

Rückbelastung aus der Schlammbehandlung – Verfahren zur Schlammwasserbehandlung

Der vorliegende Arbeitsbericht wurde von der DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 „Rückbelastung aus der Schlammbehandlung“ im DWA-Fachausschuss AK-1 „Allgemeine Fragen“ verfasst.

Mitglieder dieser Arbeitsgruppe sind:

Dipl.-Ing. Eva Arnold, München
Dr.-Ing. Maike Beier, Hannover
Dr.-Ing. Markus Grömping, Aachen
Dr.-Ing. Norbert Jardin, Essen (Sprecher)
Dr.-Ing. Gerd Kolisch, Wuppertal
Dr.-Ing. Volker Kühn, Dresden
Dipl.-Ing. Sebastian Meyer, München
Dipl.-Ing. Thomas Rolfs, Düren
Dipl.-Ing. Frank Schmidt, Wuppertal
Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Wett, Innsbruck
Dr.-Ing. Rolf Otte-Witte, Köln

1. Einleitung

Nach Darstellung der allgemeinen Grundlagen zur Ermittlung der Qualität und Quantität des auf kommunalen Kläranlagen anfallenden Schlammwassers im ersten Teil des Arbeitsberichtes [6] erfolgt im zweiten Teil die Vorstellung der möglichen Verfahrensvarianten zur Schlammwasserbehandlung. Neben einer prinzipiellen Erläuterung der verfahrenstechnischen Ansätze werden Hinweise für Planung, Bau und Betrieb derartiger Anlagen gegeben. Da eine Schlammwasserbehandlung in nahezu allen praktisch relevanten Fällen auf eine Verminderung der Stickstoff-Rückbelastung abzielt, konzentriert sich dieser Arbeitsbericht daher im Wesentlichen auf die Stickstoffelimination der Kläranlage.

Die Verbesserung der Stickstoffelimination der Kläranlage mit Hilfe der Schlammwasserbehandlung hat mit Inkrafttreten der novellierten Abwasserverordnung vom 2. Juli 2002 [32] weitere Relevanz erhalten. Viele Anlagen der Größenklasse 5, die in ihrer ursprünglichen Konzeption auf die Einhaltung eines Überwachungswertes von $18 \text{ mg/l } N_{\text{ges, anorg}}$ ausgelegt sind, sehen sich mit den auf $13 \text{ mg/l } N_{\text{ges, anorg}}$ verschärften Anforderungen konfrontiert. Hier bieten die verschiedenen Optionen der Schlammwasserbehandlung im Einzelfall durchaus die Möglichkeit, eine kostenintensive Erweiterung der Anlage zu vermeiden, um den höheren Anforderungen an die Stickstoffentfernung zu genügen.

Die Stickstoff-Rückbelastung kommunaler Kläranlagen aus der Schlammbehandlung beträgt etwa $1,5 \text{ g N}/(\text{EW} \cdot \text{d})$ bzw. etwa 15 % bis 25 % bezogen auf den Gesamtstickstoff im Zulauf zur biologischen Stufe (Bild 1). Die Ablaufkonzentration der biologischen Stufe kann damit in

Abhängigkeit ihrer Reinigungsleistung durch die aus den Schlammwässern eingetragene Stickstofffracht in hohem Maße beeinflusst werden. Neben der reinen Fracht ist der zeitliche Anfall der Rückbelastung von besonderer Bedeutung. Je nach Betriebsweise der Schlamm-entwässerung können sich stoßartige Belastungen ergeben, die oftmals mit den Tageszu-
laufspitzen an Stickstoff und an Kohlenstoff zusammentreffen [6].

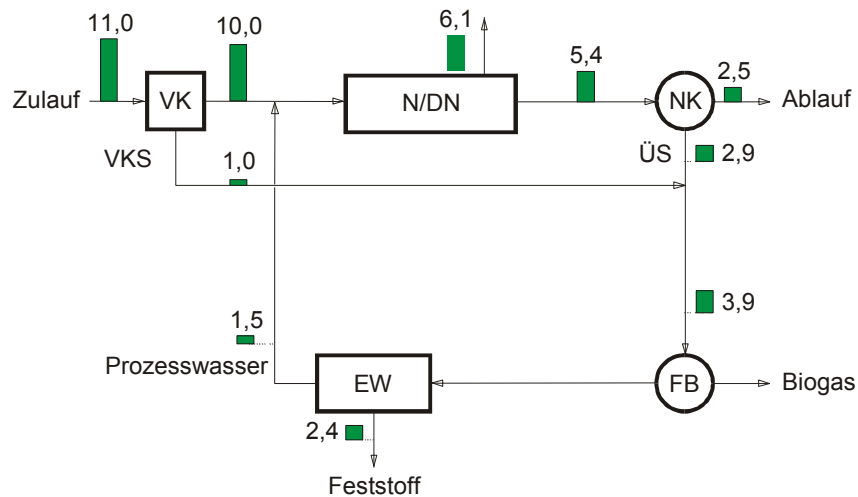


Bild 1: Beispiel einer Stickstoffbilanz für eine kommunale Kläranlage [in g N/(E · d)] (VK: Vorklämung; N/DN: Nitrifikation/Denitrifikation; NK: Nachklärung; FB: Faulung; EW: Entwässerung)

2. Konzepte zur Schlammwasserbehandlung

Die für die Schlammwasserbehandlung geforderte Eliminationsleistung leitet sich aus den Ablaufanforderungen und der Leistungsfähigkeit der biologischen Hauptstufe ab. Die maßgeblichen Auswahlkriterien für das eingesetzte Verfahren sind die Nährstoffverhältnisse im Zulauf der biologischen Stufe, die Dynamik des Anlagenzulaufs, die technische Umsetzbarkeit und die Wirtschaftlichkeit. Die praktisch relevanten Verfahrensansätze zeigt Bild 2. Hierbei wird zwischen einer Behandlung im Hauptstrom der Kläranlage und einer getrennten Behandlung des Schlammwassers durch ein zusätzliches Verfahren unterschieden.

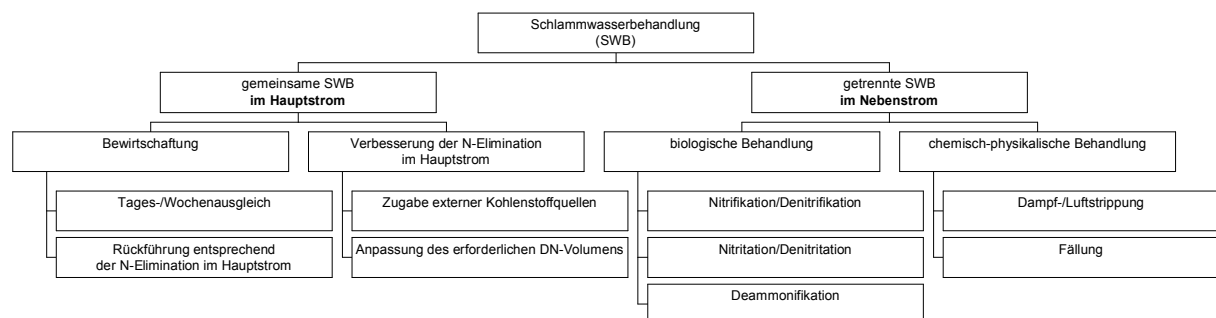


Bild 2: Praktisch relevante Verfahrensansätze zur Behandlung von Schlammwasser

Die früher übliche direkte Einleitung der Schlammwässer in den Zulauf der Vorklä rung führt leicht zu Ammoniumspitzen im Ablauf der Kläranlage. Aus diesem Grund sollte die Bewirt schaftung der Schlammwässer mit einer Vergleichmäßigung der zugeführten Fracht über einen zusätzlichen Speicherbehälter heute den Regelfall darstellen. Das Schlammwasser sollte aus diesem Speicher direkt der biologischen Stufe zugeführt werden. Bei einer Einlei tung in die Vorklä rung kann die Überlagerung von Speicherwirkung und Zulaufdynamik ins besondere bei Mischwasserzulauf ansonsten weiterhin Ammoniumspitzen im Ablauf der Kläranlage bewirken.

Bei einem ausreichenden C/N-Verhältnis im Zulauf kann die Stickstofffracht aus dem Schlammwasser in der biologischen Hauptstufe entsprechend der verfahrenstechnischen Auslegung der Denitrifikation weitgehend eliminiert werden. Bei Unterschreiten eines BSB_5/N -Verhältnisses von etwa 4 g BSB_5/g NO_3-N erfordert die Denitrifikation dagegen häu fig eine Dosierung zusätzlicher Kohlenstoffträger, wie z.B. Essigsäure oder Methanol. Die geregelte Dosierung der externen C-Quelle ermöglicht das Einstellen definierter Eliminati onsleistungen, führt allerdings zu einem erhöhten Schlammanfall.

