
**Kurzbericht
zum F + E-Vorhaben**

**Analyse einer möglichst weitestgehenden Phosphorelimi-
nation bei kommunalen Kläranlagen**

**Auftraggeber:
Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)**

von

Prof. Dr. Brigitte Helmreich, Dr. Maximilian Huber und Meriam Muntau,
Technische Universität München

und

Dr. Konstantinos Athanasiadis und Dr. Eberhard Steinle,
Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH

30. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung des Projektes	3
2	Verfahren zur weitestgehenden Phosphorelimination.....	5
2.1	Chemisch-physikalische Phosphatfällung	5
2.2	Biologische Phosphorelimination	6
2.3	Physikalisches Verfahren: Membranbelebungsverfahren.....	7
3	Weitestgehende Elimination von Phosphor	7
3.1	Herausforderungen für die Implementierung.....	7
3.2	Bilanzierung der Phosphorelimination auf zehn Kläranlagen in Deutschland	9
3.3	Erreichbare Ablaufkonzentrationen	17
3.4	Personalbedarf	19
3.5	Mess-, Steuerungs- und Regelungs-Technik	20
4	Kosten für Investition und Betrieb einer weitestgehenden Phosphorelimination	20
5	Abschätzung der potenziellen Frachtreduktion durch erhöhte Anforderungen an den Gesamtphosphor im Kläranlagenablauf.....	23
5.1	Szenario 1: Erhöhung der Anforderungen für Anlagen der GK 2-5 (Theoretisches Phosphorreduktionspotential von ca. 35 %)......	23
5.2	Szenario 2: Starke Erhöhung der Anforderungen für Anlagen der GK 2-5 (Theoretisches Phosphorreduktionspotential von ca. 53 %)......	25
5.3	Schlussfolgerungen	26
6	Hinweise für die Umsetzung im Einzelfall	27
7	Fazit	28
	Danksagung.....	29
	Literaturverzeichnis.....	29

1 Zielsetzung des Projektes

Als essentieller Nährstoff bestimmt Phosphor das Pflanzenwachstum in den meisten aquatischen Ökosystemen und kann schon in niedrigen Konzentrationen im Mikrogrammbereich eutrophierend wirken. Das Eutrophierungspotential von stehenden Gewässern beginnt bereits bei einer Gesamtphosphorkonzentration (P_{ges}) von 5-10 $\mu\text{g } P_{\text{ges}}/\text{L}$ (Barjenbruch und Exner, 2016). Daher ist die zulässige Phosphorkonzentration im kommunalen Kläranlagenablauf, abhängig von der Größenklasse, in der Abwasserverordnung begrenzt (AbwV, 2004). Die AbwV definiert den gesetzlich geforderten Stand der Technik und gibt für die Größenklasse (GK) 4 eine Mindestanforderung von 2,0 mg P_{ges}/L und für die GK 5 eine Mindestanforderung von 1,0 mg P_{ges}/L vor. Für die GK 1-3 sind keine Anforderungen gestellt. Viele kleinere Anlagen mit einer Ausbaugröße ≤ 10.000 EW führen bereits eine gezielte Phosphorelimination durch, wenn aus wasserwirtschaftlichen Gründen strengere Anforderungen bestehen (z. B. Bodenseerichtlinie oder Einleitung in sensible Gewässer) oder aus abgaberechtlichen Gründen eingehalten werden sollen. Teilweise entsteht eine wesentliche Phosphorelimination als Nebeneffekt betrieblicher Optimierungen aufgrund der Verwendung von Fällmitteln zur Schlammstabilisierung (z. B. Blähschlammbekämpfung). Die mittleren Gesamtphosphorablaufkonzentrationen liegen daher bei vielen Kläranlagen bereits deutlich unterhalb der aufgrund der Mindestanforderungen der AbwV (2004) zu erwartenden Ablaufkonzentrationen (Bild 1).

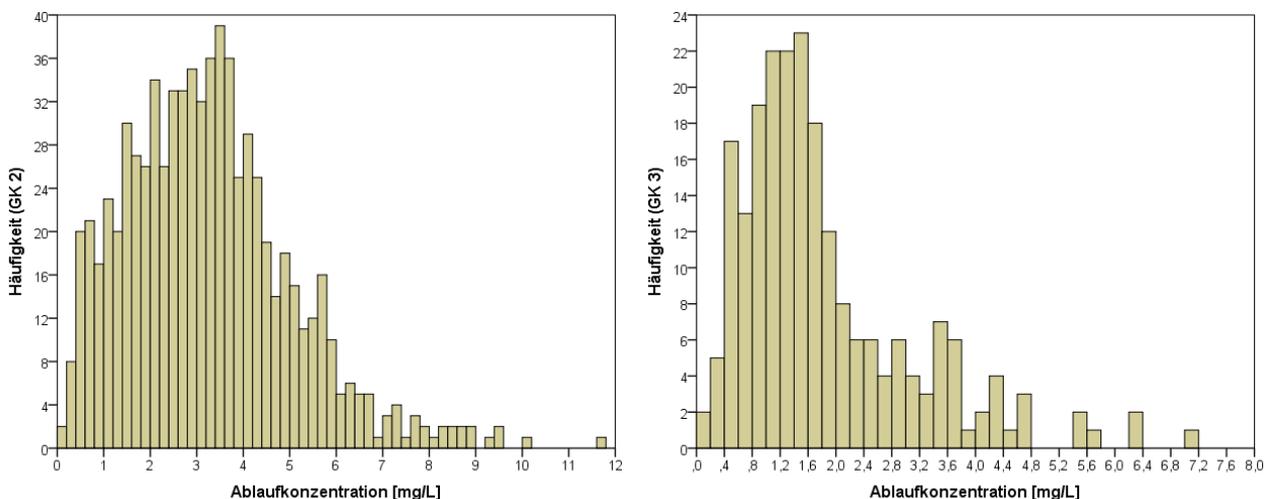


Bild 1: Ablaufkonzentrationen des Parameters P_{ges} (Mittelwerte pro Kläranlage) aller bayerischen Kläranlagen der GK 2 (links, n=741) und GK 3 (rechts, n=220); Datenquelle: LfU/DABay 2015

Das in § 27 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG, 2009) geforderte Umweltziel eines guten ökologischen und chemischen Zustandes der Gewässer erfordert vermehrt eine immissionsorientierte Betrachtung. Gemäß der neuen Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2016) liegen die Orientierungswerte für den „guten ökologischen Zustand“ für Fließgewässer bei 0,1 mg P_{ges}/L , für (sehr)

oligotrophe Seen sogar im Bereich von 0,009-0,012 mg P_{ges}/L . Dies ist nur durch eine weitere Reduktion der Phosphoremissionen zu realisieren.

