mechanisch-physikalische Verfahren werden in diesem Artikel die nachfolgend aufgelisteten Verfahren beschrieben (siehe auch Tab. 1).

Elimination von Fetten, Ölen und Kohlenwasserstoffen:

- Ölabscheider (Koaleszenz- /Schwerkraftabscheider)
- Emulsionsspaltung
- Fettabscheider

Elimination von Partikeln und Feststoffen, sowie den daran sorbierten Stoffen:

- Absetzbecken/Schlammfang
- Siebung
- Filtration
- Flotation

Verfahren mit einer Breitbandwirkung:

- Membranverfahren (Nanofiltration)
- Adsorption
- Verdampfung/Rektifikation
- Flüssig-flüssig Extraktion
- Verbrennen des Abwassers

Weitere, bei der betrieblichen Abwasserbehandlung wenig verbreitete Verfahren:

- Ionentauscher
- Strippung
- Elektrolyse, Elektrodialyse
- Thermische Inaktivierung von Abwasser

2.1 Mineralölabscheider (Koaleszenz-/Schwerkraftabscheider)

Mit einem Mineralölabscheider werden wasserunlösliche, aufschwimmende Substanzen wie Kohlenwasserstoffe, Öle und Fette sowie Benzin und Diesel vom Abwasser abgetrennt. Ein Koaleszenzabscheider hat grundsätzlich eine höhere Reinigungsleistung als ein Ölabscheider. Diese beiden Verfahren sind effizient und einfach im Betrieb, und liefern einen sehr wichtigen Beitrag für den Gewässerschutz.

Im Ölabscheider werden die Stoffe (Leichtflüssigkeiten wie Benzin und andere Mineralöle) anhand ihrer geringeren Dichte vom Abwasser abgetrennt, wobei freies Öl, welches je nach Abwasserherkunft und Prozess im Abwasser auftreten kann, möglichst an der Quelle zurückgehalten werden muss. Da die abzutrennenden ölhaltigen Stoffe eine geringere Dichte aufweisen als Wasser sammeln sich diese Flüssigkeiten im strömungsberuhigten Abscheidebehälter an der Abwasseroberfläche an. Das auf diese Weise abgeschiedene Öl muss je nach Anfall abgepumpt werden. Das Öl-freie Wasser fließt über den Auslauf in die Kanalisation. Je nach Typ und Ausrüstung des Mineralölabscheiders wird der Ablauf automatisch verschlossen, sobald sich eine gewisse Menge an Mineralöl im Abscheider befindet. Dies ist beispielsweise bei Tankstellen notwendig, damit bei einem Austritt von grösseren Mengen an Treibstoffen diese nicht in die Kanalisation gelangen können.

Koaleszenzabscheider verfügen über einen höheren Abscheidegrad als normale Mineralölabscheider. Er wird üblicherweise im hintersten Teil des Abscheiders installiert, so dass das restölhaltige Abwasser diesen durchströmt. Beim Durchfließen des Koaleszenz-Filters lagern sich Öltröpfchen auf dem Filtermedium ab. Kleine Öltröpfchen, die über zu wenig Auftrieb verfügen, bleiben am Koaleszenzfilter hängen und verbinden sich mit weiteren vorbeiströmenden Tröpfchen (Koaleszieren). Sind genügend kleine Öltröpfchen miteinander verschmolzen steigen diese Öltröpfchen an die Abwasseroberfläche auf, und können zusammen mit den anderen abgeschiedenen Flüssigkeiten aus dem System abgepumpt werden. Der Einsatz von Tensiden stört die Effizienz des Koaleszenzabscheiders, weil durch die Tenside die abzuscheidenden Stoffe in der Lösung stabilisiert werden. Bei beiden Verfahren ist zu beachten, dass bei stabilen Emulsionen die Stoffe schwierig zu eliminieren sind.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> Leichtflüssigkeiten wie Benzin, (Mineral-)Öle und Fette und den enthaltenen Substanzen wie aromatische, aliphatisch, chlorierte Kohlenwasserstoffe
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> Schlammfang/Sedimentation, Emulsionsspaltung (wenn die Stoffe emulgiert vorliegen)
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> Als gering eingeschätzt; Weiterbehandlung/Entsorgung der zurückgehaltenen Stoffe/Flüssigkeiten
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> Werkhöfe, Entsorger, Auto-/Garagengewerbe, Tankstellen

2.2 Emulsionsspaltung

Die Emulsionsspaltung wird eingesetzt, um emulgierte Stoffe, wie Öle oder Lösungsmittel, aus dem Abwasser zu entfernen. Dazu wird ein Spaltpulver – unter anderem bestehend aus Bentonit und einem Flockungshilfsmittel (Polyacrylat) – dem Abwasser beigemischt. Dies führt zur Bildung von Schlammflocken, welche die emulgierten Stoffe binden und aus dem Abwasser entfernen. Wird das Abwasser zusätzlich mit Aktivkohle behandelt lassen sich auch gelöste Biozide effektiv eliminieren⁸. Die Emulsionsspaltung wird in Kompaktanlagen – sogenannte Spaltanlagen – kommerziell angeboten. Eine klassische Ausführung besteht aus einem Reaktor, in welchem eine Fällung und Flockung und teilweise zusätzlich eine Neutralisation durchgeführt wird. Die Feststoffe werden über einen nachgeschalteten Filter (z.B. Bandfilter, Sackfilter, Schrägklärer) zurückgehalten.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> Emulgierte Stoffe (Öle, Kohlenwasserstoffe, Lösungsmittel, Farben), z.T. Metalle (wo eine pH-Erhöhung durch die Spaltpulverzugabe ausreichend ist für die Metall-Fällung)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> Fällung/Flockung, Neutralisation, Feststoffabtrennung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> Als gering eingeschätzt; Weiterbehandlung/Entsorgung der abgetrennten Stoffe; periodisches Nachfüllen des Spaltpulvers
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> Malerbetriebe, Garagen-/Auto-/Transportgewerbe (bei Motoren-/Chassis-Reinigung), Farben-/Lackhersteller, Trowalisierbetriebe

⁸ Burkhardt, M., Englert, A. (2016). Verfahrensklä rung zur Behandlung von Abwasser der Farb- und Putzhersteller (FARBAB). Bericht für AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie, Luft. HSR Rapperswil, S. 34.

2.3 Fettabscheider

Ein Fettabscheider dient dem Rückhalt von Fett- und Ölteilen tierischen und pflanzlichen Ursprungs. Diese können sich an den kalten Rohrleitungswänden absetzen und zu Verkrustungen und infolgedessen zu Rohrverstopfungen führen. Bei einer längeren Verweildauer von Ölen und Fetten in den Kanälen kann es zu unangenehmen Geruchsentwicklungen und/oder – bedingt durch die aggressiven Fettsäuren – zur Korrosion von fettsäureunbeständigen Materialien kommen. Ein Fettabscheider besteht aus einem Behälter, in den das Abwasser eingeleitet wird. Aufgrund ihrer geringeren Dichte und ihrer wasserabstossenden Eigenschaften schwimmen Fette auf der Wasseroberfläche auf. Durch eine Absenkung der Temperatur kann die Abscheidewirkung der Fette verbessert werden (deren Löslichkeit ist stark temperaturabhängig). Weitere Stoffe, wie zum Beispiel Essensreste, setzen sich am Boden des Schlammfangs ab. Der VSA hat ein Merkblatt zum Thema Fettabscheider erarbeitet⁹.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none">• Lipophile Stoffe
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none">• Sedimentation, Schlammfang
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none">• Als gering eingeschätzt; Weiterbehandlung/Entsorgung der abgetrennten Fette und anfallender Schlamm
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none">• Gastronomie, Lebensmittelindustrie

2.4 Schlammfang, Schlammsammler

Der Schlammfang dient zur Abscheidung mineralischer Verunreinigungen, wie Sand und Kies, und wird häufig bei der Entwässerung von Waschplätzen und bei der Fahrzeugreinigung eingesetzt. Schlammsammler sind in der Regel mit einem Tauchbogen ausgerüstet, welcher dem Rückhalt von ölhaltigen Substanzen dient. Schlammsammler kommen bei der Strassenentwässerung zum Einsatz.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none">• Lipophile Stoffe
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none">• Sedimentation, Schlammfang
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none">• Als gering eingeschätzt; Weiterbehandlung/Entsorgung der abgetrennten Fette und anfallender Schlamm
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none">• Garagen-/Auto-/Transportgewerbe (Waschplätze); Strassenentwässerung

2.5 Absetzbecken

Die Sedimentation kommt branchenübergreifend zum Einsatz, wenn sich partikuläre Stoffe bei längerer Verweilzeit im beruhigten Wasser absetzen lassen. Die Abwasserführung ist üblicherweise so gestaltet, dass die im Abwasser enthaltenen Feststoffe absinken und in konzentrierter Form abgezogen werden. Je nach Platzverhältnissen werden entweder konventionelle Sedimentationsbecken (Längs- und Rundklärbecken) oder Schrägklärer (vergrösserte Sedimentationsflächen durch Lamellen) verwendet. Bei Schräg- und Lamellenklärern kann durch die Zugabe von Fäll- und Flockungshilfsmitteln der Wirkungsgrad verbessert werden. Kleine Sedimentationsbecken verfügen am Boden über Trichter, in denen sich die sedimentierten partikulären Stoffe an-