Bei weitgehend ausgelasteten Kläranlagen oder Anlagen, die kurzfristig zusätzliche Stick stofffrachten aus dem Zulauf oder der Schlammbehandlung zu erwarten haben, bietet sich daher als Alternative zu einer Anlagenerweiterung eine separate Schlammwasserbehand lung an. Dies kann z.B. bei einer Produktionsausweitung einleitender Industriebetriebe oder bei einer Mitbehandlung externer Schlämme auf der Anlage der Fall sein. Auch eine Desin tegration der anfallenden Rohschlämme mit einem erhöhten Aufschluss der organisch ge bundenen Stickstofffracht kann zur Notwendigkeit einer zusätzlichen Schlammwasserbe handlung führen [7].

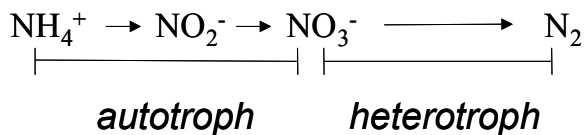
3. Verfahren der getrennten Schlammwasserbehandlung

Nachfolgend werden die Verfahren der getrennten Schlammwasserbehandlung einschließ lich ihrer möglichen verfahrenstechnischen Umsetzung beschrieben, wobei sich die Auswahl auf die Verfahren beschränkt, die bereits praktisch erprobt sind.

3.1 Biologische Verfahren

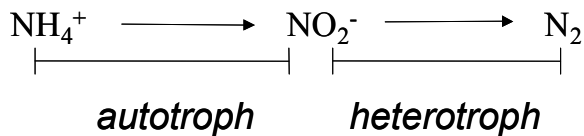
Eine Stickstoffelimination aus Schlammwasser im Teilstrom kann sowohl mit der klassischen Form der Nitrifikation/Denitrifikation als auch mit den Verfahren der Nitritation/Denitritation sowie der Deammonifikation realisiert werden (siehe Bild 3).

Nitrifikation/Denitrifikation



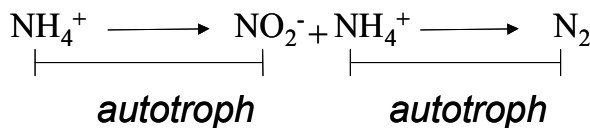
CSB/TKN: ~5,5
aerob/anoxisch

Nitritation/Denitritation



CSB/TKN: ~3,6
aerob/anoxisch

Deammonifikation



CSB/TKN: 0
aerob/anoxisch
Nitrifikanten und Planctomyceten
(z.B. *Brocadia anammoxidans*)

Bild 3: Gegenüberstellung der verschiedenen Prozessschritte bei der biologischen Stickstoffelimination

Die **Nitrifikation/Denitrifikation** erfordert in vielen Fällen aufgrund des meist ungünstigen C/N-Verhältnisses im Schlammwasser den Einsatz einer zusätzlichen Kohlenstoffquelle. Hierzu eignen sich neben externen Substraten auch interne C-Quellen, wie beispielsweise Rohabwasser, Primärschlamm oder das Filtrat aus einer Schlammdeintegration. Neben den synthetischen externen Substraten, beispielsweise Essigsäure oder Methanol, können auch Reststoffe aus der Industrie, sofern sie die qualitativen Anforderungen an einen Einsatz bei der Abwasserreinigung erfüllen, eingesetzt werden. Beim Verfahren der Nitrifikation/Denitrifikation sind vor allem die Betriebskosten für die Sauerstoffversorgung der Nitrifikation sowie der im Vergleich zu den anderen Verfahren hohe Bedarf an Kohlenstoff für die Denitrifikation zu beachten.

Die technische Umsetzung der Nitrifikation/Denitrifikation kann ähnlich wie beim Hauptstromverfahren als vorgeschaltete oder intermittierende Denitrifikation realisiert werden, wobei häufig Verfahren mit suspendierter Biomasse und Schlammrückführung zum Einsatz kommen. Daneben wurden aber auch zahlreiche SBR-Anlagen zur Schlammwasserbehandlung errichtet und schließlich ist auch die Nutzung einer Membranbiologie oder eines Biofilmverfahrens zur Schlammwasserbehandlung möglich.

Zur Einsparung der Betriebskosten bietet sich eine Reduzierung der Ammoniumoxidation, die bei der Nitrifikation bis zum Nitrat erfolgt, auf den ersten Prozessschritt, die Nitritation, an. Das hierbei gebildete Nitrit kann dann in einem zweiten Schritt, der Denitritation, zu molekularem Stickstoff reduziert werden. Mit diesem Verfahren der **Nitritation/Denitritation** lassen sich etwa 25 % des Sauerstoffbedarfs und etwa 40 % des Kohlenstoffbedarfs im Ver-

Vergleich zur Nitrifikation/Denitrifikation einsparen [1]. Eine möglicherweise unvollständige Stickstoffelimination mit der Konsequenz erhöhter Nitritgehalte im Schlammwasser ist im Allgemeinen unproblematisch, da Nitrit in der biologischen Hauptstufe in der Regel vollständig eliminiert wird.

Verfahrenstechnisch kann die vollständige Oxidation des Ammoniums durch eine Hemmung der Nitritoxidation vermieden (Nitratationshemmung) [2] oder durch ein Auswaschen der Nitritoxidierer realisiert werden, die bei höheren Temperaturen eine geringere Wachstumsgeschwindigkeit als die Ammoniumoxidierer aufweisen [19]. Zur Hemmung der Nitritoxidation ist eine erhöhte Ammoniakkonzentration bzw. eine Limitierung der Sauerstoffversorgung erforderlich [1]. Technisch kann ersteres durch die Anhebung des pH-Wertes, beispielsweise durch Zugabe von Lauge, und damit einhergehend durch eine Verschiebung des Dissoziationsgleichgewichtes von Ammonium und Ammoniak erreicht werden. Zur Auswaschung der Nitritoxidierer können beispielsweise Durchlaufreaktoren ohne Schlammrückführung zum Einsatz kommen (Chemostat), bei denen die hydraulische Aufenthaltszeit so niedrig eingestellt ist, dass die Vermehrung der Nitritoxidierer gerade unterdrückt wird, die der Ammoniumoxidierer aber noch stattfindet, wie dies beispielsweise beim niederländischen Sharon-Verfahren der Fall ist [22]. Hierbei wird eine hydraulische Aufenthaltszeit von etwa 10 bis 12 Stunden eingestellt, die bei Reaktionstemperaturen von über 30°C ausreichend ist, um ein Wachstum der Nitritoxidierer wirkungsvoll zu unterdrücken [13]. Auch der Einsatz von SBR-Systemen, bei denen die Auswaschung der Nitritoxidierer über den Überschussschlammabzug kontrolliert wird, hat sich technisch durchaus bewährt [10]. Schließlich können auch Festbettreaktoren zur Nitritation genutzt werden, allerdings erfordert die verfahrenstechnische Beherrschung der Nitratationshemmung in diesen Anlagen einen nicht zu unterschätzenden Mess-, Steuer- und Regelaufwand.

Ein vollständiger Verzicht auf die Zugabe von Kohlenstoff zur Denitrifikation ist schließlich bei dem Verfahren der sogenannten **Deammonifikation** möglich. In zwei Prozessschritten kommt es hierbei zu einer nahezu vollständigen, direkten Umsetzung von Ammonium zu molekularem Stickstoff. Im ersten Prozessschritt muss ein Teil des Ammoniums zu Nitrit oxidiert werden, bevor dann in einem zweiten Schritt unter anoxischen Bedingungen eine Ammoniumelimination unter gleichzeitiger Nitritreduktion mit N_2 als Endprodukt stattfindet (Anammox) (siehe auch Bild 3) [30]. Etwa 10 % des Ammoniums werden bei diesem Verfahren allerdings zu Nitrat umgewandelt, so dass eine vollständige Stickstoffentfernung mit Hilfe der Deammonifikation nicht möglich ist.

Zur technischen Umsetzung der Deammonifikation sind aufgrund der geringen Wachstumsgeschwindigkeit der diese Reaktion bewirkenden Bakterien vor allem Festbettsysteme geeignet. Die großtechnischen Erfahrungen mit Tauchkörpern [14] und dem Moving-

Bed-Verfahren [27] zeigen, dass eine prozessstabile Etablierung dieses Prozesses möglich ist. Prinzipiell ist aber auch eine Realisation von Verfahren mit suspendierter Biomasse (z.B. SBR) möglich [3].

3.2 Chemisch/physikalische Verfahren

3.2.1 Ammoniakstrippung

Bei der Ammoniakstrippung wird Ammonium zunächst in das in Wasser gut lösliche und vergleichsweise leicht flüchtige Gas Ammoniak umgewandelt, das anschließend physikalisch aus dem Wasser ausgetrieben wird [24]. Ammonium und Ammoniak stehen in Abhängigkeit der Temperatur und des pH-Wertes im Gleichgewicht. Bei einem pH-Wert von 10 und einer Temperatur von 70°C beispielsweise liegt das Dissoziationsgleichgewicht vollständig auf der Seite des Ammoniaks, so dass in der Wasserphase kein Ammonium mehr vorhanden ist. Bei einer Temperatur von nur 20°C wird dieser Zustand allerdings erst bei einem pH-Wert von über 11 erreicht.