Eine Bilanzierung der Belastung deutscher Gewässer für die Jahre 2005 bis 2011 ergab einen mittleren Phosphoreintrag von 25.000 t/a (Barjenbruch und Exner, 2016). Der Anteil der Kläranlagen betrug dabei im Bundesdurchschnitt 28 %. Zum Vergleich wurden von bayerischen Kläranlagen im Jahre 2013 rund 1.789 t Phosphor in die Gewässer eingeleitet (Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2015). Die durchschnittliche Ablaufkonzentration der bayerischen Kläranlagen lag für das Jahr 2015 frachtgemittelt bei ca. 0,9 mg P_{ges}/L . Die jährlich von den kommunalen Kläranlagen in die bayerischen Gewässer eingebrachte Gesamtposphormenge (ca. 1.378 t im Jahr 2015) könnte reduziert werden, wenn allgemeine Qualitätsziele auch für kleinere Anlagen (GK 2 und GK 3) definiert würden. In Bayern ist der Anteil der Kläranlagen der GK 1-3 an der emittierten Phosphormenge mit etwa 50 % wesentlich höher als im bundesdeutschen Durchschnitt (Bild 2 links). Bei diesen Anlagen besteht aufgrund der vergleichsweise hohen Ablaufkonzentrationen von im Mittel 1,7-3,4 mg P_{ges}/L ein großes Potential zur Emissionsminderung, insbesondere bei den Kläranlagen der GK 2 mit einer jährlichen Phosphorfracht von 407 t P_{ges} (2015). Neben der Einführung von Anforderungswerten für die Kläranlagen der GK 2-3 würde eine Verschärfung des für die Anlagen der GK 4 geltenden Überwachungswertes weiteres Potential zur Reduktion der Phosphoremissionen bieten, da jährlich rund 29 % der gesamten Phosphorfracht aus bayerischen Kläranlagen von Anlagen der GK 4 emittiert werden (Bild 2 links). Nach Anlagensystemen betrachtet stellen die Belebungsanlagen einschließlich der mehrstufigen biologischen Anlagen ca. 44,5 % aller Anlagen und emittieren ca. 77 % der gesamten Phosphorfracht (Bild 2 rechts). Dies hängt aber auch mit dem hohen Anteil dieser Anlagen an der gesamten Jahresabwassermenge der kommunalen Kläranlagen von ca. 92 % zusammen.

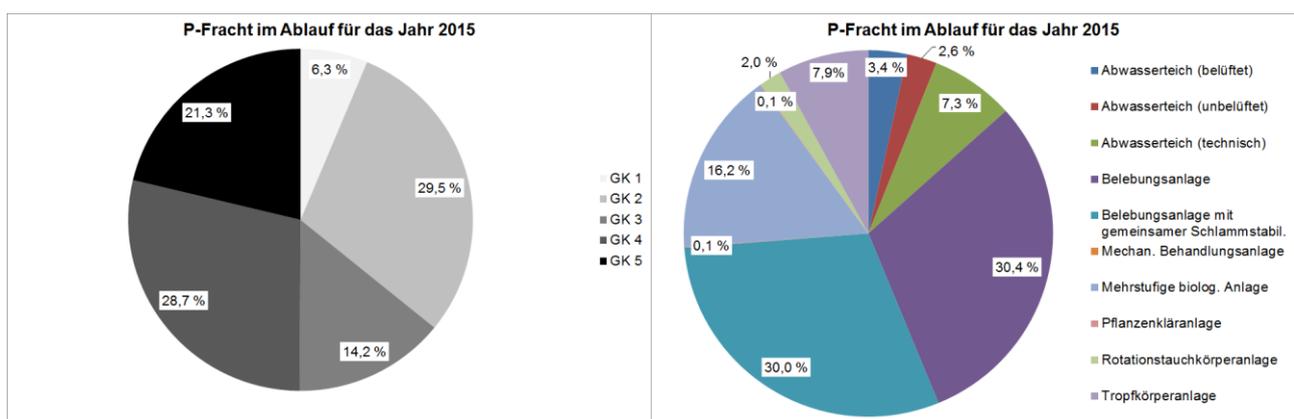


Bild 2: Anteile an den Phosphorfrachten im Ablauf bayerischer Kläranlagen (≥ 50 EW) für das Jahr 2015, aufgeschlüsselt nach Größenklassen (links) sowie nach Anlagensystemen (rechts)

Ausgehend von diesen Erkenntnissen sollten in diesem Vorhaben die Möglichkeiten für eine weitestgehende Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen dargestellt werden. Als weitestgehende Phosphorelimination wird hierbei die Anwendung von Verfahren verstanden, die über die bisherigen Ansätze der technischen Regeln und des Stands der Technik hinausgehen und mit denen Phosphorverbindungen mit vertretbarem technischen und wirtschaftlichen Aufwand so effektiv wie möglich entfernt werden können. Um verschiedene Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, wurden während der Bearbeitung dieses LfU-Projektes statistische Auswertungen des Ist-Zustandes aller bayerischen Kläranlagen erstellt, detaillierte Bilanzierungen von zehn Kläranlagen durchgeführt sowie die spezifischen Investitions- und Betriebskosten für die weitestgehende Phosphorelimination berechnet.

2 Verfahren zur weitestgehenden Phosphorelimination

Derzeit beruht die Elimination des Phosphors auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland hauptsächlich auf der chemisch-physikalischen Phosphatfällung sowie der anschließenden Schlammabtrennung. Bei einigen Kläranlagen, in der Regel ergänzend zur Fällung, wird die geforderte Behandlungsleistung mittels erhöhter biologischer Phosphorelimination erzielt. Dahingegen wird das physikalische Verfahren der Membranbelebung derzeit nur von wenigen Anlagen verwendet. Im Folgenden wird auf diese Verfahren zur weitestgehenden Phosphorelimination eingegangen.

2.1 Chemisch-physikalische Phosphatfällung

Für die chemische Phosphorelimination sind die allgemein anerkannten Regeln der Technik im Arbeitsblatt DWA-A 202 (2011) dargelegt. Es wird ortho-Phosphat mithilfe eines Fällmittels in eine unlösliche Form überführt, ausgefällt und abgetrennt. Als Fällmittel werden Fe^{3+} -, Al^{3+} -, Fe^{2+} - und Ca^{2+} -Metallsalze eingesetzt (DWA-A 202, 2011). Fe^{2+} muss hierfür mit sauerstoffhaltigem Wasser zunächst zu Fe^{3+} oxidiert werden.

Die chemische Phosphatfällung ist stets mit negativen Auswirkungen wie beispielsweise einem vermehrten Schlammanfall sowie einer erhöhten Metallfracht im Klärschlamm verbunden. Dem gegenüber steht, dass der Einsatz von Fe^{3+} - oder Al^{3+} -Salzen zu verbesserten Absetzeigenschaften des Schlammes führen kann, wodurch eine Reduktion des Feststoffabtriebs in der Nachklärung bewirkt wird. Der Einsatz von Metallsalzen kann die Verschiebung des pH-Wertes ins Saure (für Nitrifikation von Nachteil) sowie höhere Salzfrachten im behandelten Abwasser zur Folge haben (eawag, 2008).