⁹ VSA-Merkblatt «Fettabscheider». <https://vsa.abacuscity.ch/img/~490/3/06.pdf?xet=1560863246376> [7.2.2020].

sammeln und mit geeigneten Entwässerungseinrichtungen abgezogen werden können. Grössere Sedimentationsbecken verfügen zusätzlich über Räumler, welche den sedimentierten Schlamm zum Trichter hin fördert.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Partikuläre, sedimentierbare (organische/anorganische) Stoffe und die daran gebundenen Stoffe (z.B. Schwermetalle, Phosphate)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Fällung/Flockung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als gering eingeschätzt; Weiterbehandlung/Entsorgung des anfallenden Schlammes
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Branchenübergreifend eingesetzt (z.B. Nahrungsmittelbranche, insbesondere Gemüseverarbeitende Betriebe; Baustellenentwässerung; Kläranlagen)

2.6 Siebung

Mit der Siebung werden grobe partikuläre Stoffe vom Abwasser abgetrennt und müssen daher nicht in nachfolgenden Behandlungsstufen entfernt werden. Die Siebung wird eingesetzt, wenn die partikulären Stoffe mittels Sieb gut vom Abwasser abgetrennt werden können. Ein Vorteil liegt darin, dass das Siebgut in konzentrierter Form anfällt und direkt abgeführt werden kann. Je nach Art und Grösse der Stoffe, dem erforderlichen Abscheidegrad, dem vorgelagerten Produktionsprozess und der weiteren Abwasserinhaltsstoffe gibt es verschiedenste Ausführungen (z.B. Trommelsieb, Bogensieb, Schwingsieb).

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Partikuläre Grobstoffe und die daran gebundenen Stoffe
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Meist zwingend, weil Gefahr von Ablagerungen und Verblockungen (z.B. Leitungen, Pumpenvorlagen, Ultrafiltrations-Membranen), aber auch Neutralisation (pH-Schwankungen bedingt durch Reinigungsmittel)
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als gering eingeschätzt; Weiterbehandlung/Entsorgung Siebgut
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Entsorger, Nahrungsmittelindustrie

2.7 Filtration

Bei der Filtration können verschiedenste Technologien (Trommelsiebe, Bogensiebe, Sandfilter etc.) wie auch Filtrations-Materialien verwendet werden. Ausschlaggebend für die Verfahrens- und Materialwahl sind jedoch (i) die Partikelgrösse der zu filtrierenden Stoffe, (ii) das zu filtrierende Abwasservolumen, und (iii) die geforderten Ablaufwerte nach der Filtration. Bei der Filtration wird das Abwasser entweder mittels Schwerkraft oder mittels Pumpe über das Filtermedium geleitet. Dabei werden die Partikel, welche grösser sind als die Poren des Filtermediums, zurückgehalten. Je nach Verfahren werden die verwendeten Filter zurückgespült oder sind nach dem Gebrauch zu entsorgen. Die Filtration wird meistens als letzte Stufe der Abwasservorbehandlung eingesetzt (z.B. nach der Fällung/Flockung).

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Suspensierte Stoffe und die daran gebundenen Stoffe
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Meistens zwingend, zum Betrieb als Endreinigungsstufe (z.B. nach Fällung/Flockung oder nach biologischer Reinigungsstufe)
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als gering eingeschätzt; Weiterbehandlung/Entsorgung abfiltrierte Stoffe und anfallendes Rückspülwasser
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Branchenübergreifend eingesetzt (z.B. Schwingsiebe für Wäschereiabwasser)

2.8 Flotation

Mit der Flotation werden kleine, partikuläre Stoffe (aber auch Stoffe und Flüssigkeiten mit einer geringeren Dichte als Wasser) aus dem Abwasser durch Aufschäumen respektive Aufschwimmen abgetrennt (kann auch bei leichten organischen Feststoffen vorteilhaft sein). Ein zentraler Teil dieses Verfahrens ist die Erzeugung feinsten Luftbläschen. Diese lagern sich an der Oberfläche der zu entfernenden Stoffe an und erhöhen dadurch deren Auftrieb, was sich positiv auf die Abtrennleistung auswirkt. Bedingt durch die Verfahrensführung fällt auf der Wasseroberfläche ein Luft-/Feststoffgemisch (Flotat) an, welches mittels Räumler abgezogen wird. Durch die Zugabe von Fäll- und Flockungshilfsmitteln kann die Effizienz des Verfahrens erhöht werden. Es existieren grundsätzlich drei verschiedene Flotationstypen, abhängig von der Erzeugung der Gasbläschen. Dies sind: Turbulenz-, Elektro- und Entspannungsflotation.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Leichte, flotierbare organische Partikel, sowie Öle und Fette und den enthaltenen Substanzen; feine Feststoffe; eher selten Schwermetallhydroxide, in der Lebensmittelindustrie auch Fette und Proteine
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Fällung/Flockung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als mittelgross eingeschätzt; Weiterbehandlung/Entsorgung Schlamm (kann sehr stark riechen)
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensmittelindustrie (grosse Betriebe), Entsorger

2.9 Membranfiltration

Die Membranfiltration ist ein sehr breit eingesetztes Verfahren und lässt sich gut mit weiteren Verfahren kombinieren. Die Membranfiltration lässt sich anhand der Porengrösse weiter unterteilen in Mikrofiltration ($> 0.1 \mu\text{m}$) und Ultrafiltration ($> 10\text{-}100 \text{ nm}$). Bei der Nanofiltration und der Umkehrosmose handelt es sich um Diffusionsmembranen. Mit der Mikro- und Ultrafiltration werden Feststoffe wie auch Bakterien abgetrennt. Die Ultrafiltration stellt zudem eine absolute Barriere für Viren dar. Durch die Nanofiltration werden Makromoleküle und zweiwertige Ionen zurückgehalten, während mittels Umkehrosmose sämtliche Ionen ($> 99 \%$) vom zu reinigenden Abwasser entfernt werden können. Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Porengrösse der Membran, desto besser muss die Vorfiltration sein; eine Umkehrosmose kann beispielsweise nicht direkt mit feststoffhaltigem Abwasser beaufschlagt werden, da Stoffe wie Öle, Fette oder Partikel die Membran verstopfen können. In der Praxis werden daher oftmals verschiedene Membranverfahren in Serie geschaltet. Eine der häufigsten Anwendungen ist die Ultrafiltration in Kombinationen mit der Umkehrosmose; wobei Erstere die Feststoffabtrennung vornimmt, um das «Fouling» auf der Membrane der Umkehrosmose zu reduzieren. Die Umkehrosmose reduziert den Ionen- und Salzgehalt des behandelten Abwassers. Dadurch entsteht hochreines Wasser. Beim Konzentrat ist zu beachten, dass es zu keinen Ausfällungen von Härtebildnern (Kalzium, Magnesium) kommt. Dies kann durch eine vorgängige Enthärtung des zu behandelnden

den Abwassers (z.B. mittels Ionentauscher; siehe weiter unten) oder durch die Zudosierung eines Antiscalants (z.B. Polyacrylsäuren, Phosphonate) verhindert werden. Je nach Abwasserzusammensetzung kann der Betrieb einer Membranfiltration sehr teuer sein.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> Breitbandwirkung (je nach Membrantyp): Feststoffe, Bakterien, Viren, Moleküle, Ionen (Schwermetalle)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> In den meisten Applikationen bedarf es einer Vorfiltration, je nach Technologie (Ultrafiltration bis Umkehrosmose) und Enthärtung; biologische Reinigung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> Als mittelgross eingeschätzt (je nach Abwasserzusammensetzung teuer im Betrieb); Weiterbehandlung/Entsorgung der Konzentrate
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> Branchenübergreifend eingesetzt (z.B. chemische-pharmazeutische Branche); Einsatz bei Kreislaufführungen (z.B. metallverarbeitende Branche); Ultrafiltration im Garagen-/Auto-/Transportgewerbe (Abtrennung von emulgierten Ölen)

2.10 Adsorption

Adsorptive Verfahren eliminieren organische Stoffe grösstenteils durch Adsorption aus dem Abwasser. Dazu können spezifische Adsorber (z.B. Adsorberharze, Kalk-/Eisenhydroxide oder Zeolithe für Schwermetalle) oder Aktivkohle eingesetzt werden. Einige Adsorber werden sehr spezifisch für die selektive Adsorption von spezifischen Schadstoffen eingesetzt, während die Aktivkohle häufig zur nicht selektiven Adsorption (Breitbandwirkung) verwendet wird. Je nach Verwendungszweck werden unterschiedliche Aktivkohletypen in unterschiedlicher Korngrössenverteilung verwendet (pulverförmig oder als Granulat). Die pulverförmige Aktivkohle kann in den Reaktoren dem Abwasser beigemischt werden, muss dann aber wieder effizient abgetrennt werden. Die granulierten Kohle kann in geschlossenen Filtern oder Filterbecken eingesetzt werden und wird nach Erschöpfung der Adsorptionsleistung regeneriert. Die Aktivkohle kommt branchenübergreifend zum Einsatz.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> Refraktäre, organische Stoffe (u.a. Mikroverunreinigungen), diverse Kohlenwasserstoffe (PAK, BTX, CKW, AOX) Farbstoffe/Pigmente, Phenole, Schwermetalle (Kalk-/Eisenhydroxide, Zeolithe)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> Ionentauscher, Membranverfahren, oxidative Verfahren
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> Als mittelgross eingeschätzt; Adsorbermedium muss periodisch ausgetauscht oder regeneriert werden
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> Branchenübergreifend eingesetzt (z.B. chemische-pharmazeutische Industrie)