Zur anschließenden Überführung des im Wasser gelösten Ammoniaks in die Gasphase (Desorption) haben sich großtechnisch die Luft- und die Dampfstrippung in Füllkörperkolonnen bewährt. Auch die Desorption ist temperaturabhängig mit der Charakteristik, dass diese Reaktion umso schneller erfolgt, je höher die Temperatur ist. Dies bedeutet, dass der erforderliche Gasvolumenstrom zur Strippung mit zunehmender Temperatur absinkt. Diesem Vorteil steht bei der Dampfstrippung der erhöhte Energiebedarf für die Dampferzeugung gegenüber, was im großtechnischen Einsatz bedeutet, dass eine Dampfstrippung meist nur dort wirtschaftlich ist, wo auch Dampf in entsprechender Menge, beispielsweise aus der Klärschlammverbrennung oder -trocknung, zur Verfügung steht.

In einem der Desorption nachgeschalteten Prozessschritt muss nun das in die Gasphase gestrippte Ammoniak in ein verwertbares oder entsorgungsfähiges Produkt überführt werden. Ein direkter Austrag des Ammoniaks in die Atmosphäre sollte aus ökologischen Gründen nicht erfolgen und ist auch nicht genehmigungsfähig. Im großtechnischen Maßstab haben sich vor allem die saure Wäsche unter Gewinnung von Ammoniumsulfat und die Rektifikation zu Ammoniakwasser durchgesetzt. Bei der Rektifikation entsteht ein 25 bis 35 %-iges Ammoniakwasser, das beispielsweise bei der Rauchgasreinigung verwertet werden kann

3.2.2 Struvitfällung (Magnesium-Ammonium-Phosphat)

Zur chemisch-physikalischen Stickstoffentfernung aus dem Schlammwasser besteht auch die Möglichkeit, das gelöste Ammonium durch eine Fällungsreaktion in eine unlösliche Form zu überführen und durch Feststoffabtrennung aus dem Schlammwasser zu entnehmen. Dies kann durch eine Ausfällung von Struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) geschehen. Bei den üblicher-

weise im Schlammwasser vorherrschenden Mg- und PO_4 -Konzentrationen ist allerdings in der Regel eine Zugabe sowohl von Magnesium als auch von Phosphat erforderlich, um eine nennenswerte Ammoniumelimination zu erreichen. Der Fällungsumfang ist darüber hinaus noch vom pH-Wert abhängig; das Minimum der Struvit-Löslichkeit (Fällungsmaximum) wird bei etwa pH 11 erreicht.

Eine gewisses Potential hat die Struvitfällung auf Anlagen mit vermehrter biologischer Phosphorelimination, da es auf diesen Anlagen zu einer Rücklösung des während der Abwasserreinigung gebildeten Polyphosphats während der Faulung kommt und hierbei sowohl Phosphat wie auch Magnesium in das Schlammwasser freigesetzt werden. Allerdings führen chemisch-physikalische Refixierungsvorgänge während der Stabilisierung dazu, dass der größte Teil des zunächst gelösten Phosphats über Adsorptions- und Fällungsvorgänge wiederum gebunden wird [17]. Die Magnesiumkonzentration im Schlammwasser ist dagegen auf Anlagen mit vermehrter biologischer Phosphorelimination deutlich erhöht. Daher sind die Bedingungen für eine gezielte Struvitfällung auf derartigen Anlagen in der Regel günstiger als bei Kläranlagen mit chemischer P-Fällung.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der erhebliche Schlammanfall. Bei der Fällungsreaktion entstehen pro 1 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ mindestens 17,5 kg Fällschlamm. Inwiefern dieser Schlamm landwirtschaftlich verwertet werden kann, ist nicht nur von der Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe abhängig, sondern auch vom Umfang der mitgefällten Schwermetalle oder organischen Schadstoffe. Großtechnische Erfahrungen mit der Struvitfällung und dem primären Verfahrensziel einer Phosphorelimination aus dem Schlammwasser in Japan zeigen, dass der Schadstoffgehalt des gebildeten Struvits auf kommunalen Kläranlagen gering ist und dass bei entsprechender Produktform eine landwirtschaftliche Vermarktung möglich ist [29]. Die Anforderungen der Düngemittelverordnung sind zu beachten.

Die Struvitfällung kann technisch in unterschiedlichster Form realisiert werden. Neben einer „klassischen“ Fällung des Ammoniums aus der gelösten Phase und anschließender Abtrennung in einem Absetzbecken haben sich großtechnisch vor allem Wirbelbettverfahren, bei denen die Ausfällung auf Sandpartikeln als Aufwuchskeim erfolgt (Kristallisation), etabliert. Bei der „klassischen“ Fällung ist aufgrund der Mitfällung von partikulären Inhaltsstoffen des Schlammwassers mit einem unter Umständen deutlich erhöhten Schlammanfall zu rechnen.

Für die gezielte Stickstoffelimination konnte sich das Verfahren bisher nicht durchsetzen, gewinnt aber im Hinblick auf derzeitige Bestrebungen zur weitergehenden Rückgewinnung von Phosphor aus dem Klärschlamm zur Zeit wieder an Bedeutung [5].

3.3 Beispiele ausgeführter Anlagen

Inzwischen sind auf einer Vielzahl europäischer Kläranlagen separate Schlammwasserbehandlungsanlagen errichtet worden. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl großtechnischer Anlagen mit Angabe der verwendeten Verfahrenstechnik.

Tabelle 1: Zusammenstellung von großtechnischen Anlagen zur separaten Schlammwasserbehandlung

Kläranlage	Ausbaugröße	Verfahren	Quelle
Aachen-Soers	458.000	SBR	
Aachen-Süd	60.000	Luftstrippung	
Altötting	40.000	SBR	
Amsterdam-Ost (NL)	600.000	Chemostat	
Bad Hersfeld	57.000	SBR	[9]
Bergisch-Gladbach	200.000	Nitrifikation	
Bern (CH)	300.000	SBR	
Bickenbach-Engelskirchen	25.000	SBR	
Cloppenburg	190.000	Dampfstrippung	[26]
Cuxhaven	400.000	Luftstrippung	
Dormagen	80.000	Membranbiologie	
Friedrichshafen	86.000	SBR	
Fulda	150.000	Wirbelbett	
Goch	122.000	Nitrifikation	
Göttingen	220.000	Luftstrippung	[8]
Gütersloh-Putzhagen	200.000	Nitrifikation	
Hamburg	2.100.000	Nitrifikation	[21]
Hanau	270.000	SBR	
Hattingen	100.000	Wirbelbett	[27, 28]
Heppenheim	80.000	Luftstrippung	
Herbolzheim	15.000	SBR	[23]
Ingolstadt	235.000	SBR	[18]
Kamp-Lintfort	75.000	Nitrifikation	
Kohlfurth	200.000	Membranbiologie	
Köln-Stammheim	1.450.000	SBR	
Krefeld	1.200.000	Nitrifikation	
Landshut	260.000	Wirbelbett	[15]
Memmingen	275.000	SBR	
Moers-Gerdt	250.000	Tropfkörper	
München I	2.000.000	Nitrifikation	
Nürnberg I	1.225.000	Tropfkörper	
Obere Lutter	380.000	Nitrifikation	
Perfgebiet-Wallau	45.000	Luftstrippung	
Pforzheim	250.000	Tropfkörper	[4]
Rheda-Wiedenbrück	64.000	Nitrifikation	
RHV Mattig-Hainbach (A)	45.000	Luftstrippung	
Rosenheim	350.000	SBR	[16]
Rotterdam (NL)	470.000	Chemostat	[31]
Salzburg (A)	620.000	SBR	

Sinzing	115.000	SBR	
Strass/Zillertal (A)	167.000	SBR	[33]
Straubing	200.000	Luftstrippung	[25]
Tuttlingen	40.000	SBR	
Utrecht (NL)	400.000	Chemostat	[31]
Verden an der Aller	95.000	Vorgeschaltete Denitrifikation	
Wolfhagen	23.000	Nitrifikation	

4. Beurteilungskriterien und Verfahrenswahl

4.1 Allgemeine Hinweise

Zur qualitativen Beurteilung der Notwendigkeit einer separaten Schlammwasserbehandlung kann die im ersten Teil des Arbeitsberichts [6] aufgeführte Bewertungsmatrix genutzt werden. Sie ermöglicht eine erste Einschätzung, dennoch ist eine detaillierte Beurteilung, insbesondere im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit, in jedem Einzelfall erforderlich. Da die Wirtschaftlichkeit und die verfahrenstechnische Eignung in starkem Maße von den Randbedingungen der Kläranlage abhängen, werden nachfolgend Hinweise zur Auswahl des geeigneten Verfahrens gegeben.