Bei dem Verfahren der Flockungsfiltration, welche immer eine weitestgehende Phosphorelimination ermöglicht, kommt im Anschluss an die Belegung eine Filtereinheit als Einschicht- oder Zweischichtfilter zum Einsatz. Dieses Verfahren ist nicht durch einen speziellen Filtertyp, sondern durch die Vorbehandlung des zu filtrierenden Wassers gekennzeichnet, bei der durch die Zugabe des Fällmittels im Zulauf des Filters die gelösten und kolloidalen Phosphorkomponenten in eine abfiltrierbare Form überführt werden. Als zweite Stufe in Kombination mit einer Simultanfällung bietet die Flockungsfiltration im Vergleich zur Nachfällung (Fällmittel wird hierbei in den Zulauf der an die Nachklärung anschließenden Trennstufe dosiert) die Vorteile eines geringeren Flächenbedarfs, eines weitestgehend schwebstoffarmen Ablaufs sowie eines geringeren Fällschlammanfalls (Barjenbruch und Exner, 2009).

Für eine effektivere Entfernung des fällbaren ortho-Phosphats besteht die Möglichkeit, auch andere Fällungsverfahren zu einer zweistufigen Fällung zu kombinieren. Mögliche Kombinationen neben der Simultanfällung und Flockungsfiltration sind die Vor- und Simultanfällung, Vor- und Nachfällung sowie Simultan- und Nachfällung. Diese zweistufigen Verfahren ermöglichen eine frühzeitige Entlastung nachfolgender Verfahrensstufen und die Einhaltung tolerierbarer Filterlaufzeiten. Zudem wird ein wirtschaftlicherer Einsatz von Fällmitteln durch einen höheren Gesamtwirkungsgrad begünstigt. Ein niedrigerer Ablaufwert von $\leq 0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ ist daher bereits bei gleichem Fällmitteleinsatz wie bei der einstufigen Fällung möglich (Barjenbruch und Exner, 2016). Es ist jedoch darauf zu achten, dass mit der Höhe des Qualitätsziels die Menge an benötigtem Fällmittel exponentiell steigt (eawag, 2008).

Bei optimierter Fällung, welche u. a. eine optimale Fällmitteleinmischung zusammen mit einer geeigneten Steuerung bzw. Regelung beinhaltet, ist eine weitere Verringerung der Ablaufkonzentration nur durch eine Senkung des partikulär gebundenen Phosphors zu erreichen. Für eine weitestgehende Reduktion der Phosphorfrachten und damit verbunden des Feststoffabtriebs ist – sofern eine ausreichende Optimierung der bestehenden Nachklärung nicht möglich ist – die Nachrüstung von nachgeschalteten Filteranlagen oder eine Nachfällung als zusätzliche Reinigungsstufe erforderlich.

2.2 Biologische Phosphorelimination

Die erhöhte biologische Phosphorelimination (Bio-P) basiert auf der verstärkten Aufnahme von ortho-Phosphat durch bestimmte Bakterien unter aeroben Bedingungen. Durch den Wechsel aerober und anaerober Milieubedingungen können PAOs (phosphate accumulating organisms) gezielt selektiert und angereichert werden. Der unter herkömmlicher Betriebsweise erreichte Gesamtphosphorgehalt von 1-2 % bezogen auf die Schlamm-trockenmasse kann somit durch eine geeignete Verfahrensführung auf 2,5-5,0 % (Pinnekamp, 2007) gesteigert werden.

In der Regel ist die Bio-P als alleiniges Verfahren zur Phosphorelimination nicht ausreichend, um die Einhaltung geforderter Überwachungswerte sicher zu garantieren. Daher hat sich bei vielen Kläranlagen eine zusätzliche chemische Phosphatfällung als sinnvoll erwiesen.

2.3 Physikalisches Verfahren: Membranbelebungsverfahren

Das Membranbelebungsverfahren kombiniert die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren mit einer physikalischen Phasenseparation des Schlamm-Wasser-Gemisches mittels Membranfiltration. Nach dem biologischen Abbau der Abwasserinhaltsstoffe in der Belebungsstufe wird die suspendierte Biomasse in der anschließenden Membranstufe vom gereinigten Abwasser abgeschieden. Die eingesetzten Membranfilter garantieren einen vollständigen Rückhalt von Feststoffen und Biomasse, wodurch keine weitere Nachklärung benötigt wird. Ein feststofffreier Ablauf wird somit unabhängig von den Absetzeigenschaften des Schlammes garantiert. Dies ermöglicht auch den Betrieb der Belebungsstufe mit wesentlich höheren Biomassekonzentrationen (9-16 g TS/L) als sonst bei konventionellen Anlagen (< 5 g TS/L) üblich (Pinnekamp und Friedrich, 2003). Das benötigte Belebungsbeckenvolumen kann daher um bis zu 75 % reduziert werden.

3 Weitestgehende Elimination von Phosphor

3.1 Herausforderungen für die Implementierung

Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen gilt es, die die Phosphorelimination limitierenden Rahmenbedingungen zu optimieren. Dabei sind zwei Ansatzpunkte geeignet, um die Phosphorkonzentration im Ablauf kommunaler Kläranlagen weiter zu reduzieren (Voigt et al., 2013):

- Steigerung der Effizienz der chemischen Fällung des gelösten reaktiven Phosphors (ortho-Phosphat)
- Verbesserte Abtrennung des partikulären Phosphors

Bei Ersterem besteht die Herausforderung in der ökologischen und ökonomischen Vertretbarkeit der Maßnahme. Eine vollständige Fällung des ortho-Phosphats würde zum einen zu einer überproportionalen Erhöhung des Fällmittelverbrauchs führen und zum anderen einen erhöhten Salzeintrag in die Gewässer bedeuten. Eine Erhöhung des Fällmitteleinsatzes ist zudem durch die Verwendung des Fällmittels und einen vermehrten Schlammfall mit Mehrkosten, besonders für kleine Kläranlagen, verbunden. Dem gegenüber stehen verbesserte Absetzeigenschaften des Schlammes und damit verbunden eine höhere Gesamtablaufqualität. Allerdings ist es auch bei einem vermehrten bzw. optimierten Fällmitteleinsatz im Einzelfall nicht möglich, einen Überwachungswert von

0,5 mg P_{ges} /L betriebsstabil einzuhalten (Voigt et al., 2013). Beispielsweise ist die Einhaltung solcher niedriger Anforderungen für Kläranlagen mit erhöhtem Feststoffabtrieb in der Nachklärung häufig nicht durch einen vermehrten Fällmitteleinsatz erreichbar. Ein Feststoffabtrieb (Parameter Abfiltrierbare Stoffe (AFS)) von 1,0 mg AFS/L entspricht einer Zunahme der Gesamtphosphorkonzentration im Ablauf von etwa 0,02-0,04 mg P_{ges} /L (Sabelfeld und Geißen, 2011). Bei niedrigen Überwachungswerten stellt sich der Feststoffabtrieb daher häufig als limitierender Faktor dar. Bei einer einzuhaltenden Konzentration von 0,5 mg P_{ges} /L beträgt der Anteil des partikulär gebundenen Phosphors meist bereits ca. 0,25 mg P/L (eawag, 2008), bei rund 8,0 mg AFS/L im Ablauf. Maßnahmen zur Verringerung der AFS im Ablauf sind mit Ausnahme einer veränderten Betriebsführung allerdings häufig mit hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden, da bauliche Erweiterungen und kostenintensive Verfahren, wie beispielsweise eine (Membran-)Filtration, benötigt werden.