2.11 Verdampfung/Rektifikation

Bei der Verdampfung wird ein Teil des Abwassers (oder des rückzugewinnenden Lösungsmittels) in den gasförmigen Zustand überführt (in der Regel bei Temperaturen im Bereich von 40 bis 90 °C). Dabei ist entscheidend, dass die zu eliminierenden Abwasserinhaltsstoffe (z.B. Salze, organische Stoffe) einen kleineren Dampfdruck als Wasser aufweisen und somit nicht unter diesen Bedingungen in die Gasphase übergehen. Auf diese Weise können zum Beispiel Gemische oder Stoffe, die sich nicht über andere Technologien aufkonzentrieren lassen, eingedampft und

die zu entsorgende Abwassermenge auf ein Minimum reduziert werden (wird insbesondere bei kleineren Abwasservolumina eingesetzt, um das Abfallvolumen zu reduzieren; z.B. bei Galvanik-Kleinbetrieben). Verdampfer können mittels Dampf oder elektrisch betrieben werden. Bei sogenannten Brüdenverdichtern lässt sich durch Verdichtung der Brüden (Dämpfe) ein Grossteil der Energie zurückgewinnen und zur Verdampfung wiederverwenden. Die Eindampfung eines Abwassers ist sehr energieintensiv und daher teuer im Betrieb: je nach Verfahren und Mehrstufigkeit eines Verdampfers können grössere Unterschiede beim Energieverbrauch bestehen; als Richtwert wird bei kleinen Verdampfern (10 m³/h) mit einem Energieverbrauch von 35-70 kW/m³ gerechnet. Tenside können den Betrieb stören, da der Schaum bei der Verdampfung mitgerissen werden kann. Dies lässt sich teilweise mit Hilfe von Entschäumern verhindern. Das anfallende Destillat ist wiederverwendbar.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Hochverschmutzte Abwässer, Salze, ölhaltige Abwässer, Kohlewasserstoffe, organische Stoffe (u.a. Mikroverunreinigungen)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Membranverfahren
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als hoch eingeschätzt; eingedampftes und aufkonzentriertes Abwasser muss (extern) behandelt werden (oftmals Verbrennung)
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Galvanische Industrie (Kleinbetriebe), Minenindustrie, chemische-pharmazeutische Industrie

Eine Spezialform der Verdampfung ist die Rektifikation (Gegenstromdestillation). Bei der Rektifikation werden mehrere Verdampfungsschritte hintereinandergeschaltet. Die Trennleistung ist dadurch um ein Vielfaches höher als bei der einstufigen Destillation.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Organische Lösungsmittel
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Extraktion, Membranverfahren
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als mittelgross eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische-pharmazeutische Industrie, Lebensmittelbranche

2.12 Flüssig-flüssig Extraktion

Die flüssig-flüssig Extraktion erfolgt mithilfe von zwei nicht miteinander mischbaren Lösungsmitteln. Es wird vielmals eine hydrophile Phase (z.B. Wasser) und eine hydrophobe Phase (z.B. organisches Lösungsmittel) verwendet. Die zu eliminierende Substanz verteilt sich auf die beiden Phasen in einer Gleichgewichtsreaktion. Durch Abtrennung und Verdampfung des Extraktionsmittels kann der Zielstoff gewonnen werden. Dieser Extraktionsprozess kann entweder kontinuierlich oder Batchweise durchgeführt werden.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Organische Stoffe (u.a. Mikroverunreinigungen)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Verdampfung des Lösungsmittels zur Gewinnung des Zielstoffs
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als mittelgross eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische-pharmazeutische Industrie

2.13 Verbrennen des Abwassers

Bei der Abwasserverbrennung (> 1000 °C) werden die enthaltenen organischen Stoffe thermisch vollständig zerstört. Die Abwasserverbrennung ist sehr energieintensiv und daher sehr teuer in Betrieben, wo die Abwärme nicht mit einem ausreichend hohen Wirkungsgrad verwertet werden kann. Durch eine Verbrennung der konzentriertesten Abwasserströme kann die betriebsinterne Abwasservorbehandlungsanlage kleiner dimensioniert und der Entsorgungsprozess so insgesamt effizienter betrieben werden.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none">• Organische Verbindungen, Pharmawirkstoffe, Pestizide, schwer abbaubare Stoffe (Mikroverunreinigungen)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none">• Membranverfahren, Verdampfung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none">• Als hoch eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none">• Chemische-pharmazeutische Industrie

2.14 Ionentauscher

Ionentauscher können als Anionen- oder Kationentauscher eingesetzt werden. So können unterschiedliche Ziel-Ionen aus dem Abwasser eliminiert werden. Dabei gilt, je höher die Ladungsdichte eines Ions desto stärker wird es an das Ionentauscherharz gebunden. Der häufigste Einsatz von Ionentauschern stellt die Enthärtung von Wasser mittels Kationentauscher in der Natrium-Form dar (die Härtebildner Kalzium und Magnesium werden dabei durch Natrium ausgetauscht). Die Regeneration erfolgt mittels hochkonzentrierter Kochsalz-Lösung, wodurch die auf dem Ionentauscherharz adsorbierten Härtebildner durch Natrium in einer Gleichgewichtsreaktion wieder ersetzt werden.

In der industriellen Abwasserbehandlung werden Ionentauscher für verschiedenste Anwendungen eingesetzt. Beispielsweise werden in der galvanischen Industrie Anionen- und Kationentauscher für die Wasserregeneration bei Kreislaufführungen von Spülbädern eingesetzt. Oder in Industrien, bei denen Schwermetalle anfallen, die sich nicht durch Hydroxid- /Sulfidfällung restlos entfernt lassen (siehe weiter unten), werden Ionentauscher zur Schwermetallelimination eingesetzt. Ionentauscher sind bei der Metalloberflächenbehandlung/Galvanik nicht als Schlussfilter (End-of-pipe Schaltung) erlaubt.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none">• Anionen, Kationen
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none">• Fällung, Flockung, Membranverfahren, Adsorptionsverfahren
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none">• Als gering eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none">• Galvanik/metalloberflächenbehandelnde Betriebe, Kehrlichtverbrennung

2.15 Strippen

Beim Strippen werden die (leicht-)flüchtigen Stoffe (z.B. chlorierte Kohlenwasserstoffe) mittels Luft oder Dampf aus dem Abwasser ausgetrieben. Das Strippen erfolgt dabei entweder durch Entspannung/Austreibung (siehe Flotation) oder durch Desorption mittels Temperaturerhöhung¹⁰. Leichtflüchtige und wenig wasserlösliche organische Substanzen können beispielsweise

¹⁰ Förtsch und Meinholz (2014). Handbuch betrieblicher Gewässerschutz (Kapitel zur Strippung, S. 293), ISBN 978-3-658-03323-1.

durch die Luftstrippung aus dem Abwasser entfernt werden (Ammoniakstrippung zur Stickstoffrückgewinnung). Der erzielbare Reinigungseffekt ist dabei abhängig von der Abwasserbeschaffenheit, den physikalischen Eigenschaften der zu eliminierenden Stoffe und der eingesetzten Luftmenge.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Leicht flüchtige, wenig wasserlöslich organische Stoffe (z.B. chlorierte Kohlenwasserstoffe, Ammoniak)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Mit biologischen Verfahren
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als mittelgross eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische-pharmazeutische Industrie

2.16 Elektrolyse/Elektrodialyse

Bei der Elektrolyse werden Abwasserinhaltsstoffe durch Anlegen eines elektrischen Stroms aufgespalten oder abgeschieden. Die Elektrolyse wird in zahlreichen wissenschaftlichen und technischen Anwendungen eingesetzt, wie beispielsweise bei der Chloralkali-Elektrolyse, der Herstellung und Reinigung von Metallen durch Schmelzelektrolyse, oder der Herstellung von Wasserstoffperoxid. Für die Abwasservorbehandlung ist dieses Verfahren nicht weit verbreitet im Einsatz, wird aber vor allem dann eingesetzt, wenn Wertstoffe rückgewonnen werden sollen. Die Elektrolyse kann zudem bei der Elektroflotation zur Herstellung der Luftbläschen genutzt werden.