4.2 Kläranlagen- und verfahrensspezifische Randbedingungen

4.2.1 Schlammwasseranfall und –beschaffenheit

Die tägliche, wöchentliche und saisonale Variation des Schlammwasseranfalls bestimmt das erforderliche Ausgleichsvolumen des Schlammwasserspeichers, der bei nahezu allen Verfahren erforderlich ist. Zur Ermittlung der Schlammwassermengen kann entweder auf die theoretischen Ansätze des ersten Teils des Arbeitsberichtes zurückgegriffen werden [6] oder bei bereits bestehenden Anlagen wird eine entsprechende Messkampagne durchgeführt. Der Speicher ist mindestens auf die Tages-Schlammwassermenge in der belastungsintensivsten Jahreszeit zu bemessen.

Eine für die Auswahl des geeigneten Verfahrens entscheidende Größe ist die Stickstoffkonzentration im Schlammwasser. Die Vorteilhaftigkeit der chemisch-physikalischen Verfahren, insbesondere der Strippung, wächst mit zunehmender Stickstoffkonzentration. Da in diesem Fall der Volumenstrom des Schlammwassers geringer ist, ergeben sich geringere Investitions- und Betriebskosten.

Für die Anwendbarkeit der verschiedenen biologischen Verfahren ist die Säurekapazität des Schlammwassers ein entscheidendes Beurteilungskriterium. Ohne Kalkkonditionierung ist bei alleiniger Nitrifikation in jedem Fall mit einem kritischen Absinken des pH-Wertes aufgrund der bei der Ammoniumoxidation entstehenden H^+ -Ionen zu rechnen. Daher empfiehlt

es sich in diesen Fällen, eine zusätzliche Denitrifikation einzurichten, um zumindest einen Teil der verbrauchten Pufferkapazität zurückzugewinnen. Bei einer Konditionierung des Schlammes mit Kalk kommt es zu einer deutlichen pH-Wert-Anhebung, Kalziumkarbonat fällt dann größtenteils im entwässerten Schlamm aus. Die Kalkkonditionierung führt vor allem bei Strippanlagen zu einer nennenswerten Einsparung von Betriebsstoffen (Kalkmilch, Natronlauge) zur Einstellung des für die Strippung erforderlichen pH-Wertes.

4.2.2 Energiesituation und Betriebsmitteloptimierung

Überschüssige thermische Energie, wie beispielsweise Heissdampf aus der Verbrennung bzw. Trocknung oder Abwärme aus Blockheizkraftwerken, kann vorteilhaft vor allem bei Strippanlagen genutzt werden.

Sofern bei der biologischen Schlammwasserbehandlung das Verfahren der Nitrifikation/Denitrifikation bzw. der Nitritation/Denitritation zum Einsatz kommen soll, ist eine zusätzliche Kohlenstoffquelle für die Denitrifikation erforderlich. Hierzu können neben externen Kohlenstoffquellen auch interne Substrate, wie beispielsweise die wässrige Phase einer Primärschlammversäuerung, verwendet werden. Im Rahmen einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist in diesem Zusammenhang zu prüfen, ob eine Primärschlammversäuerung angesichts der unter durchschnittlichen Bedingungen nur begrenzt verfügbaren Kohlenstofffracht und der erheblichen sicherheitstechnischen und betrieblichen Anforderungen tatsächlich wirtschaftlicher ist als der Zukauf externer Kohlenstoffquellen. Zudem bieten sich auch industrielle Reststoffe, beispielsweise aus der Lebensmittelindustrie, als kostengünstige Alternative zu den technischen Kohlenstoffquellen wie Methanol, Essigsäure oder Alkohol an.

4.2.3 Prozessstabilität

Die Prozessstabilität ist bei den chemisch-physikalischen Verfahren in der Regel am größten. Ebenso erfolgen Inbetriebnahme bzw. Anfahren nach Betriebsstörungen meist schneller. Für biologische Verfahren erweisen sich die Einfahrperioden oft als langwierig, dies gilt vor allem für die Deammonifikation. Bei geringen Veränderungen der Verfahrensrandbedingungen, insbesondere der Zulaufqualität, erweist sich die Nitrifikation/Denitrifikation ebenso stabil wie die chemisch-physikalischen Verfahren. Bei der Nitritation/Denitritation bzw. der Deammonifikation sind Schwankungen der Prozessstabilität im großtechnischen Betrieb, beispielsweise bei zu starkem Auskühlen des Schlammwassers im Winter, immer wieder zu beobachten.

4.2.4 Platzangebot und nutzbare Bausubstanz

Bei der Ertüchtigung bestehender Kläranlagen durch eine getrennte Schlammwasserbehandlung sind das vorhandene Platzangebot und die Möglichkeit einer sinnvollen Integration der erforderlichen Anlageteile in die bestehende Behandlungstechnologie wesentliche Beurteilungskriterien. Grundsätzlich sind der Volumen- und vor allem der Flächenbedarf chemisch-physikalischer Verfahren geringer, da die Reaktoren im Allgemeinen als Kolonnen ausgebildet werden, um ausreichend Grenzflächen für die Trennleistung zwischen Wasser- und Gasphase zu bieten. Zur optimalen Platznutzung bei biologischen Verfahren empfiehlt sich ebenfalls eine Ausrichtung in die Höhe (tiefe Becken). Ein wesentliches Potential zur Platzeinsparung liegt in der effizienteren Nutzung vorhandener Bausubstanz.

An die Form und Geometrie eines Schlammwasserspeichers bestehen keine Ansprüche, wohl aber an die Oberflächenbeständigkeit und den Schutz vor Wärmeverlusten und Emissionen. Daher eignen sich grundsätzlich alle verfügbaren Behälter oder Becken, die gegebenenfalls nachgerüstet werden müssen (Oberflächenbeschichtung, Abdeckung, Wärmedämmung, Entlüftung). Ausführungsbeispiele demonstrieren die Verwendung von z.B. Vor-eindickern, Belebungsbecken, Tropfkörper oder Reaktoren der aerob-thermophilen Stabilisierung [z.B. 4, 31, 15].

Da die Reaktoren für chemisch-physikalische Verfahren mit entsprechender Ausstattung als vorgefertigte Anlagen geliefert werden, wird sich keine wirtschaftliche Nutzung von Altbeständen finden. Müssen vorhandene Becken belüftet werden, beispielsweise bei Nutzung als Nitrifikationsreaktor, so ist zu prüfen, ob ein wirtschaftlicher O_2 -Eintrag erreicht werden kann. Gerade bei flachen Becken ist bezogen auf die Jahreskosten u.U. ein Beckenneubau günstiger.

4.2.5 Reststoffentsorgung

Der produzierte Überschussschlamm einer biologischen Schlammwasserbehandlung kann ohne weitere Vorbehandlung den auf der Kläranlage vorhandenen Verfahrensstufen der Schlammbehandlung zugegeben werden.

Bei den chemisch-physikalischen Verfahren hat die Reststoffentsorgung/-verwertung entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Die Entsorgungs-/Verwertungskosten und ggf. die Verwertungserlöse sollten daher im Rahmen des Ausschreibungsverfahrens in jedem Fall konkret abgefragt und ggf. auf Basis langfristiger Verträge auch festgeschrieben werden.

4.2.6 Geruchsemissionen

Chemisch-physikalische Verfahren werden in geschlossenen Systemen ohne geruchsbelastete Abluft umgesetzt. Wird jedoch eine Dekarbonisierungsstufe vorgeschaltet, dann ist eine stark geruchsbelastete Abluft zu erwarten und eine Abluftbehandlung, im Regelfall eine Biofiltration, erforderlich. In biologischen Reaktoren sind die möglichen Ammoniak-Konzentrationen begrenzt und die Gefahr einer Geruchsbelastung ist kaum größer als im Hauptstrom. Allerdings können Schlammwasserspeicher vor allem im Falle hoher pH-Werte (Kalkkonditionierung) unangenehme Emissionen verursachen; in diesem Fall ist eine Abluftbehandlung sinnvoll. Die Zuleitung des Schlammwassers zum Reaktor sollte dann unterhalb des Wasserspiegels erfolgen.

4.3 Wirtschaftlichkeit

Beim Vergleich unterschiedlicher Varianten zur Schlammwasserbehandlung hat die Wirtschaftlichkeit eine herausragende Bedeutung, ist sie doch in den allermeisten Fällen das wesentliche Entscheidungskriterium zur Auswahl eines bestimmten Behandlungsverfahrens. In diesem Zusammenhang ist nochmals darauf hinzuweisen, dass sich die Untersuchung geeigneter Varianten zur Erhöhung der Stickstoffelimination oder zur Verbesserung der Prozessstabilität auf der jeweiligen Kläranlage nicht notwendigerweise ausschließlich auf eine getrennte Behandlung des Schlammwassers konzentrieren sollte. Die gemeinsame Behandlung im Hauptstrom erweist sich oftmals als sinnvolle Alternative.

Wie bei allen Wirtschaftlichkeitsvergleichen sollte die Auswahl eines Verfahrens ausschließlich auf einem Vergleich der Jahreskosten unter Berücksichtigung der Investitions- und der Betriebskosten, insbesondere der Entsorgungskosten bei den chemisch-physikalischen Verfahren, beruhen. Dies kann sowohl auf Basis eines Projektkostenbarwertes wie auch unter Verwendung der Jahreskosten als Summe aus Jahreskapital- und Betriebskosten erfolgen und sollte sich an den Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen der LAWA [20] orientieren.