Eine besondere Herausforderung bedeutet der gelöste nicht-reaktive Phosphor (Bild 3), der weder fällbar noch biologisch verfügbar ist. Zu diesen Verbindungen zählen unter anderem Phosphonate, kondensierte Phosphate und Phosphite. Ausgehend von einer Ablaufkonzentration von 0,50 mg P_{ges} /L beträgt der gelöste, nicht-reaktive Phosphoranteil rund 0,05-0,10 mg P/L (eawag, 2008). Auch wenn diese Phosphorfraktion in der Regel zu keiner unmittelbaren Beeinträchtigung der Gewässer führt, wird diese analytisch beim P_{ges} erfasst und ist daher von Relevanz für die Abwasserabgabe und die Einhaltung der geforderten Überwachungswerte. Dabei ist zu beachten, dass die Zusammensetzung des Gesamtphosphors im Ablauf abhängig von den angeschlossenen Einleitern, Schwankungen im Einzugsgebiet sowie der Kläranlage selbst ist.

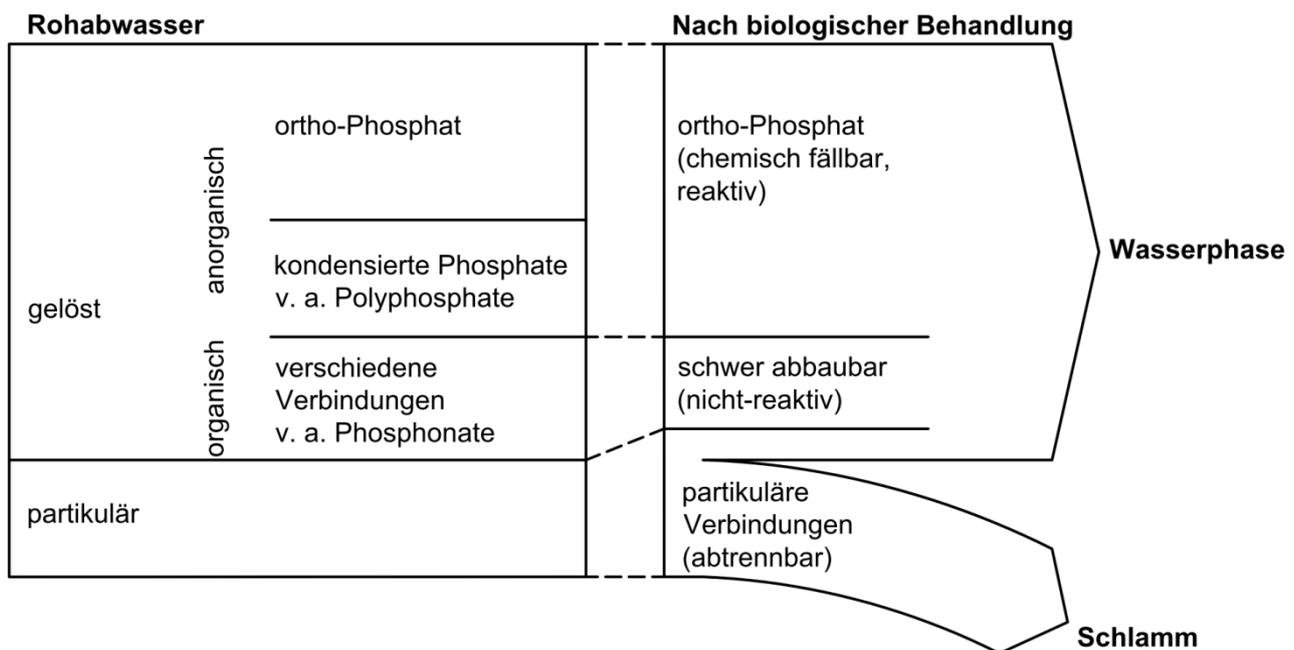


Bild 3: Phosphorfractionen im Abwasser vor und nach der biologischen Behandlung in kommunalen Kläranlagen (in Anlehnung an Voigt et al., 2013)

Eine differenzierte Betrachtung der Phosphoranteile ortho-Phosphat und partikulärer Anteil im Ablauf der kommunalen Kläranlage ermöglicht die wirtschaftliche Optimierung bereits bestehender Maßnahmen und hilft mögliche Defizite bezogen auf die Elimination einzelner Phosphorfractionen aufzuzeigen. Eine temporäre Erweiterung des Messumfangs ist daher zu empfehlen, um optimale Verfahrenskombination zu identifizieren und eine bestmögliche Ausnutzung der Potentiale einzelner Maßnahmen für kommunale Kläranlagen zu erreichen. Dadurch ist auch eine Optimierung der Steuerungs- und Regelungs-Technik möglich. Des Weiteren ist ein pauschales Vorgehen zur Phosphor-reduktion zu vermeiden und es sollte vielmehr für jede Kläranlage individuell über geeignete Maßnahmen entschieden werden.

3.2 Bilanzierung der Phosphorelimination auf zehn Kläranlagen in Deutschland

In Abstimmung mit dem LfU wurden zehn kommunale Kläranlagen in Deutschland ausgewählt, die bereits eine weitestgehende Phosphorelimination betreiben und charakteristisch für die GK 2-4 sind. Aus den Anlagen der GK 2 wurde je eine Anlage mit Rotationstauchkörper (Musterdorf 4), Tropfkörper (Musterdorf 1) sowie eine Belebungsanlage in Erdbauweise (Musterdorf 5) ausgesucht. Zusätzlich wurde aus der GK 3 eine Belebungsanlage mit Membranfiltration (Musterdorf 3) ausgewählt. Weitere charakteristische Belebungsanlagen wurden aus der GK 4 ausgewählt, um die für größere Anlagen zusätzlichen Verfahrensstufen abzubilden. Darunter fallen drei Anlagen mit Bio-P (Musterdorf 2, Musterstadt 1 und Musterstadt 4), eine Anlage mit nachgeschalteter Flockungsfiltration mit

Sandfilter ohne Flockungshilfsmittel sowie Fällung an zwei Stellen (Musterstadt 3), eine Anlage mit nachgeschaltetem Zweischichttraumfilter ohne Flockungshilfsmittel und Fällung an drei Stellen (Musterstadt 2) sowie eine Kläranlage mit Zwei-Punkt-Fällung (Musterstadt 5). In Tabelle 1 ist ein Überblick zu den wichtigsten Daten der im Zuge des Projektes untersuchten zehn kommunalen Kläranlagen wiedergegeben.

Im Folgenden werden anhand von vier Fallbeispielen die wesentlichen Erkenntnisse aus den Bilanzierungen der zehn deutschen Kläranlagen präsentiert.