Die Elektrodialyse stellt eine Kombination der Elektrolyse mit Membranverfahren dar. Sie ist dadurch charakterisiert, dass mit Hilfe eines elektrischen Feldes eine selektive Konzentrierung von Ionen erfolgt. Auf diese Weise ermöglichen Anionen- und Kationenaustauschmembranen eine Trennung der positiv und negativ geladenen Ionen. Mittels Elektrodialyse können salzhaltige Abwässer (Brackwasser) teilentsalzt werden; eine spezielle Form stellt die bipolare Elektrodialyse dar, bei welcher aus salzhaltigen Wässern schwache Säuren und Laugen (zirka 4%) hergestellt werden können.

Bei der Rückgewinnung von Metallen wie Kupfer, Nickel oder Zinn macht die Elektrolyse lediglich in Halbkonzentraten oder Konzentraten Sinn. Zur Erreichung von geringen Konzentrationen wird idealerweise eine nachgeschaltete Behandlung mittels Ionentauscherharzen kombiniert. Die abgearbeitete Lösung kann entweder in der Abwasservorbehandlungsanlage aufbereitet werden, oder muss aufgrund der hohen Salzfrachten extern entsorgt werden.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Geladenen Stoffe, Metalle (Kupfer, Nickel, Zinn)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Membranverfahren; Thermische Verfahren (Eindampfung), (Elektro-)Flotation; Ionentauscher
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als hoch eingeschätzt: die Elektrodialyse benötigt einen hohen Reinigungsaufwand bei starker organischer Verschmutzung des Abwassers
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensmittelindustrie (Molkemineralisierung), galvanische Industrie

2.17 Inaktivierung von biologisch kontaminiertem Abwasser

Bei der Arbeit mit gentechnisch veränderten oder pathogenen Organismen und biologischen Materialien entstehen kontaminierte oder potentiell kontaminierte Abfallströme. Im Labor- wie im Produktionsmassstab müssen diese Abfallströme mindestens so inaktiviert werden, dass sie

weder Mensch, Tier, Umwelt noch die biologische Vielfalt gefährden können¹¹. Standardverfahren der Inaktivierung von biologisch kontaminiertem Abwasser sind neben dem klassischen Autoklavieren, rein thermische (vielmals kontinuierliche Betriebsweise) oder rein chemische (z.B. pH-Erhöhung) Inaktivierungsmethoden oder Kombinationen hiervon. Die Wirksamkeit der gewählten Methode muss nachgewiesen werden. Auch muss bei chemischen Verfahren der damit verbundene Eintrag weiterer reaktiver, möglicherweise schädlicher Stoffe in den Abwasserstrom berücksichtigt werden.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Organismen, Mikroorganismen und biologische Materialien nach Definition ESV (Einschliessungsverordnung¹²).
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Physikalische und/oder chemische Inaktivierungsverfahren, im Batchverfahren oder kontinuierlich unter Berücksichtigung der biologischen Risikoklasse.
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmässige Wartung und Überprüfung der Inaktivierungseffizienz in Abhängigkeit vom jeweiligen Organismus und der Risikoklasse.
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Biotechbranche

¹¹ Verordnung über den Umgang mit Organismen in geschlossenen Systemen (Einschliessungsverordnung, ESV) vom 9. Mai 2012, (Stand am 1. Januar 2020) SR 814.912

¹² Ebd.

Mechanisch-physikalische Verfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Zielstoffe

Tab. 1. Übersicht über mechanisch-physikalische Einzelverfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Stoffe und Stoffgruppen. Die Verfahren sind auch in Kombinationen möglich. Legende: «++» = wird effektiv eliminiert, «+» = wird teils eliminiert, «-» = wird nicht eliminiert (gemäss Experteneinschätzung)

VERFAHREN	STOFFE / STOFFGRUPPEN	Anfall von Schläm, Konzentraten etc. zur Weiterbehandlung und/oder Entsorgung																																					
		pH-Schwankungen	Feststoffe / Partikel (GUS)	Schwermetalle	löslich	CSB	gesamt	BSB	TOC	DOC	Fette	Farbstoffe/Pigmente	Phosphite (Phosphonate)	Phosphate	aliphatische	aromatische (BTX)	chlorierte (CKW)	Kohlenwasserstoffe (KW)	halogenierte AOX (FOCl, VOX)	nicht halogenierte KW	polyaromatische (PAK)	Organ-synthet. Stoffe	(Mineral-)Öle	Chromat	Phenol	Cyanid	Ammonium	Nitrit	Nitrat	Komplexbildner	Sulfide	Fluoride	Chlorid	Weitere Salze (z.B. Bromid)	Nitrosamine & Vorläufer	Pathogene (Mikroorganismen)	Gerüche		
Mineralölabscheider, Koaleszenzabscheider	Eliminiert Fette, Öle, Kohlenwasserstoffe	++	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Emulsionsspaltung		++	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	++	+	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fettabscheider		++	-	-	-	-	-	+	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Absetzbecken/Schlammfang (mit Tauchbogen)	Eliminiert Partikel und Feststoffe UND daran sorbierte Stoffe	++	-	++	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Siebung		++	+	++	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Filtration		++	-	++	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Flotation		++	-	++	+	-	+	+	+	+	+	++	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Membranverfahren (Umkehrosiose)	Breitbandwirkung	++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
Adsorptionsverfahren		++	-	-	-	+	+	+	++	+	++	-	-	++	-	-	++	++	++	++	++	++	++	+	-	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Verdampfer		++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Verbrennen des Abwassers		++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Ionentauscher	Weitere Verfahren (wenig verbreitet)	+	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Strippen		++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	
Elektrolyse, Elektrodialyse		++	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thermische Inaktivierung		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-

3 CHEMISCHE VERFAHREN

Dieses Kapitel geht auf die chemischen Verfahren ein. Bei diesen Verfahren werden die Stoffe zerstört, oder so verändert, dass sie aus dem Abwasser entfernt werden können. Es handelt sich um relativ kompakte und platzsparende Verfahren (z.B. im Vergleich zu den biologischen Verfahren). Sicherheitstechnische Aspekte sind zu berücksichtigen, insbesondere bei denjenigen Verfahren, die mit Oxidations- und Reduktionsmitteln funktionieren. Der sachgerechte Betrieb dieser Verfahren ist nicht trivial, und setzt daher Expertenwissen voraus.

Als chemische Verfahren werden in diesem Artikel die nachfolgend aufgelisteten Verfahren beschrieben (siehe auch Tab. 2).

Neutralisation pH-Wert:

- Neutralisation

Verfahren mit einer Breitbandwirkung (neben Schwermetallen z.B. auch Farbstoffe, Phosphate, emulgierte Kohlewasserstoffe):

- Flockung
- Fällung / Umkomplexierung

Verfahren mit einer Breitbandwirkung bezüglich schwer abbaubaren, organischen Stoffen (Mikroverunreinigungen):

- Oxidation: Ozon, UV, Wasserstoffperoxid, Javelwasser, Fenton-Reaktion

Weitere Verfahren:

- Reduktion von Chrom(VI) und Nitrit

3.1 Neutralisation

Die Neutralisation von Industrieabwasser ist ein breit angewendetes Verfahren und wird oft in Kombination mit anderen Verfahren (z.B. Fällung/Flockung) eingesetzt. Auf diese Weise wird die Kanalisation vor Korrosion und die nachgeschalteten biologischen Behandlungsschritte vor einer Hemmung der Bakterien geschützt. Die Neutralisation des Abwassers wird zur Einstellung des pH-Werts durchgeführt. Im Gegensatz zum chemischen Verständnis einer neutralen Lösung (pH 7) lässt die Gewässerschutzverordnung einen pH zwischen 6,5 und 9 zu (bei einer Einleitung in die öffentliche Kanalisation sind Abweichungen bei ausreichender Vermischung in der Kanalisation zulässig). Alle Werte ausserhalb dieser Skala können entweder mit Säure, CO₂ oder Lauge entsprechend neutralisiert werden. Die Zugabe von Säure und Lauge wird mittels pH-Elektrode gesteuert. Es ist wichtig, dass das zu neutralisierende Medium voll durchmischt ist, da ansonsten eine Neutralisation nur lokal an der Dosierstelle stattfindet.

Grundsätzlich kann zwischen einer Chargen- und Durchlaufneutralisation unterschieden werden. Bei einer Chargenneutralisation kann durch verschiedene Abwasserstränge beziehungsweise Chargen bereits eine gewisse pH-Einstellung erfolgen ohne zusätzliche Dosierung von Säure/Lauge.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none">• Säure, Lauge
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none">• Schlammfang, Sedimenten, Emulsionsspaltung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none">• Als gering eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none">• Branchenübergreifend eingesetzt (z.B. Baustellenentwässerung (Betonausblutung), bei CIP (= «cleaning in place») Reinigungsabwässern z.B. in der Lebensmittelindustrie, Metalloberflächenbehandlung/Galvanik

3.2 Fällung (mit Umkomplexierung)

Bei der Fällung werden gelöste Stoffe in eine unlösliche Form überführt. Dies wird erreicht, indem ein Fällmittel zugegeben und der pH-Wert so verändert wird, dass der auszufällende Stoff unter den vorherrschenden Bedingungen die geringste Wasserlöslichkeit aufweist. Die ausgefallenen Stoffe werden danach mittels fest-flüssig Trennverfahren separiert und eingedickt. Je nach Feststoffgehalt kann die Feststoffabtrennung mittels Sedimentation, Eindickung, Flotation oder Direktfiltration durchgeführt werden (siehe weiter oben). Zur weiteren Eindickung oder Entwässerung kommen meist Filterpressen oder Zentrifugen zum Einsatz. Der anfallende Reststoff wird, wenn möglich, verwertet.