Eine Beurteilung auf Basis der Jahreskosten ist gerade bei einem Vergleich der unterschiedlichen Verfahren zur Schlammwasserbehandlung (inkl. Reststoffbehandlung und -entsorgung) unbedingt erforderlich, da diese zum Teil erheblich unterschiedliche Kostenstrukturen aufweisen. Neben Verfahren mit einem vergleichsweise hohen Investitionsaufwand bei gleichzeitig eher geringen Betriebskosten kommen auch Verfahren mit einem sehr niedrigen Investitions-, demgegenüber aber hohen Betriebskostenaufwand in Frage.

Werden die Bieter im Rahmen von Ausschreibungen mit Leistungsprogramm (Funktionalausschreibung) aufgefordert, die Betriebsmittelverbräuche und Betriebskosten von den Anbietern detailliert anzugeben und zu garantieren sind, empfiehlt es sich in jedem Fall,

bietern detailliert anzugeben und zu garantieren sind, empfiehlt es sich in jedem Fall, diese Angaben einer eingehenden Überprüfung zu unterziehen und im Zweifel eigene Erfahrungswerte zur wirtschaftlichen Beurteilung heranzuziehen.

4.3.1 Investitionskosten

Zu den häufigsten investiven Aufwendungen bei einer gemeinsamen Schlammwasserbehandlung im Hauptstrom zählen die Kosten für die Errichtung einer Dosierstation für externe Kohlenstoffquellen sowie im Einzelfall auch zusätzliches, für die Schlammwasserbehandlung notwendiges Beckenvolumen. Bei der getrennten Schlammwasserbehandlung sind sämtliche, mit dem Bau einer solchen Anlage verbundenen Kosten zu berücksichtigen. Dazu zählen insbesondere die Reaktoren zur Schlammwasserspeicherung und –behandlung sowie die erforderliche Verrohrung und maschinelle Ausrüstung. Sowohl bei der gemeinsamen, aber in noch viel stärkerem Maße bei der getrennten Schlammwasserbehandlung sind die Kosten für die EMSR-Technik zu berücksichtigen, da diese Aufwendungen gerade bei komplexen Steuerungs- und Regelungsanforderungen einen beträchtlichen Anteil an den Gesamtkosten haben.

In Bild 4 sind die Investitionskosten verschiedener Verfahren zur Schlammwasserbehandlung, wie sie sich aus einer Auswertung großtechnischer Anlagen und theoretischer Abschätzungen ergeben [12], dargestellt.

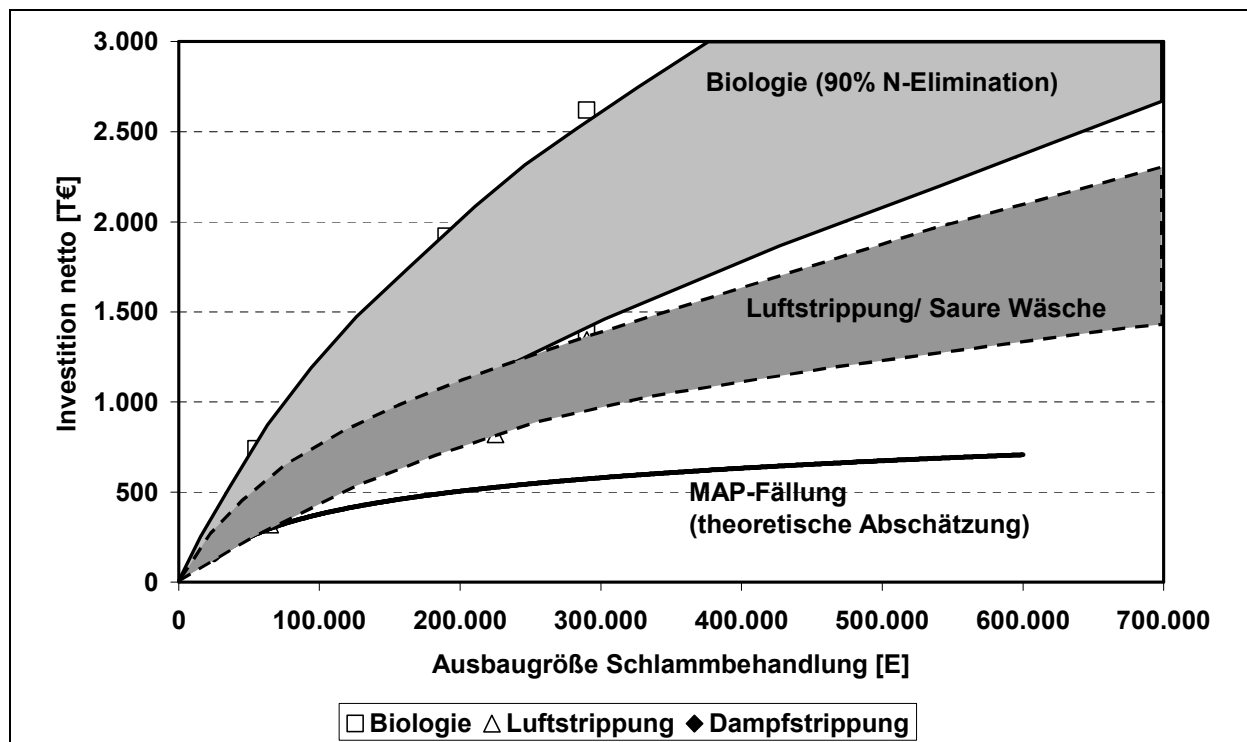


Bild 4: Investitionskostenvergleich verschiedener Verfahren zur separaten Schlammwasserbehandlung [12]

4.3.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten der verschiedenen Verfahren weichen zum Teil erheblich voneinander ab und basieren auf unterschiedlichen Kostenanteilen. Die nachfolgende Aufzählung typischer Betriebskostenanteile der Verfahren zur Schlammwasserbehandlung erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, kann aber als Orientierung dienen und muss selbstverständlich den speziellen örtlichen Randbedingungen angepasst werden.

- Energiebedarf

Bedarf von elektrischer Energie ist bei allen Verfahren zu berücksichtigen. Bei den biologischen Verfahren dominiert als wichtigster Verbraucher die Belüftung. Auch bei der Luftstrippung wird der Gesamtenergiebedarf wesentlich durch das Strippluftgebläse bestimmt. Als weiterer Energiebedarf ist auch die thermische Energie zu berücksichtigen. Dies betrifft vor allem die Dampfstrippung mit ihrem verfahrensbedingten erheblichen Wärmebedarf.

- Einsatz von Hilfsstoffen

Hilfsstoffe, zum Beispiel Entschäumer, Natronlauge, Schwefelsäure, sind bei vielen Verfahren zur Vorbehandlung des Schlammwassers oder zur Prozesssteuerung und -unterstützung erforderlich und können in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens die Jahreskosten substantiell beeinflussen.

- Reststoffentsorgung

Bei allen Verfahren fallen Prozessreststoffe zur Entsorgung an, die unter Umständen erhebliche Betriebskosten verursachen können. Daneben kann vor allem das Ammoniakwasser, das bei der Dampfstrippung als Reststoff anfällt, mit Erlös verwertet werden. Trotz der prinzipiellen Verwertbarkeit der Reststoffe aus der Strippung sollte unbedingt im Angebotsverfahren mit dem Anbieter der Strippanlage eine vertragliche Regelung hinsichtlich der Entsorgung bzw. Verwertung der Rückstände angestrebt werden. Inwiefern dies zukünftig auch für Fällungsprodukte beim Einsatz der Struvitfällung möglich sein wird, ist derzeit nicht abzusehen. Trotz der Diskussion um eine Rückgewinnung des Nährstoffs Phosphor aus Abwasser, wozu prinzipiell auch die Struvitfällung vor allem in Kombination mit einer vermehrten biologischen Phosphorelimination geeignet ist, muss die Verwertung dieses Reststoffes mit Erlös eher skeptisch bewertet werden.

- Personalkosten

Die Personalkosten sind ebenfalls bei den Betriebskosten mit zu berücksichtigen. Im Allgemeinen ist der notwendige Betreuungsaufwand für eine getrennte biologische Schlammwasserbehandlung eher gering und kann mit einem Personalbedarf von min-

destens 0,5 MAa abgeschätzt werden. Bei Strippanlagen liegt er erwartungsgemäß höher und kann zu 1 bis 1,5 MAa abgeschätzt werden.

- **Wartungs- und Instandhaltungskosten**

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Maschinen- und Elektrotechnik können in Abhängigkeit ihrer Komplexität mit einem prozentualen Anteil von etwa 3 bis 5 %/a bezogen auf die Investitionskosten abgeschätzt werden. Der korrespondierende Wert für die Bautechnik liegt bei etwa 0,5 bis 1 %/a.