Fallbeispiel 1: Musterdorf 1

Für die Bilanzierung der kommunalen Kläranlagen in Bezug auf die Phosphorelimination sind folgende Parameter notwendig:

- Zulaufkonzentrationen [$\text{mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$]
- Ablaufkonzentrationen [$\text{mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$]
- Wassermengen [m^3/d]
- Fällmittelmengen, bezogen auf die Wirksubstanz [L/h]
- Schlammengen [m^3/d]
- Schlammeigenschaften [$\text{g P}/\text{kg TS}$]

Neben dem Umfang der erfassten Parameter sind besonders die Anzahl der im Bilanzierungszeitraum vorhandenen Messdaten sowie deren Repräsentativität von Bedeutung. Beispielsweise wird in Musterdorf 1 das Fällmittel (FM) PAC (Polyaluminiumchlorid) an zwei Stellen zudosiert (Bild 4; Qualitätsparameter Q – entspricht Konzentrationsmessungen; Durchflussmessungen F). Für die Berechnung der Kennwerte sowie zur Identifizierung der Optimierungsmaßnahmen müssten aber nicht nur die absoluten Fällmittelverbräuche aufgezeichnet werden, sondern auch die pro Stelle dosierten Mengen.

Tabelle 1: Zusammenfassung der im Zuge des Projektes erhobenen Daten von zehn kommunalen Kläranlagen mit weitestgehender Phosphorelimination

Kläranlage	Ausbaugröße [EW]	Phosphor-eliminierungsverfahren	Konzentration ^a [mg P _{ges} /L]		Kennzahlen		Überwachungswert (erklärt) [mg P _{ges} /L]
			Rohabwasser	Kläranlagenablauf	β [mol Me/mol P]	K _P [mol Me/kgP]	
Musterdorf 1	5.000	Simultanfällung (z. T. zwei Dosierstellen)	9,40 ^b	0,47 ^b	3,0	60	2,0
Musterdorf 2	12.000	Simultanfällung, Bio-P	5,24	0,45	1,5	28	1,6
Musterdorf 3	9.700	Simultanfällung, Membranfiltration	6,79	0,36	2,9	45	1,0 (0,5)
Musterdorf 4	3.116	Simultanfällung	12,5	0,69	1,5	18	1,0
Musterdorf 5	3.000	Simultanfällung	12,5	0,23	1,4	45	1,0
Musterstadt 1	35.000	Simultanfällung	10,0 ^c	0,60 ^c	2,4	10	2,0 (1,4)
Musterstadt 2	87.500	Simultanfällung (zwei Dosierstellen), Flockungsfiltration	5,72	0,13	2,0	23	0,3
Musterstadt 3	290.000	Simultanfällung, Flockungsfiltration	5,83	0,26	-*	14	1,0 (0,4)
Musterstadt 4	210.000	Simultanfällung (zwei Dosierstellen), Bio-P	12,0	0,17	3,4	23	1,0 (0,5)
Musterstadt 5	100.000	Zweipunktfällung (Vor- und Simultanfällung)	7,10	0,22	1,8	32	0,5

^a mittlere Konzentration im Bilanzierungszeitraum 2014-2016

^b mittlere Konzentration im Bilanzierungszeitraum 2013-2016

^c mittlere Konzentration im Bilanzierungszeitraum 2016

* Kennwert fehlt aufgrund stark variabler Betriebsführung

Da in diesem Fallbeispiel die Dosiermittelmengen gar nicht aufgezeichnet werden, nur einmal pro Monat im Zulauf eine 24 h-Mischprobe genommen wird und gleichzeitig bei den Schlammessun-

gen Werte fehlen bzw. unklar sind (Schlammengen, TS, Phosphorgehalt), ist eine genaue Bilanzierung der Kläranlage nicht möglich. Dies betrifft auch weitere Anlagen, sodass nur selten eine ausreichende Datengrundlage für eine plausible Bilanzierung vorhanden war. Somit sollte eine Aufzeichnung des Fällmittelverbrauchs im Rahmen der Umsetzung einer weitestgehenden Phosphorelimination zusätzlich bei den Kläranlagen eingeführt werden, sodass mindestens quartalsweise die verbrauchte Chemikalienmenge aufgezeichnet wird. Nur durch die genaue Kenntnis der verbrauchten Fällmittelmengen, am besten pro Dosierstelle, können Kennwerte berechnet und verglichen werden. Anhand der aktuell meist vorhandenen Werten sind die Bilanzierungen der Fällmittelmengen und die Berechnungen der Kennwerte zur Charakterisierung der Phosphorelimination auf den meisten Kläranlagen mit großen Unsicherheiten behaftet. Zusätzlich muss bei dieser Kläranlage berücksichtigt werden, dass die Dosierung des Fällmittels zeitweise auch das zu klein dimensionierte Nachklärbecken kompensiert und somit die Kennwerte, auch aufgrund des hohen Wirkungsgrades (ca. 95 %), vergleichsweise hoch sind.

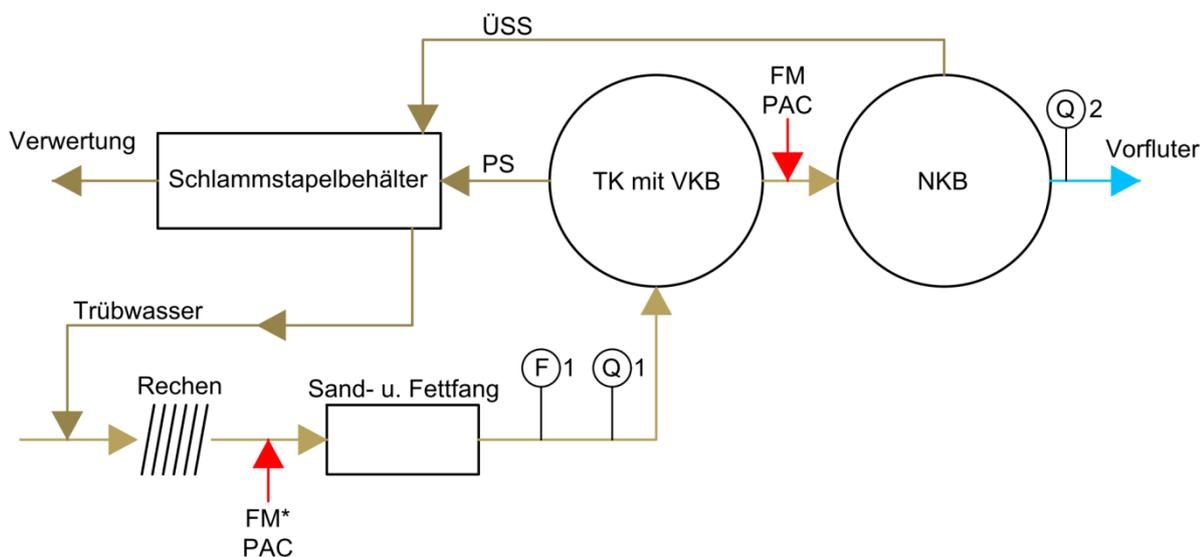


Bild 4: Fließschema Musterdorf 1 (5.000 EW); FM* wird nur bei Regenwetter (ab 25 L/s) zudosiert

Trotz starker Konzentrationsschwankungen im Zulauf kann die Kläranlage den geforderten Überwachungswert von $2,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ betriebsstabil einhalten (Bild 5). Dies ist allerdings nur mit einem sehr hohen Fällmitteleinsatz möglich, der zeitweise zu betrieblichen Problemen, wie einem zu niedrigen pH-Wert in der Nachklärung, führt. Daher sollte die Fällmitteldosierung nach einer Neudimensionierung der Nachklärung durch eine zeitlich begrenzte Ausweitung des Messprogramms optimiert werden.