Nachfolgend wird im Speziellen auf die Fällung von Metallen eingegangen, weil dies in der Praxis einen grossen Anwendungsbereich darstellt.

Wie oben beschrieben wird auch zur Fällung von Metallen der entsprechende pH-Bereich eingestellt, wo das zu fällende Metall die geringste Löslichkeit aufweist. Sind mehrere Metalle gleichzeitig zu fällen, muss der optimalste pH-Bereich ermittelt werden; zudem kann durch die Wahl eines geeigneten Neutralisationsmittels der optimale pH-Bereich für die Metallfällung erweitert werden. Alternativ kann entweder ein zweistufiges Verfahren eingesetzt werden oder die Hydroxidfällung durch eine zusätzliche Fällung mit Natriumsulfid oder einem Organosulfid nachgeschaltet erfolgen. Da die Löslichkeit der Metallsulfide deutlich geringer ist, wird in den meisten Fällen eine kombinierte Hydroxid/Sulfid-Fällung vorgenommen. Die Löslichkeiten der entsprechenden Metalle in Abhängigkeit des pH-Werts sind beispielsweise in¹³ aufgelistet. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich hierbei um theoretische Werte handelt, die in der Praxis bedingt durch Abwasserinhaltsstoffe wie organische Stoffe oder Salze abweichen können. Die optimalen Einstellungen und Dosiermengen ist daher im Rahmen von Laborversuchen vorgängig zu ermitteln.

Es kann vorkommen, dass in gewissen Abwässern, wo in den vorgelagerten Bearbeitungsprozessen Komplexbildner - wie Amine, Zitronensäure, EDTA, Weinsäure, Polyphosphat – zum Einsatz kommen, die Ausfällung von Metallen erschwert oder gar unmöglich ist. In diesen Fällen sind zusätzliche Behandlungsschritte notwendig, um die Wirkung solcher Komplexbildner zu unterbinden. Neben weiteren möglichen Massnahmen kann beispielsweise die Fällung der entsprechenden Metalle mit Natriumsulfid oder mit Organosulfiden im neutralen oder allenfalls im alkalischen Bereich durchgeführt werden. Alternative Komplexspalter sind Trimercaptotriazin, Dimethylidithiocarbamat (Hemmung der biologischen Abwasserreinigung möglich) oder Thioharnstoff. Für die Spaltung starker Komplexbildner kann aber auch ein Selektivionentauscher - vorwiegend für zweiwertige Metalle, oder eine Oxidation (Ozon, Wasserstoffperoxid mit Eisen(II)-Salz, Wasserstoffperoxid in Kombination mit UV; siehe weiter unten) eingesetzt werden.

Einige Metalle können auch als Anion vorliegen und bedingen andere Behandlungsmethoden. Am häufigsten wird Chromat in der metalloberflächenbehandelnden Industrie eingesetzt. Chrom(VI) ist bei der Behandlung zuerst mit Natriumbisulfit oder Eisen(II)-Salzen in die dreiwertige Form zu überführen (siehe weiter unten «Reduktion») und anschliessend als Chrom(III)-hydroxid auszufällen. Metalle wie Arsen, Molybdän, Wolfram, die ebenfalls in anionischer Form vorliegen, können nicht direkt gefällt werden und lassen sich durch Anlagerung an Eisenhydroxide entfernen.

Neben Metallen lassen sich auch weitere Anionen, wie Phosphate, Sulfate, Fluoride oder Sulfide ausfällen. Dazu werden je nach vorgegebenem Grenzwert entsprechend stöchiometrische Überschüsse benötigt.

¹³ Wilhelm S., Wasseraufbereitung Chemie und chemische Verfahrenstechnik, 7. Aktualisierte Auflage, Springer, 2007. Hagen, WABAG Handbuch Wasser, 9 Auflage, Vulkan Verlag, 2000

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Schwermetalle (anionische, kationische), Phosphat, Sulfat, Fluorid, Sulfid
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Flockung, Verfahren zur Feststoffabtrennung und Schlammwässerung/-eindickung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als gering eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Metalloberflächenbehandlung/Galvanik

3.3 Flockung

Bei der Flockung werden suspendierte Stoffe zu grösseren Agglomeraten zusammengeführt. Diese lassen sich durch physikalische Verfahren wie Sedimentation, Filtration, Flotation von der wässrigen Phase abtrennen. Die Flockung eliminiert zudem eine grosse Bandbreite an Stoffen aus dem Abwasser (wie beispielsweise bereits gefällte Schwermetalle, emulgierte Kohlenwasserstoffe, Fluoride, Phosphate, und Sulfate, sowie Farbstoffe und Pigmente), und wird daher für die Behandlung von vielen verschiedenen Industrie- und Gewerbeabwässern eingesetzt. Die Flockung lässt sich in die drei Verfahrensstufen (i) Koagulation, (ii) Neutralisation und (iii) Flockulation unterteilen. Bei der Koagulation wird das zu behandelnde Abwasser elektrochemisch entstabilisiert, entweder durch die zusätzliche Zugabe einer zwei- oder dreiwertigen Metall-Lösung oder bei der Elektrokoagulation unter Verwendung einer Eisen- beziehungsweise Aluminium-Opferanode. Bei der Verfahrensstufe Neutralisation wird der pH neutralisiert (im neutralen pH-Bereich bilden sich Mikrofloccen aus), während bei der Flockulation die Bildung von Makrofloccen durch Zugabe von Flockungshilfsmitteln oder einem Polyelektrolyten erfolgt. Diese Polyelektrolyte lagern sich vorwiegend an den gebildeten Floccen an und belasten das Abwasser nur in geringem Mass. Diese Polyelektrolyte sind nur teilweise biologisch abbaubar und die Dosierung soll auf das Nötigste reduziert werden. Damit die Schadstoff-Eliminationseffizienz möglichst hoch ist, müssen für die drei Flockungs-Verfahrensschritte jeweils die optimalen Rahmenbedingungen eingehalten werden. Diese sind: (i) Reaktionszeiten, (ii) Reaktionsbedingungen, (iii) verwendete Chemikalien (Flockungshilfsmittel), (iv) pH-Bereich.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Schwermetalle, emulgierte Kohlenwasserstoffe, Fluorid, Phosphat, Farbstoffe, Pigmente, Säuren/Laugen
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Fällung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • gering
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Metalloberflächenbehandlung/Galvanik, Werkhöfe, Autogargen

3.4 Oxidation

Bei oxidativen Verfahren werden die zu eliminierenden Stoffe in einer chemischen Reaktion umgesetzt, wobei sich das Oxidationsmittel verbraucht. Oxidative Verfahren werden in der Abwassertechnik eingesetzt, wenn folgende Anforderungen an die Reinigung bestehen: (i) (Teil-) Oxidation persistenter organischer Verbindungen (Mikroverunreinigungen), (ii) Entgiftung von Abwasser (z.B. Cyanid-Entgiftung (CN-)), (iii) Entfärbung von Abwasser, (iv) Desinfektion des Abwassers.

In diesem Kapitel wird auf die wichtigsten oxidativen Verfahren eingegangen, die zur Behandlung von Industrie- und Gewerbeabwasser eingesetzt werden. Diese sind: (i) Ozon, (ii) UV-Oxidation (in Kombination mit einem Oxidationsmittel wie Wasserstoffperoxid, oder einem Katalysator wie Palladium), (iii) Oxidation mit aktiviertem H₂O₂ (Wasserstoffperoxid; in Kombination mit einem Katalysator wie Silber- und Eisenionen (Fenton-Prozess) oder UV), (iv) Oxidation mit

Javelwasser (NaOCl), und (v) Oxidation mit Kaliumpermanganat. Bei der Oxidation mittels Fenton-Reaktion fällt ein Eisenhydroxid-Schlamm an, der entwässert und entsprechend entsorgt werden muss.

Oxidative Verfahren können miteinander kombiniert werden: beispielsweise kann Ozon mit UV oder Wasserstoffperoxid kombiniert werden. In diesem Fall wird die Bildung der Hydroxyl (OH^{*})-Radikale – auf Kosten des Ozon – beschleunigt, was zu einer grösseren unspezifischen Oxidationsleistung führt. Diese sogenannten «Advanced Oxidation Processes» (AOPs) werden dann eingesetzt, wenn die zu eliminierenden Stoffe besonders persistent sind. Verfahren mit Wasserstoffperoxid und UV sind eher teuer und werden insgesamt nicht sehr häufig zur Behandlung von Industrieabwasser eingesetzt.