In Tabelle 2 sind Bereiche für Betriebsmittelverbräuche und Reststoffentsorgungskosten für verschiedene Verfahren der getrennten Schlammwasserbehandlung zusammengestellt.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Betriebsmittelverbräuche und Reststoffentsorgungskosten verschiedener Verfahren zur getrennten Schlammwasserbehandlung [12]

		Einheit	SBR mit Nitrifikation und 90 %-iger Denitrifikation	Sharon mit Nitrifikation und 90 %-iger Denitrifikation	Deammonifikation/Anammox	Dampfstrippung	Luftstrippung	Struvitfällung
Energie	Strombedarf	KWh/m ³	4 – 6	3 - 5	2,5 - 3	2,8 – 3,5	1,5 – 1,8	1,5 – 1,7
	Wärmebedarf	KWh/m ³	-	10 – 15	-	40 – 45	8 – 10	-
Hilfsstoffe	Methanol	kg/kg N	2,5 - 3	1,6 – 2,0	-	-	-	-
	Natronlauge (50 %)	kg/kg N	-	-	-	3,5 – 4,5	3,5 – 4,5	-
	Schwefelsäure (78 %)	kg/kg N	-	-	-	-	3,7 – 3,9	-
	Magnesiumoxid	kg/kg N	-	-	-	-	-	4,8 – 5,4
	Phosphorsäure (85 %)	kg/kg N	-	-	-	-	-	6,8 – 8
Reststoffentsorgung	Überschussschlamm	kg/kg N	0,5	0,3	0,1	-	-	-
	Ammoniakwasser (25 %)	kg/kg N	-	-	-	3,9 – 4,1	-	-
	Ammoniumsulfat (38 %)	kg/kg N	-	-	-	-	11 – 13	-
	Struvit-Fällschlamm	kg/kg N	-	-	-	-	-	17 – 19

5. Rechtliche Rahmenbedingungen

5.1 Genehmigungsrahmen

Wenn durch die separate Schlammwasserbehandlung eine Erweiterung der Anschlussgröße der Kläranlage erreicht werden soll, ist in jedem Fall gemäß § 7 WHG eine Genehmigung zu beantragen. Bei einer Ertüchtigung mit dem Ziel einer Schadstoffreduzierung ohne Erhöhung der Anschlussgröße sind im Vorfeld mit der zuständigen Genehmigungsbehörde Art und Umfang der Genehmigung abzustimmen, da je nach Bundesland unter Umständen keine separate Genehmigung und statt dessen eine Änderungsanzeige erforderlich ist.

Im Allgemeinen bedeutet die Errichtung einer getrennten Schlammwasserbehandlung eine wesentliche Änderung des Betriebes. Dies bedeutet, dass eine Anlage zur Schlammwasserbehandlung einer wasserrechtlichen und je nach Ausführung einer Genehmigung nach Baurecht bedarf.

5.2 Verrechenbarkeit mit der Abwasserabgabe

Grundsätzlich ermöglicht das Abwasserabgabengesetz [11] über den §10 Abs.3 eine Verrechnung mit der Abwasserabgabe. Dort heißt es: „Werden Abwasserbehandlungsanlagen errichtet oder erweitert, deren Betrieb eine Minderung der Fracht einer der bewerteten Schadstoffe und Schadstoffgruppen in einem zu behandelnden Abwasserstrom um mindestens 20 vom Hundert sowie eine Minderung der Gesamtschadstofffracht beim Einleiten in das Gewässer erwarten lässt, so können die für die Errichtung oder Erweiterung der Anlage entstandenen Aufwendungen mit der für die in den drei Jahren vor der vorgesehenen Inbetriebnahme der Anlage insgesamt für diese Einleitung geschuldeten Abgabe verrechnet werden“. Da Schlammwasserbehandlungsanlagen im Wesentlichen zur Verringerung der Stickstoffrückbelastung eingesetzt werden, beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen zur Verrechenbarkeit auf diesen Parameter. Das Abwasserabgabengesetz ermöglicht eine Verrechnung bereits, wenn nur ein bewerteter Schadstoff, in diesem Fall Stickstoff, im Teilstrom um mehr als 20 % vermindert wird; eine zusätzliche Reduzierung weiterer Schadstoffe, wie zum Beispiel Phosphor oder CSB, ist nicht Voraussetzung für die Verrechenbarkeit.

Die Umsetzung der Möglichkeit zur Verrechnung wird in den Bundesländern unterschiedlich praktiziert, da die wesentlichen Begriffe im Gesetzestext verschieden interpretiert werden. So wird zum Beispiel in Hessen, Niedersachsen und Bremen das Schlammwasser aus der Schlammwässerung als ein zu behandelnder Abwasserstrom angesehen. Dies bedeutet, dass eine Verrechnung dann erfolgt, wenn aus dem Schlammwasser (Teilstrom) selber 20 % der Fracht eliminiert werden.

In anderen Bundesländern wird die 20 %-ige Frachtreduzierung auf die Einleitstelle des Abwasserhauptstroms bezogen. Eine 20 %-ige Reduzierung im Teilstrom reicht dann nicht aus. In diesem Fall ist mit der Behörde im Vorfeld abzustimmen, wie der Nachweis der 20 %-igen Frachtreduzierung zu führen ist. Je nach Bundesland ist eine Verrechnung aufgrund eines Vergleichs der Ablaufwerte (vor bzw. nach der Errichtung der Teilstrombehandlung) aus der Eigenüberwachung bei Trockenwettertagen möglich, aber auch dem rechnerischen Nachweis einer zu erwartenden Frachtreduzierung ohne Messprogramm nach Umsetzung der Maßnahme wird zugestimmt (Bayern).

Zusätzlich zu der rückwirkenden Verrechnung mit der Abwasserabgabe aus den 3 Jahren vor der Inbetriebnahme bietet die Schlammwasserbehandlung die Möglichkeit, im Anschluss an die Umsetzung der Maßnahme den Ablaufwert für den Parameter N und/oder P gemäß § 4 Abs. 5 AbwAG niedriger zu erklären.

Grundsätzlich ist die niedrigere Erklärung von Ablaufwerten vom Gesetzestext her nicht Bedingung für eine Verrechnung mit der Abwasserabgabe.

6. Hinweise zu Planung, Bau und Betrieb

6.1 Hinweise zur Planung und zum Bau

Im Rahmen der Grundlagenermittlung und der Vorplanung sind bei der Planung einer Anlage zur separaten Schlammwasserbehandlung die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- Messungen / Analysen zu Frachtbetrachtungen im Abwasserhauptstrom (Kläranlagenzulauf / Zulauf biologische Reinigungsstufe / Kläranlagenablauf)
- Messungen zur Bilanzierung der Schlammbehandlung mit Rückbelastung
- Plausibilitätsprüfung der Rückbelastungsdaten anhand von TS- und Gasbilanzen
- Standortspezifische Prognosen (Annahme von Fremdschlämmen, Cofermentation,...)
- Festlegung der Bezugsgrößen für eine Bemessung (85 %-Werte oder Mittelwerte der Rückbelastung, Einleitungsstelle der Rückbelastung im Klärwerk)
- Bestimmung des optimalen Gesamtkonzepts, z.B. durch Untersuchung des unterschiedlichen Schwankungsfaktors bei Bewirtschaftung, separater Behandlung oder Mitbehandlung im Hauptstrom
- Überprüfung der Denitrifikationskapazität im Hauptstrom (C/N-Verhältnis)
- Überprüfung der vorhandenen und nutzbaren Bau- und Anlagentechnik

Bei den weiteren Planungsschritten ist zu beachten, dass die chemisch-physikalischen Verfahren, wie die Dampfstrippung oder Luftstrippung, mit anschließender „Saurer Wäsche“ Produkte erzeugen oder Einsatzstoffe benötigen, für die doppelwandige Lagerbehälter ge-

mäßig WHG (Säurelagerung bei Luftstrippung) oder gemäß TRD (Dampfstrippung zu Ammoniakwasser) mit entsprechenden Abfüllplätzen benötigt werden.

Da viele Verfahren der getrennten Schlammwasserbehandlung durch Patente oder Gebrauchsmuster geschützt sind oder sich zur Zeit noch in der Entwicklung befinden, ist die Funktionalausschreibung oftmals Regel vorteilhaft. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass durch eine eindeutige Beschreibung der Schnittstellen, der geforderten Reinigungsleistung (in Bezug auf Frachten oder Konzentrationen als Tages- oder Momentanwerte) und der spezifischen Verbrauchswerte (in Bezug auf m³ Schlammwasser oder kg N eliminiert) eine Vergleichbarkeit und Vollständigkeit der Angebote gewährleistet wird.

Grundsätzlich sind die Verfahren zur getrennten Schlammwasserbehandlung weitgehend unabhängig vom Betrieb der Gesamtkläranlage umzusetzen und haben nur geringe Auswirkungen auf den Betrieb der Kläranlage während der Bauzeit. Zur Umsetzung der Maßnahmen ist ein Zeitrahmen von 1 bis 1,5 Jahren zu kalkulieren. Die Strippverfahren sind aufgrund des geringeren bautechnischen Aufwands in weniger als 12 Monaten abzuwickeln.