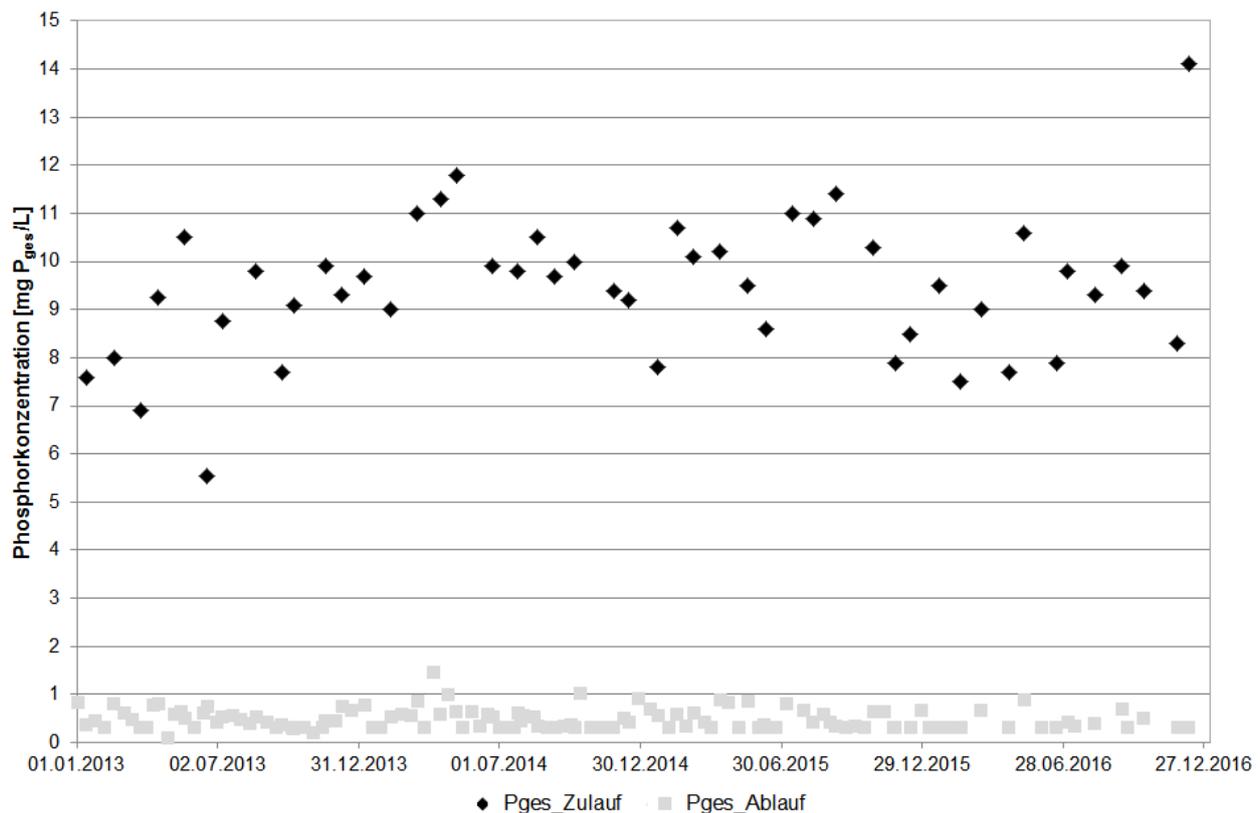


Bild 5: Gesamtphosphorkonzentrationen im Zulauf und Ablauf der Kläranlage Musterdorf 1 für den Zeitraum 2013-2016; Überwachungswert 2,0 mg P_{ges}/L

Fallbeispiel 2: Musterdorf 2

Wie in Bild 3 dargestellt, kommen im Ablauf drei Phosphorfraktionen vor. Während der partikuläre Anteil durch das Nachklärbecken der Kläranlage Musterdorf 2 zurückgehalten werden kann, kann der ortho-Phosphat-Anteil durch die Fällung entfernt werden. Seit 01. September 2016 wird im Ablauf der Kläranlage täglich neben P_{ges} auch ortho-Phosphat mittels Küvettentests bestimmt, um die verschiedenen Anteile genauer zu ermitteln. Anhand der Messwerte wird deutlich, dass eine vollständige Entfernung des ortho-Phosphats unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Faktoren nicht möglich und auch nicht sinnvoll ist. Die Ergebnisse bestätigen jedoch, dass mit einer Kombination aus vermehrter Bio-P und chemischer Fällung bei der untersuchten Anlage der GK 4 eine weitestgehende Elimination des Phosphors möglich ist und Ablaufkonzentrationen unter 0,45 mg P_{ges}/L durchgehend eingehalten werden können (Tabelle 2). Diese Konzentrationen zeigen deutlich die betriebsstabile Elimination des Phosphats und die Höhe der Schwankungsbreite der Gesamtphosphorkonzentrationen. Dabei ist zu beachten, dass laut Betreiber im Ablauf die AFS unter der Bestimmungsgrenze liegen und somit der Großteil des nicht als ortho-Phosphat vorliegenden Phosphors gelöste, nicht-fällbare Phosphoranteile sein müssen. Die Differenz zwischen ortho-Phosphat und

Gesamtposphor betrug konstant 0,10-0,12 mg P_{ges} /L und könnte von der Größenordnung her auf gelöste, nicht-fällbare Phosphoranteile zurückzuführen sein (Erfahrungswerte rund 0,05-0,10 mg P/L (eawag, 2008)). Somit sind durch eine gut ausgelegte und betriebene Nachklärung sowie eine optimierte Fällung im Jahresmittel sehr niedrige Gesamtposphorablaufkonzentrationen möglich, wobei an einzelnen Tagen erhöhte Konzentrationen auftreten können. Wichtig bei dieser Verfahrenskombination aus Bio-P und chemischer Fällung ist aber auch die Verfügbarkeit einer ausreichenden Messtechnik zusammen mit einer angepassten Steuerungs- und Regelungstechnik sowie die Motivation des Betreibers, um Optimierungspotential festzustellen und geeignete Lösungsmaßnahmen zu ergreifen.