Bei oxidativen Prozessen ist zu prüfen, ob ein spezifisches Abwasser für eine oxidative Behandlung geeignet ist, insbesondere, wenn Ozon zum Einsatz kommt. Es kann unter gewissen Umständen vorkommen, dass toxische Reaktionsprodukte übermässig gebildet werden (z.B. Nitrosamine, wenn entsprechende Vorläufersubstanzen im Abwasser enthalten sind; Bromat, wenn bromidhaltige Abwässer mit Ozon behandelt werden)¹⁴. Gewisse Abwasserinhaltsstoffe wie organisches Material (DOC) und teilweise Nitrit zehren stark die Oxidationsmittel, was sich negativ auf die Reinigungsleistung auswirkt. Daher ist eine entsprechende Vorbehandlung effektiv. Im Weiteren sind oxidativen Verfahren eine biologisch aktive Stufe nachzuschalten, um allfällige labile, toxische Reaktionsprodukte wieder abzubauen.

Im Metallgewerbe wird die Cyanid-Entgiftung mit Javelwasser (= Natriumhypochlorit, NaOCl) durchgeführt (die AOX-Bildung ist dabei zu berücksichtigen). Wichtig ist, dass der pH-Wert im stark alkalischen Bereich (mindestens bei pH 12) und die Temperatur unter 38°C liegt, um die Bildung des ebenfalls sehr toxischen Zwischenprodukts Chlorcyan zu verhindern (Blausäurebildung ist im alkalischen Bereich nicht relevant). Dieser Prozess der Cyanid-Entgiftung führt zu erhöhten Ammonium-Konzentrationen im Abwasser. Zunehmend wird die Cyanid-Entgiftung mittels Wasserstoffperoxid und UV durchgeführt. Auf diese Weise lässt sich die AOX-Bildung vermeiden.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Persistente organische Stoffe (Mikroverunreinigungen)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Biologische Vor-/Nachbehandlung; Fällung, Flockung
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Je nach Oxidationsmittel gering bis hoch • Zu beachten: Ozon wird vor Ort hergestellt, weil Ozon für die Lagerung zu wenig stabil ist.
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische-pharmazeutische Industrie; Metalloberflächenbehandlung/Galvanik

3.5 Reduktion

Zur Elimination von Chrom(VI) und Nitrit sind reduzierende Prozesse notwendig. Bei der Chromat-Entgiftung wird Chrom(VI) mittels Natriumbisulfid (bei pH-Werten unter 2.5) oder Eisen(II)-Salzen zu Chrom(III) reduziert, und kann anschliessend unter neutralen pH-Bedingungen als Hydroxide ausgefällt werden. Zur Entfernung von Nitrit aus dem Abwasser wird Amidosulfonsäure bei einem pH von 4 beigegeben. Nitrit wird dabei zu Luftstickstoff (N₂) reduziert. Zusätzlich fällt Sulfat an. Nitrit kann aber auch mit biologischen Prozessen (z.B. Denitrifikation) zu N₂ reduziert werden (jedoch besteht dann die Gefahr einer erhöhten Lachgas-Bildung).

¹⁴ Von Gunten, U. (2018). Oxidation Processes in Water Treatment: Are We on Track? Environmental Science and Technology, 52, 5062-5075.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Chromat, Nitrit
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Fällung, Flockung; Biologische Elimination
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als gering eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Metalloberflächenbehandlung/Galvanik /(Chromat-Reduktion), Lebensmittelbranche, Härtereietriebe, chemisch-physikalische Behandlung von flüssigen Sonderabfällen (Nitrit-Reduktion)

Chemische Verfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Zielstoffe

Tab. 2 Übersicht über chemische Einzelverfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Stoffe und Stoffgruppen. Die Verfahren sind auch in Kombinationen möglich. Legende: «++» = wird effektiv eliminiert, «+» = wird teils eliminiert, «-» = wird nicht eliminiert (gemäss Experteneinschätzung).

VERFAHREN	STOFFE / STOFFGRUPPEN	Anfall von Schlamm, Konzentraten etc. zur Weiterbehandlung und/oder Entsorgung		pH-Schwankungen	Feststoffe / Partikel (GUS)	Schwermetalle	löslich	CSB	BSB	TOC	DOC	Fette	Farbstoffe/Pigmente	Phosphite (Phosphonate)	Phosphate	aliphatische	aromatische (BTX)	Kohlenwasserstoffe (KW)	Organ.-synthet. Stoffe	(Mineral-)Öle	Chromat	Phenol	Cyanid	Ammonium	Nitrit	Nitrat	Komplexbildner	Sulfide	Fluoride	Chlorid	Weitere Salze (z.B. Bromid)	Nitrosamine	Pathogene (Mikroorganismen)	Gerüche				
		löslich	nicht abbaubar	gesamt	freie	emulgierte																													Hypophosphite	Polyphosphat, partikulär	chlorierte (CKW)	halogenierte AOX (FOCl, VOX)
Neutralisation	pH-Wert	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Flockung	Effektiv für breiteres Stoffspektrum Zugabe von Pulveraktivkohle denkbar	++	+	+	++	+	-	+	+	+	+	-	-	++	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Fällung		++	+	-	++	+	-	+	+	+	+	+	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Umkomplexierung		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-			
Oxidation: Ozon	Eliminiert insbesondere persistente, organische Stoffe	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	++	+	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	-	++	-	++	-	+	+	-	+	+
Oxidation: UV (+Oxidationsmittel)		-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	++	+	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	-	++	-	++	-	+	+	-	+	+
Oxidation: H2O2 (Katalysator, UV)		-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	++	+	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	-	++	-	++	-	+	+	-	+	+
Oxidation: Javelwasser (NaOCl)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	++	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxidation: Fenton		+	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	++	+	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	-	++	-	-	-	+	+	-	+	+
Kaliumpermanganat		++	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	++	+	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-
Reduktion (Cr(VI) zu Cr(III))	Weitere Verfahren	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Reduktion Nitrit mit Amidosulfonsäure		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4 BIOLOGISCHE VERFAHREN

Eine biologische Vorbehandlung des industriellen Abwassers wird dann eingesetzt, wenn die Abwasserinhaltsstoffe gut biologisch abbaubar sind. Oft machen biologische Verfahren wirtschaftlich nur dann Sinn, wenn es sich um grosse Frachten handelt. Das heisst: grosse Mengen an hoch belasteten und gut abbaubaren Stoffen. Dabei werden Nährstoffe sowie organische Stoffe abgebaut, um die nachgeschaltete kommunale Kläranlage zu entlasten, da letztere ebenfalls einen biologischen Verfahrensschritt hat.

Tab. 3 Vergleich zwischen aerober und anaerober Abwasservorbehandlung

Aerobe Biologie	Anaerobe Biologie
Voraussetzungen	
<ul style="list-style-type: none"> • Bei eher geringen Schmutzstoffkonzentrationen angewendet. • Auch für relativ kaltes Wasser geeignet. • Toxische Stoffe bedingt erlaubt. • Vorneutralisation bei sauren/alkalischen Abwässern notwendig. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur bei hoch konzentrierten Abwässern wirtschaftlich (> 2000 mg CSB/L). • Relativ warmes Abwasser (> 25 °C; 30-35 °C idealer Bereich für mesotherme Anaerobien). • Toxische Stoffe können hemmend wirken. • pH-Wert Anpassung im Zulauf zum Anaerobreaktor bei getrennter Hydrolyse und Versäuerung.
Verfahrensführung	
<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Ablaufwerte durch mehrere Verfahrensstufen erreichbar. • Integrierte N- und P-Entfernung möglich. • Hoher Schlammanfall. • Geringe Raumbelastung. • Hoher Wartungsaufwand für Belüftung, Schlammentwässerung etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Für tiefe Ablaufwerte ist aerobe Nachbehandlung erforderlich. • Keine bedeutende N- und P-Entfernung. • Geringer Schlammanfall. • Hohe Raumbelastungen. • Geringer Wartungsaufwand. • pH-Wert im Anaerob-Reaktor ist zu überwachen.
Reststoffe	
<ul style="list-style-type: none"> • Schlamm 	<ul style="list-style-type: none"> • Biogas (Energiegewinnung)
Kosten	
<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Investitionskosten. • Hohe Betriebskosten: Strom für Belüftung, Schlammbehandlung und –Entsorgung, allenfalls Zugabe von Nährstoffen. • Auch als Kleinkläranlage möglich. 	<ul style="list-style-type: none"> • Oft höhere Investitionskosten. • Niedrige Betriebskosten: geringer Stromverbrauch, kaum Zugabe von Nährstoffen nötig, geringer Schlammanfall. • Nur bei relativ grossen Frachten rentabel.

Bei einer zu einseitigen Abwasserzusammensetzung (üblicherweise CSB:N:P = 200:5:1) muss dem Abwasser zusätzlich Stickstoff und/oder Phosphor zugegeben werden, um optimale Wachstumsbedingungen für die Mikroorganismen zu schaffen. Stark saure oder alkalische Abwässer müssen vorgängig neutralisiert werden.

Biologische Verfahren können in unterschiedlichen Prozessen und Verfahrensführungen eingesetzt werden, im nachfolgenden Text werden folgende Verfahren beschrieben (siehe auch Tab. 3 und Tab. 4):

- **Aerobe Abwasserbehandlung:** kann mit einer anoxischen Behandlung (z.B. Denitrifikation) kombiniert werden
- **Anaerobe Abwasserbehandlung** (insbesondere für hoch konzentrierte Abwässer)

4.1 Aerobe Abwasserbehandlung

Bei der aeroben Abwasserbehandlung werden biologisch abbaubare organische Stoffe sowie Nährstoffe durch Mikroorganismen unter aeroben Bedingungen (d.h. mit Sauerstoff) eliminiert.