Die Dauer der Inbetriebnahmephase einer separaten Schlammwasserbehandlung lässt sich anhand bestehender Anlagen abschätzen. Die Anlagen zur Strippung erreichen im Allgemeinen in weniger als einem Monat nach Montageende den Volllastbetrieb. Für die biologischen Anlagen sind die Zeiträume der Inbetriebnahme länger, da eine nitrifikantenreiche Biomasse aufgebaut werden muss. Bei der Deammonifikation muss aufgrund des langsamen Wachstums mit einem deutlich längeren Inbetriebnahmezeitraum gerechnet werden.

Wird eine Anlage zur separaten Behandlung im Rahmen einer GU-Ausschreibung vergeben, empfiehlt es sich, die Inbetriebnahme von diesem Anbieter durchführen zu lassen. Die Inbetriebnahme ist dann mit einer intensiven Schulung des Kläranlagenpersonals zu verbinden.

6.2 Hinweise zum Betrieb von Anlagen zur separaten Schlammwasserbehandlung

Der erfolgreiche Betrieb einer technischen Anlage ist von der Akzeptanz und dem Einsatz des Betriebspersonals abhängig. Die Grundlagen und die eingesetzten Aggregate zur biologischen Reinigung sind dem Personal auf der Kläranlage bekannt. Es ist daher davon auszugehen, dass biologische Verfahren zur Schlammwasserbehandlung im Rahmen der alltäglichen Arbeiten mitbetreut werden können. Bei der Nitrifikation/Denitrifikation und der Deammonifikation sind die Besonderheiten der Prozessführung dem Betriebspersonal im Allgemeinen nicht bekannt. Eine entsprechende Schulung des Betriebspersonals ist bei diesen biologischen Verfahren in jedem Fall erforderlich.

Das Strippverfahren ist ein Zusammenspiel bekannter Anlagenkomponenten, die in einer für das Kläranlagenpersonal in der Regel unbekanntem Gesamtfunktion stehen. Die wesentlichen Anlagenkomponenten sind die Vorlagebehälter mit den Dosiereinrichtungen, die Förderpumpen, der Wärmetauscher, die pH-Wert-, Temperatur- und Druckmessungen, die Gebläse und die Füllkörperkolonnen. Zum Verständnis der Verfahrenstechnik ist allerdings - ebenso wie bei den biologischen Verfahren zur Schlammwasserbehandlung - eine technisch ausgebildete Fachkraft (Techniker, Meister oder Ingenieur) als Betreuung sinnvoll.

Selbst bei optimalem Betrieb und geeigneter Ausführung der Anlage wird es bei der separaten Behandlung von Schlammwasser immer wieder zu Zuständen im Betrieb kommen, die besondere Maßnahmen erfordern. Hierzu ist insbesondere das Schäumen der mit Polymeren versetzten Schlammwässer zu nennen, das oft nur durch den Einsatz von Entschäumern zu beherrschen ist. Darüber hinaus ist bei biologischen Verfahren die Kontrolle der Nitrifikationsleistung, die aufgrund der hohen Ammoniumkonzentrationen und möglicher pH-Wert-Schwankungen gestört werden kann, regelmäßig durchzuführen. Aus betrieblicher Sicht ist es sinnvoll, bei biologischen Verfahren mit suspendierter Biomasse eine Leitung zur Animpfung/Stützung der Schlammwasserbehandlung mit nitrifikantemhaltigem Belebtschlamm aus dem Hauptstrom der Kläranlage vorzusehen, falls es die standortspezifischen Randbedingungen zulassen. Dies gilt nicht für Biofilmverfahren. Darüber hinaus empfiehlt es sich, bereits bei der Konzeption der Anlage steuerungstechnisch unterschiedliche Betriebsarten (Teilnitrifikation, zeitweise Bewirtschaftung, vollständige Nitrifikation mit angepasster Denitrifikation) vorzusehen, so dass der Betrieb in Abhängigkeit vom Hauptstrom der Kläranlage unterschiedliche Reinigungsziele umsetzen kann.

Bei den Strippverfahren treten Betriebsprobleme besonders im Bereich der Wärmetauscher auf. Auf diesen kommt es bei der Temperaturerhöhung zu Ausfällungen, die mit einer Reduzierung der Durchflussleistung und einer Abnahme der Wärmeübertragung einhergehen. Es empfiehlt sich daher in jedem Fall eine redundante Ausführung dieses Anlageteils und eine vollautomatisierte separate Spülung. In Abhängigkeit von der Feststoffbelastung der in die Kolonne gelangenden Prozesswässer und der Ausführung der eingesetzten Füllkörper kann es in der Strippkolonne selber zu Ablagerungen und damit zu einer Erhöhung der Druckverluste mit Reduzierung der Reinigungsleistung kommen. Erfahrungsgemäß muss deshalb die Strippkolonne 1- bis 2-mal im Jahr außer Betrieb genommen und gereinigt werden.

Unabhängig vom Verfahren der Schlammwasserbehandlung treten im Bereich der Schlammwässerung und Schlammwasserspeicherung häufig Ausfällungen in Rohrleitungen oder an Pumpen auf. Grund hierfür ist der hohe Gehalt an Mineralien und Carbonaten im Schlammwasser, die bei Druckänderungen zu Ausfällungen führen. Mögliche Gegen-

maßnahmen hierzu sind die Spülung mit leichten Säuren, der Einsatz von Mitteln auf Basis von Phosphorsäure, die zu einer Komplexierung der Carbonate führen kann, oder die Aufbringung eines Magnetfeldes mit einem Wechsel-/Dauermagneten.

Vor dem Hintergrund der hier aufgeführten betrieblichen Störungen ist es besonders wichtig, die separate Schlammwasserbehandlung möglichst betriebssicher und nach Möglichkeit in den wesentlichen technischen Anlagenteilen redundant auszuführen.

Bei Strippanlagen, die innerhalb von wenigen Stunden an- und abgefahren werden können, wird zur Reduzierung der Investitionen meist auf eine Mehrstrahigkeit verzichtet. Statt dessen wird durch die Schaffung eines ausreichenden Speichervolumens vor der Anlage eine Möglichkeit zur Überbrückung eines Zeitraums zur Verfügung gestellt, in dem die Anlage gewartet oder repariert werden kann. Übliche Zeiträume hierfür sind 48 h, die auch im Rahmen einer Betriebsbetreuung von den Ausrüstern solcher Anlagen in Serviceverträgen akzeptiert werden.

Aufgrund der Bedeutung der Anlagen zur Schlammwasserbehandlung empfiehlt es sich, die Anlagen in den regelmäßigen Betriebsablauf der Kläranlage in Form von Rundgängen, Wartungslisten und vorausschauender Wartung einzubeziehen. Insbesondere die eingesetzte Online-Messtechnik ist hierbei ein zu beachtender Wartungspunkt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen an die Stickstoffelimination, insbesondere nach Verschärfung des N-Grenzwertes für Anlagen größer 100.000 EW, kann es im Einzelfall sinnvoll sein, die aus der Schlammbehandlung üblicherweise in den Anlagenzulauf zurückzuführende Fracht einer zusätzlichen Behandlung zu unterziehen. Dies kann entweder gemeinsam im Hauptstrom der Kläranlage oder mittels einer separaten Schlammwasserbehandlungsanlage erfolgen.

Zur separaten Schlammwasserbehandlung stehen sowohl biologische wie auch chemisch-physikalische Verfahren zur Verfügung. Neben der klassischen Nitrifikation/Denitrifikation sind bei den biologischen Verfahren in jüngster Zeit verstärkt Anlagen zur Nitritation/Denitritation bzw. zur Deammonifikation mit dem Vorteil eines wesentlich reduzierten Betriebsmittelverbrauchs realisiert worden. Sehr häufig wird bei den biologischen Verfahren inzwischen die SBR-Technologie eingesetzt, aber auch Durchlaufreaktoren (Chemostat), Festbettsysteme (Wirbelbett) und Membranbiologien kommen zum Einsatz. Bei den chemisch-physikalischen Verfahren dominiert großtechnisch eindeutig die Luftstrippung, eine Dampfstrippung ist wirtschaftlich nur dann eine Alternative, wenn entsprechende thermische

Energie auf dem Anlagenstandort zur Verfügung steht. Die Struvitfällung hat sich großtechnisch bislang nicht etablieren können.

Aufgrund der unterschiedlichen Kostenstrukturen der verschiedenen Verfahrenstechniken ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Berücksichtigung der maßgebenden Jahreskosten obligatorisch. Da Anlagen zur separaten Schlammwasserbehandlung meist funktional ausgeschrieben werden, sollten die Bieterangaben zu Betriebsmittelverbräuchen und der Reststoffentsorgung sorgfältig geprüft werden. Zur Refinanzierung der Investitionskosten bietet das Abwasserabgabengesetz entsprechende Anreize. Die Anwendung wird allerdings in den Bundesländern unterschiedlich gehandhabt, deshalb sollte in jedem Fall vor Errichtung der separaten Schlammwasserbehandlungsanlage eine Abstimmung mit den zuständigen Aufsichtsbehörden im Hinblick auf die Anforderungen zur Verrechnung herbeigeführt werden.