Tabelle 2: Mittlere Ablaufkonzentrationen der Kläranlage Musterdorf 2 während des erweiterten Monitorings zur weitestgehenden Phosphorelimination

Parameter	Sep 16	Okt 16	Nov 16	Dez 16	Jan 17
Gesamtposphor					
Minimum [mg P_{ges} /L]	0,23	0,18	0,13	0,18	0,14
Mittelwert [mg P_{ges} /L]	0,33	0,25	0,22	0,23	0,22
Maximum [mg P_{ges} /L]	0,42	0,31	0,34	0,32	0,34
ortho-Phosphat					
Minimum [mg $PO_4\text{-P}$ /L]	0,07	0,08	< 0,05	< 0,05	0,08
Mittelwert [mg $PO_4\text{-P}$ /L]	0,15	0,13	0,12	0,12	0,11
Maximum [mg $PO_4\text{-P}$ /L]	0,22	0,17	0,19	0,20	0,20

Fallbeispiel 3: Musterstadt 1

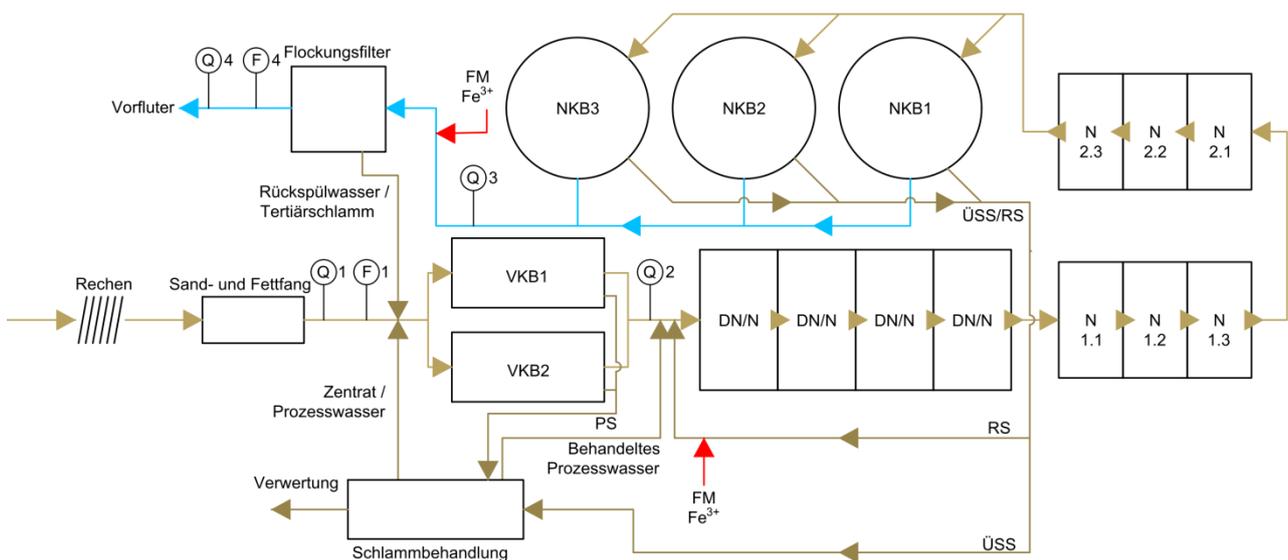
Aufgrund der vermehrten Bio-P ist in der Schlammbehandlung (Schneckenpresse) der Kläranlage Musterstadt 1 mit erhöhten Phosphorkonzentrationen im Filtrat zu rechnen (Tabelle 3). Vergleichsweise hohe Konzentrationen im Filtrat sind ein Indikator für eine besser funktionierende Bio-P. Im Jahr 2016 betrug die Konzentration im Filtrat im Mittel 47 mg P_{ges} /L, bei einem täglichen Filtratanfall von rund 78 m³/d. Dies ergibt somit eine zusätzliche Belastung des Zulaufs von knapp 5 % der gemessenen Zulauffracht. Aufgrund der vermehrten Bio-P ist der Phosphorgehalt bezogen auf die Schlamm-trockenmasse sehr hoch und betrug im Jahr 2016 ca. 8,2 %. Dieser Bilanzausschnitt bestätigt, dass mit dem Bio-P-Verfahren Fällmittel in einem wesentlichen Umfang eingespart werden kann, jedoch die Rückbelastung bei der Betriebsweise mitberücksichtigt werden muss.

Tabelle 3: Gesamtposphorkonzentrationen (mg P_{ges}/L) im Filtrat der Schneckenpresse

Monat	2014	2015	2016
Januar	58,5	26,6	29,5
Februar	52,7	29,6	33,3
März	-	42,4	25,6
April	-	51,7	45,4
Mai	49,5	56,5	69,5
Juni	100	-	53,6
Juli	129	93,9	49,4
August	98,3	96,1	58,5
September	-	186	-
Oktober	33,1	-	-
November	58,3	22,2	58,9
Dezember	-	33,4	-

Fallbeispiel 4: Musterstadt 3

Anhand der umfassenden Betriebsdaten der Kläranlage Musterstadt 3 kann der Verlauf der Gesamtposphorkonzentrationen (Q 1-4 in Bild 6) durch die Belebungsanlage sowie der AFS-Konzentrationen (Q 3-4 in Bild 6) vor und nach dem Filter nahezu täglich ausgewertet werden.

**Bild 6: Fließschema Musterstadt 3 (290.000 EW)**

Im Zeitraum 2014-2016 betrug die mittlere Zulaufkonzentration etwa 5,83 mg P_{ges}/L. Ein Teil des Phosphors (zwischen 7 % und 28 % im Monatsmittel) wird bereits in den Vorklärbecken entfernt. Im Ablauf der Nachklärbecken (entspricht der Phosphorkonzentration im Zulauf zum Filter) wird eine

Konzentration von 1,0 mg P_{ges}/L nicht überstiegen (siehe Empfehlung nach DWA-A 202 (2011)). Jedoch zeigen die Gesamtposphorkonzentrationen deutliche Schwankungen, die sich auch auf die Ablaufwerte auswirken (Bild 7). Die mittlere Konzentration im Filterzulauf lag bei 0,36 mg P_{ges}/L und stieg fallweise auf über 0,4 mg P_{ges}/L . In diesen Fällen erhöhte sich der Fällmittelverbrauch deutlich, sodass eine entsprechende Regelung für den Kläranlagenbetrieb unabdingbar ist. Die mittlere Ablaufkonzentration der Jahre 2014 bis 2016 lag im Mittel bei 0,26 mg P_{ges}/L . Die Phosphoreliminationsleistung beträgt somit ca. 96 %.