Heterotrophe Mikroorganismen benötigen als Kohlenstoffquelle organisch gebundenen Kohlenstoff. Damit unterscheiden sie sich von den autotrophen Organismen, die den Kohlenstoff aus dem CO_2 in der Atmosphäre beziehen. Heterotrophe Mikroorganismen wachsen normalerweise schnell. Bei einem aeroben Stoffwechsel bauen sie organische Stoffe mit Hilfe von Sauerstoff ab und gewinnen gleichzeitig Energie. Ein Grossteil der organischen Stoffe wird für das Wachstum verwendet, die so entstandene Biomasse fällt als Schlamm an und muss abgetrennt werden.

Für die Nitrifikation sind meist autotrophe Mikroorganismen verantwortlich. Dies bedeutet, dass CO_2 als Kohlenstoffquelle zum Wachstum benutzt wird. Dazu ist die Oxidation von Stickstoffquellen (z.B. Ammonium) notwendig. Ammonium (NH_4^+) bzw. Ammoniak (NH_3) wird von nitrifizierenden Mikroorganismen zu Nitrit (NO_2^-) und nachfolgend zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert. Insbesondere beim zweiten Prozess (Umwandlung zu Nitrat) fällt weniger Energie an, deshalb wachsen diese Mikroorganismen langsamer. Die Nitrifikation läuft aerob ab und benötigt deshalb Sauerstoff. Verschiedene Faktoren beeinflussen die Nitrifikation: Substratkonzentration, Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH, Desinfektionsmittel. Bei der Nitrifikation wird die Wasseralkalinität reduziert, d.h. der pH-Wert sinkt. Optimal ist ein pH-Wert von 6.5 bis 9.0. Sinkt der pH-Wert zu stark kann die Nitrifikation zum Erliegen kommen. Ein Absenken des pH-Werts kann durch die Zugabe eines Puffers (z.B. Natriumhydrogencarbonat) verhindert werden. Erhöhte Nitritkonzentrationen weisen auf ein Problem bei der Nitrifikation hin. In diesen Betriebszuständen fallen zudem erhöhte Lachgas-Emissionen an.

Für die Denitrifikation sind autotrophe und heterotrophe Organismen verantwortlich. Nitrat wird mit Hilfe von Mikroorganismen zu elementarem, gasförmigem Stickstoff umgewandelt. Dieser Prozess verläuft normalerweise ohne Sauerstoff (d.h. anoxisch), benötigt jedoch unter Umständen die Zugabe einer zusätzlichen Kohlenstoffquelle. Grosser Vorteil ist die Reduktion der Gesamtstickstofffracht und die Verbesserung der Pufferkapazität (Erhöhung der Alkalinität).

Bei einer häufig ändernden Abwasserzusammensetzung ist die Adaption der Biologie von grosser Bedeutung. Eine biologische Abwasservorbehandlung ist vergleichsweise teuer (z.B. Schlammbehandlung und -entsorgung, Energie für Belüftung der Biologie, zu dosierende Nährstoffe bei einseitiger Abwasserzusammensetzung), und wird daher bei der industriellen Abwasserbehandlung nur dann realisiert, wenn keine alternativen Lösungen bestehen.

Die biologische Behandlung kann in unterschiedlichen Verfahrensführungen realisiert werden. Sie kann als konventionelles Verfahren mit suspendiertem Belebtschlamm ausgeführt werden, sowie als Batch-Verfahren (SBR), als Wirbelbettverfahren (mit Aufwuchskörpern), als Festbettverfahren, als Membranbiologie (MBR), oder als weitere Biofilmsysteme, wie z.B. mit granuliertem Belebtschlamm. Bei der Membranbiologie wird üblicherweise eine Ultrafiltrationsmembran eingesetzt (siehe weiter oben). Dadurch können höhere Belebtschlammkonzentrationen erreicht werden als bei den konventionellen biologischen Verfahren, was zu geringeren Beckenvolumina führt bei gleichzeitig erhöhtem Energieverbrauch (u.a. zur periodischen Rückspülung der Membran). Alle genannten Verfahren müssen aktiv belüftet werden (Sauerstoffzufuhr für biologische Prozesse), was einen Grossteil des Energieverbrauchs ausmacht.

Es ist bekannt, dass bei den biologischen Verfahren eine Breitbandwirkung bezüglich organischer Spurenstoffe limitiert ist (auch bei deutlich aufwändigeren Varianten¹⁵), z.B. Schlammalter > 25 Tage, hydraulische Verweilzeiten von über einem Tag, wie auch anaerobe Bandhandlungsstufen, siehe weiter unten). Es ist aber durchaus möglich, Einzelstoffe – wie beispielsweise Diuron und Diclofenac – bei einer entsprechenden Adaption der Biologie weitgehend zu eliminieren¹⁶.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Biologisch abbaubarer Kohlenstoff (BSB, DOC), Stickstoff, Phosphor, Feststoffe
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Fällung, Sedimentation, Filtration, Membranverfahren
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als hoch eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensmittel-/Getränkeindustrie, Papierindustrie, chemisch-pharmazeutische Industrie, z.T. Textilindustrie

4.2 Anaerobe Abwasserbehandlung

Die anaerobe Abwasserbehandlung (d.h. ohne Vorhandensein von Sauerstoff oder Nitrat) wird insbesondere bei hoch konzentrierten Abwässern (> 2000 mg CSB/L) eingesetzt. Die organischen Stoffe werden dabei vorwiegend in Methan (CH₄) und Kohlendioxid (CO₂) umgewandelt, und nur ein kleiner Teil wird für das Wachstum der Mikroorganismen benötigt. Grundsätzlich wachsen anaerobe Bakterien deutlich langsamer als aerobe Bakterien. Dadurch fällt praktisch kein Schlamm an; es besteht gar die Gefahr, dass der Schlammverlust über den Ablauf höher ist als die Wachstumsrate der Mikroorganismen. Daher ist ein spezielles Augenmerk auf die Schlamm-Abscheidetechnik zu legen. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass der Anaerobreaktor schnell Versäuern kann, wenn die Prozessführung zu wenig stabil ist. Fällt der pH zu stark in den sauren Bereich, kann es innerhalb weniger Stunden passieren, dass die Mikroorganismen, welche die Säure abbauen, irreversibel gehemmt werden. Das anaerob vorbehandelte Abwasser muss vor der Einleitung in die Kanalisation nachbelüftet werden, um Betriebsprobleme auf der kommunalen Kläranlage zu verhindern, insbesondere wenn die kommunale Kläranlage verhältnismässig klein ist. Die anaeroben Verfahren sind weit verbreitet zur Behandlung von Betriebsabwässern.

Zielstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Biologisch abbaubarer Kohlenstoff (BSB, DOC)
Verfahrenskombination	<ul style="list-style-type: none"> • Aerobe Abwasserbehandlung; Flotation vor Anaerobreaktor bei fett- und proteinhaltigem Abwasser (Anlagerung der Fette/Proteine an Schlamm führt zu einem erhöhten Schlammabtrieb)
Wartungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Als mittelgross eingeschätzt
Zielbranche	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensmittel-/Getränkeindustrie (Milch- und Fleischindustrie, Brauereien)

¹⁵ P. Falås, A. Wick, S. Castronovo, J. Habermacher, T. Ternes, A. Joss (2016): Tracing the limits of organic micropollutant removal in biological wastewater treatment. *Water Research*, 95, 240–249.

¹⁶ Ebd.

Biologische Verfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Zielstoffe

Tab. 4 Übersicht über biologische Einzelverfahren und deren Effektivität bezüglich verschiedener Stoffe und Stoffgruppen. Die Verfahren sind auch in Kombination mit anderen Einzelverfahren möglich. Legende: «++» = wird effektiv eliminiert, «+» = wird teils eliminiert, «-» = wird nicht eliminiert (gemäss Experteneinschätzung).