Die Arbeitsgruppe beabsichtigt, in Kürze ein Merkblatt zur Rückbelastung aus der Schlammbehandlung herauszugeben und bittet daher bereits jetzt um entsprechende Anmerkungen zu den vorliegenden Arbeitsberichten. Richten sie diese bitte an den Sprecher der Arbeitsgruppe: Dr.-Ing. Norbert Jardin (nja@ruhrverband.de).

8. Literatur

- [1] Abeling, U.; Seyfried, C.F. (1992):
Anaerobic-aerobic treatment of high-strength ammonium wastewater – nitrogen removal via nitrite. *Wat. Sci. techn.*, 26, 5-6, 1007 – 1015.
- [2] Anthonisen, A.C.; Loehr, R.C.; Prakasam, T.B.S.; Srinath, E.G. (1976):
Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal WPCF*, 48, 5, 835 – 852.
- [3] Böhler, M.; Fux, C.; Egli, K., van der Meer, J.R.; Siegrist, H. (2003):
Separate Faulwasserbehandlung durch partielle Nitrifikation und anaerobe Ammoniumoxidation (ANAMMOX) mit einer Kaskade von zwei SBR-Reaktoren. In: *Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5. Aachener Tagung am 7. und 8.1.2003 in Fulda.*
- [4] Cybulski, B. (2003):
Nutzung vorhandener Bauwerke (Nacheindicker/Tropfkörper) zur biologischen Prozesswasserbehandlung am Beispiel der Kläranlage Pforzheim. In: *Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5. Aachener Tagung am 7. und 8.1.2003 in Fulda.*
- [5] DWA-Arbeitsgruppe AK-1.1 „Phosphorrückgewinnung“ (2003):
Phosphorrückgewinnung. *KA-Wasser/Abfall*, 50, 6, 805 – 814.
- [6] DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 (2000):
Rückbelastung aus der Schlammbehandlung. *KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, 47, 8, 1181 – 1187.
- [7] DWA-Arbeitsgruppe AK-1.6 „Klärschlamm-Desintegration“ (2003):
Thermische, chemische und biochemische Desintegrationsverfahren. *KA-Wasser/Abfall*, 50, 6, 796 – 804.
- [8] Eisener (1998):
Gründe für die separate Teilstrombehandlung am Beispiel der Großkläranlage Göttingen. In: *Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 1998, Tagungsband zur 3. Aachener Tagung am 10. und 11.3.1998 in Aachen.*

- [9] Fischer, H.-P.; Wildner, R.K. (2003):
Biologische Prozesswasserbehandlung der KA Bad Hersfeld – Projektierung und Ausführung.
In: Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5. Aachener Tagung am
7. und 8.1.2003 in Fulda.
- [10] Fux, C.; Lange, K.; Faessler, A.; Huber, P.; Grueniger, B.; Siegrist, H. (2003):
Nitrogen removal from digester supernatant via nitrite – SBR or SHARON? *Wat. Sci. Technol.*,
48, 8, 9 – 18.
- [11] Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz –
AbwAG). BGBl I 1976, 2721, 3007 in der Neufassung vom 18. Januar 2005, BGBl I 2005, 114.
- [12] Grömping, M.; Seyfried, A. (2003):
Entscheidungskriterien und Wirtschaftlichkeitsaspekte zur Einbindung der Stickstoffrückbelastung
in den Klärwerksprozess. In: Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur
5. Aachener Tagung am 7. und 8.1.2003 in Fulda.
- [13] Hellinga, C.; Schellen, A.A.J.C.; Mulder, J.W.; Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J. (1998):
The Sharon process as an innovative method for nitrogen removal form ammonium-rich waste
water. *Wat. Sci. Techn.*, 27, 9, 135 – 142.
- [14] Hippen, A. (2001):
Einsatz der Deammonifikation zur Behandlung hoch stickstoffhaltiger Abwässer. Veröffentlichun-
gen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft
166.
- [15] Högl, M. (1998):
Verfahren zur Denitrifikation unter Nutzung bestehender Anlagenteile und –technik in der Kläran-
lage Landshut. In: Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 1998, Tagungsband zur 3. Aa-
chener Tagung am 10. und 11.3.1998 in Aachen.
- [16] Ißlinger, A. (2003):
2 Jahre Betriebserfahrungen mit der intermittierenden Nitrifikation/Denitrifikation und nachge-
schaltetem Schrägklärer zur Prozesswasserbehandlung auf der Kläranlage Rosenheim. In: Stick-
stoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5. Aachener Tagung am 7. und
8.1.2003 in Fulda.
- [17] Jardin, N. (1995):
Untersuchungen zum Einfluß der erhöhten biologischen Phosphorelimination auf die Phosphor-
dynamik bei der Schlammbehandlung. Schriftenreihe WAR des Instituts für Wasserversorgung,
Abwasserbeseitigung und Raumplanung der Technischen Hochschule Darmstadt, Band 87.
- [18] Kammerer, H.; Schreff, D. (2003):
Erste Betriebserfahrungen mit der Prozesswasserbehandlung im SBR-Verfahren auf der Zentral-
kläranlage Ingolstadt. In: Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5.
Aachener Tagung am 7. und 8.1.2003 in Fulda.
- [19] Knowles, G.; Downing, A.L.; Barrett, M.J. (1965):
Determination of kinetic constants for nitrifying bacteria in mixed culture. *J. Gen. Microbiol.*, 38,
263 – 278.
- [20] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2005):
Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen – KVR-Leitlinien. Kultur-
buchverlag Berlin, 7. Auflage.
- [21] Laurich, F. (2004):
Combined quantity management and biological treatment of sludge liquor at Hamburg's WWTP's
– first experience in operation with the Store and Treat process. *Wat. Sci. Techn.*, 50, 7, 49 – 52.
- [22] Mulder, J.W. ; van Loosdrecht; M.C.M.; Hellinga, C.; van Kempen, R. (2001):
Full-scale application of the SHARON process for treatment of rejection water of digested sludge
dewatering. *Water Science and Technology*, 43, 11, 127 – 134.
- [23] Natau, A.; Wienands (2003):
Anlagen zur biologischen Schlammwasserbehandlung auf kommunalen Kläranlagen mit An-

schlusswerten von 25.000 EW am Beispiel Herbolzheim. In: Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5. Aachener Tagung am 7. und 8.1.2003 in Fulda.

- [24] Pfennig, A. (1996):
Grundlagen der Strippping und der Rektifikation. In: Stickstoffrückbelastung: Stand der Technik 1996/97, Fachbeitrag 24, TK-Verlag Neuruppin.
- [25] Pop; Buchmeier (2003):
Betriebsdaten der Luftstrippping mit anschließender Saurer Wäsche und ihre Auswirkungen auf den Betrieb der Kläranlage Straubing. In: Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5. Aachener Tagung am 7. und 8.1.2003 in Fulda.
- [26] Rolfs, T. (1996):
Betriebserfahrungen zur Dampfstrippping mit preiswerten Dampferzeugungsverfahren in Bremen und Cloppenburg. In: Stickstoffrückbelastung: Stand der Technik 1996/97, Fachbeitrag 24, TK-Verlag Neuruppin.
- [27] Thöle, D.; Cornelius, A.; Rosenwinkel, K.-H. (2004):
Deammonifikation von Stickstoff in hochbelasteten Abwasserteilströmen mit Hilfe eines Schwebbettverfahrens. 37. Essener Tagung vom 24.3. bis zum 26.3.2004. In: Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Band 193, 16/1 – 16/15.
- [28] Thöle, D.; Cornelius; Krause (2003):
Großtechnische Versuche zur Prozesswasserbehandlung mit dem Kaldness-Verfahren auf der Kläranlage Hattingen. In: Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5. Aachener Tagung am 7. und 8.1.2003 in Fulda.
- [29] Ueno, Y.; Fujii, M. (2001):
Three years experience of operating and selling recovered struvite from full-scale plant. Environmental Technology, 22, 1373 – 1381.
- [30] van de Graaf, A.A.; Mulder, A.; de Bruijn, P.; Robertson, A.; Jetten, M.S.M.; Kuenen, J.G. (1995):
Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process. Appl. Environ. Microbiol., 61, 1246 - 1251.
- [31] van Kempen, Ir.R.; van Loosdrecht, M.C.M. (2003):
Operating experience in the Netherlands with a high rate process for total nitrogen control SHARON® at Rotterdam and Utrecht. In: Stickstoffrückbelastung – Stand der Technik 2003, Tagungsband zur 5. Aachener Tagung am 7. und 8.1.2003 in Fulda.
- [32] Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV) vom 20. September 2001 mit Änderungen vom 2. Juli 2002, BGBl. I, S. 2440.
- [33] Wett, B.; Rostek, R.; Rauch, W.; Ingerle, K. (1998):
pH-controlled reject water treatment. Wat. Sci. Technol., 37, 12, 165 – 172.