VERFAHREN ↓	STOFFE / STOFFGRUPPEN →																																	
		Anfall von Schlamm, Konzentraten etc. zur Weiterbehandlung und/oder Entsorgung	pH-Schwankungen	Feststoffe / Partikel (GUS)	Schwermetalle	CSB	BSB	TOC	DOC	Fette	Farbstoffe/ Pigmente	Phosphite (Phosphonate)	Phosphate	Kohlenwasserstoffe (KW)				Organ.-synthet. Stoffe	(Mineral-)Öle	Chromat	Phenol	Cyanid	Ammonium	Nitrit	Nitrat	Komplexbildner	Sulfide	Fluoride	Chlorid	Weitere Salze (z. B. Bromid)	Nitrosamine & Vorläufer	Pathogene (Mikroorganismen)	Gerüche	
		löslich	nicht abbaubar	gesamt	freie emulgierte	Hypophosphite	Polyphosphat, partikulär	aliphatische	aromatische (BTX)	chlorierte (CKW)	halogenierte AOX (FOCI, VOX)	nicht halogenierte AOX	polyaromatische (PAK)	Mikroverunreinigungen	(Mineral-)Öle	Chromat	Phenol	Cyanid	Ammonium	Nitrit	Nitrat	Komplexbildner	Sulfide	Fluoride	Chlorid	Weitere Salze (z. B. Bromid)	Nitrosamine & Vorläufer	Pathogene (Mikroorganismen)	Gerüche					
Anaerobe Biologie	Vergärung	+	-	-	-	++	-	++	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Aerobe Biologie, wie z.B.	Abbau von Kohlenstoffen (geringe Frachten) und Nährstoffen																																	
- konventionelles Belebtschlammverfahren		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+
- SBR (Batch-Verfahren)		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+
- Wirbelbettverfahren (Aufwuchskörper)		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	++	++	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+
- Festbettverfahren		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	++	++	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+
- Membranbioreaktor (MBR)		++	+	++	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	++	++	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+	
- Biofilmsysteme		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	++	++	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+	

5 VERFAHRENSÜBERGREIFENDE ASPEKTE

- **Ausgleichs- und Stapelbecken** dienen dem Frachtausgleich (z.B. zur Dämpfung von kurzzeitigen Belastungsspitzen) und werden hier nicht als eigenständiges Verfahren betrachtet, sondern als Verfahrensschritt, der branchenübergreifend sehr häufig eingesetzt wird (mit oder ohne nachgeschalteter Abwasservorbehandlungsanlage). Es muss ein entsprechend ausreichendes Beckenvolumen zur Verfügung stehen. Zur Vermeidung der Geruchsbildung können Ausgleichs- und Stapelbecken zusätzlich belüftet werden. Bei Starkregenereignissen, wo die Mischwasserentlastung aktiv ist, sollte das Betriebsabwasser möglichst zurückgehalten werden. Dies setzt aber ausreichend grosse Stapelbecken voraus.
- **Abfallprodukte** – wie Schlamm, Konzentrate, Filtrate etc. – fallen bei den meisten der oben beschriebenen Verfahren an. Mithilfe der Schlammmentwässerung ist der Schlamm bestmöglich zu entwässern, damit nur noch ein minimaler Wasseranteil im Schlamm zurückbleibt. Zur Schlammmentwässerung werden Filtrationssysteme (siehe weiter oben) wie Bandfilter, Kammerfilterpressen (z.B. bei mineralischen Schlämmen), Dekanter, oder Siebbandpressen eingesetzt. Die entwässerten Schlämme müssen sachgerecht entsorgt werden. Vor der Beseitigung der Abfälle ist zu klären, ob das Material als Sonderabfall einer speziellen Entsorgung zugeführt werden muss^{17,18}.
- **Chemikalien** – wie Fäll- und Flockungshilfsmittel – müssen bei gewissen Verfahren als Betriebsmittel eingesetzt werden. Einige dieser Betriebsmittel verfügen zum Teil über eine toxische Wirkung auf aquatische Lebewesen (z.B. kationische Flockungshilfsmittel mit quaternären Ammoniumverbindungen). Zudem können beim Einsatz von gewissen Betriebsmitteln toxische Stoffe gebildet werden (z.B. Nitrosamine bei der Desinfektion mit Chloraminen). Im Weiteren kann bei einer nicht fachgerechten Anwendung sogar der Betrieb der kommunalen Kläranlage gestört werden (z.B. Hemmung der biologischen Reinigungsstufe durch Komplexspalter wie Dimehtyldithiocarbamat). Bei einer Überdosierung solcher Betriebsmittel müssen die Überschüsse daher stets abgebunden werden. Mit der Lagerung grösserer Mengen von Chemikalien sind Gefahren verbunden. Es ist darum eigenverantwortlich zu prüfen, ob Mengenschwellen nach Störfallverordnung überschritten werden und der Betrieb darum dieser Verordnung unterworfen ist.
- **Verfahren im Chargenbetrieb** weisen grundsätzlich eine höhere Betriebssicherheit auf als Anlagen im Durchlaufbetrieb. Verfahren im Chargenbetrieb sind insbesondere bei kleinen und mittelgrossen Betrieben zu bevorzugen.

¹⁷ VSA-Merkblatt «Ist es Abwasser? Ist es Abfall?» Siehe: <https://vsa.abacuscity.ch/img/~490/13/04.pdf?xet=1459350993000> [19.2.2021].

¹⁸ Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) vom 4. Dezember 2015 (Stand am 1. Januar 2021), 814.600

6 GÄNGIGE PRAXIS

In den meisten Betrieben ist die Abwasserbehandlung auf «klassische» Schadstoffe, wie Feststoffe oder Schwermetalle ausgerichtet. Mikroverunreinigungen stehen nicht im Fokus. Weil sie entweder den Behörden und Betrieben unbekannt sind oder keine behördlichen Vorgaben an deren Einleitung bestehen¹⁹. Der vorliegende Bericht zeigt, dass Behandlungsverfahren vorhanden und etabliert sind, um Mikroverunreinigungen aus dem betrieblichen Abwasser zu entfernen. Ein weiteres Potential, um die Stoffeinträge in die Gewässer zu reduzieren, liegt beim Betrieb dieser Anlagen. Insbesondere sind die nachfolgenden Aspekte hervorzuheben:

- **Betrieb der Verfahren:** Die betrieblichen Abwasservorbehandlungsanlagen sind fachgerecht zu betreiben und die vorgegebenen Einleitbedingungen einzuhalten. Dabei ist es wichtig, dass (i) die Abwasserströme korrekt «triiert» werden und den notwendigen Behandlungsstufen zugeführt werden (Abwassermanagement), dass (ii) die für den Betrieb der betrieblichen Abwasservorbehandlung zuständigen Personen über die notwendigen Fachkenntnisse verfügen (z.B. nutzen von vorhandenen Aus- und Weiterbildungsangeboten), (iii) ausreichend Betriebsmittel (z.B. Chemikalien) vorhanden sind, und (iv) deren (automatische) Zugabe funktioniert. Die anfallenden Schlämme und dergleichen sind aus den Anlagen zu entfernen und fachgerecht zu entsorgen. Falls erforderlich sind beim Betrieb der Abwasservorbehandlung auch die Vorgaben der zentralen Kläranlage miteinzubeziehen (ein direkter Kontakt zu der zuständigen Person der Kläranlage ist von Vorteil). Die zuständige Bewilligungsbehörde verfügt über Fachkenntnisse und entscheidet über die einzuhaltenden Bedingungen (Einleitbewilligung, Stand der Technik). Es wird darum empfohlen sie im Zweifelsfall beizuziehen. So können allfällige Fehlinvestitionen oder Fehleinleitungen in Gewässer vermieden werden.
- **Überwachung:** Der Betrieb der betrieblichen Abwasservorbehandlung muss überwacht werden, was sehr anforderungsreich ist. Die Überwachung kann entweder mithilfe periodischer Analysen der relevanten Stoffe oder anhand geeigneter online-Messgeräte erfolgen. In beiden Fällen ist auf eine entsprechende Wartung und Qualitätssicherung zu achten. Häufig werden Messsysteme für die Prozesssteuerung (z.B. pH-Elektroden) nur unzureichend gereinigt und kalibriert, oder Analysen (z.B. Schnelltests) nicht sachgemäss durchgeführt (z.B. keine vorgängige Filtration von trübem Abwasser bei einer photometrischen Messung).
- **Wartung:** Eine fachgerechte Wartung und Unterhalt (z.B. gemäss Lieferant) ermöglicht einen stabilen und zuverlässigen Betrieb. Es ist zu beachten, dass auch während der Wartung die Einleitbedingungen eingehalten werden müssen.
- **Weitere Aspekte:** Die Zuständigkeiten für die Abwasservorbehandlungsanlage(n) muss klar definiert und kommuniziert werden (betriebsintern, gegenüber den zuständigen Behörden und gegenüber der zentralen Kläranlage). Zudem ist empfohlen, die Anweisungen zu den relevanten Aspekten klar und in den entsprechenden Sprachen zu dokumentieren und ein Betriebsjournal zu führen. Es ist zu prüfen, ob die Kosten für die Abwasservorbehandlung und -entsorgung (Personalkosten, Betriebsmittelkosten, etc.), anstatt einer gemeinsamen Kostenstelle zu belasten, auf die einzelnen Prozessen innerhalb des Betriebs umzulagern sind.
Es ist denkbar, dass die betriebliche Abwasservorbehandlung durch spezialisierte, externe Fachpersonen (z.B. Betriebspersonal der kommunalen Kläranlage) übernommen oder vermehrt an zentralen Standorten durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine entsprechende Professionalisierung, denn insbesondere komplexe Behandlungsverfahren stellen oftmals eine beachtliche Herausforderung dar für einen Betrieb, weil das entsprechende Fachwissen und die Erfahrungen vielmals gar nicht vorhanden sind.

¹⁹ Wunderlin, P., Gulde, R. (2022). Situationsanalyse «Stoffeinträge aus Industrie und Gewerbe in Gewässer». VSA, Glattbrugg.