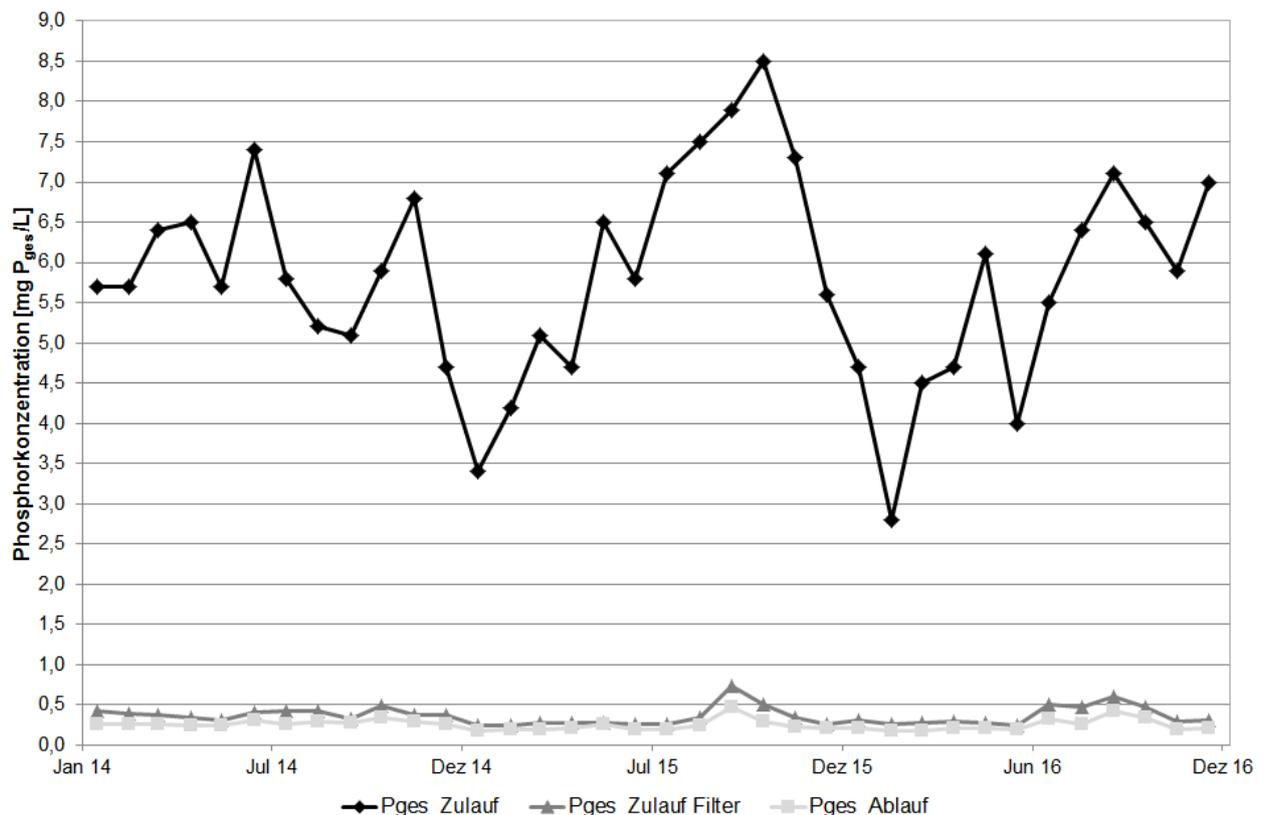


Bild 7: Gesamtposphorkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage, im Zulauf zum Filter (gleich Ablauf Nachklärbecken) und im Ablauf der Kläranlage Musterstadt 3 als Monatsmittelwerte für den Zeitraum 2014-2016; erklärter Überwachungswert 0,4 mg P_{ges}/L

Die Behandlungsleistung des Filters zeigt sich v. a. beim AFS-Rückhalt. Im Ablauf der Nachklärbecken variierten die AFS-Konzentrationen im Jahr 2016 zwischen 2 mg AFS/L und 22 mg AFS/L, bei einem Mittelwert von 7,3 mg AFS/L. Im Ablauf des Filters waren die Werte noch einmal deutlich geringer, sodass die AFS-Konzentrationen zwischen 1 mg AFS/L und 10 mg AFS/L schwankten, bei einem Mittelwert von 2,5 mg AFS/L. Somit kann im Kläranlagenablauf im Mittel, bei einem Phosphoranteil von ca. 2 % (Ergebnis der durch den Betreiber veranlassten Analysen), mit ca. 0,05 mg P/L aus dem partikulären Anteil gerechnet werden. Ohne Filter würde der partikuläre Anteil etwa

0,15 mg P/L betragen, sodass bei einem Betrieb ohne Filter unter Berücksichtigung des gelösten, nicht-fällbaren Phosphoranteils nahezu sämtliches ortho-Phosphat für einen sicheren Betrieb und die Einhaltung des Überwachungswertes von 0,4 mg P_{ges}/L entfernt werden müsste. Allerdings beträgt die Eliminationsleistung des Filters nach Auswertung der vorliegenden Betriebsdaten im Mittel lediglich 0,1 mg P_{ges}/L . Aufgrund der hohen Investitions- und Betriebskosten für einen Abwasserfilter ist daher abzuwägen, ob dieser mit dem alleinigen Ziel der Phosphorelimination für die Umsetzung einer weitestgehenden Phosphorelimination notwendig ist.

Fallbeispiel 5: Musterstadt 4

Die Bio-P der Kläranlage Musterstadt 4 weist eine hohe Effizienz auf, sodass nach Aussage des Betreibers mit der Bio-P das ortho-Phosphat im Ablauf der Belebungsstufe nahezu vollständig eliminiert werden kann. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass diese gut funktionierende Bio-P in nachfolgenden Verfahrensschritten zu massiven betrieblichen Störungen führen kann. So kann es bei der anaeroben Schlammfäulung zur Rücklösung des in der Biomasse gespeicherten Phosphats kommen. Durch die Reaktion mit Magnesium und Ammonium bildet sich MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat), welches durch Ablagerungen, beispielsweise in Rohrleitungen, zu erheblichen Mehrkosten und Personalaufwand führen kann. Daher kann das Verfahren der Bio-P, im Rahmen der weitestgehenden Phosphorelimination, nur eine sinnvolle Ergänzung zur chemischen Fällung darstellen. Somit wird bei dieser Anlage zusätzlich eine chemische Fällung als Simultanfällung betrieben, um die MAP-Problematik zu minimieren.

3.3 Erreichbare Ablaufkonzentrationen

Mit einer Simultanfällung sind gemäß dem derzeitigen Regelwerk Überwachungswerte $\leq 1,0$ mg P_{ges}/L , insbesondere für die Kläranlagen der GK 3-5, betriebsstabil einhaltbar. Die zehn im Rahmen des LfU-Projektes im Detail untersuchten Kläranlagen sowie weitergehende Befragungen zeigen sogar, dass mit den konventionellen Verfahren (Simultanfällung, teils mit Bio-P) im Mittel deutlich niedrigere Gesamtposphorkonzentrationen im Ablauf erzielt werden können (bis ca. 0,15 mg P_{ges}/L). So können bei Anlagen der GK 3-5 durch eine optimierte Fällung mit einer individuellen Steuerung bzw. Regelung bei den meisten Anlagen mittlere Ablaufkonzentrationen von 0,5 mg P_{ges}/L oder niedriger betriebsstabil erreicht werden. Dies entspricht Anforderungswerten von ca. 0,7-0,8 mg P_{ges}/L .

Die kommunalen Kläranlagen der GK 2 ohne gezielte Phosphorelimination benötigen zum Erreichen niedrigerer Ablaufkonzentrationen ($\leq 2,0$ mg P_{ges}/L) in der Regel die Nachrüstung einer Fällmittelstation mit einer einfachen Steuerung, um eine deutliche Reduktion der Phosphoremissionen zu ermöglichen. Voraussetzung ist, dass eine geeignete Dosierstelle eingerichtet und der Fällschlamm

effizient entfernt werden kann. Durch weitergehende Optimierungen sind, insbesondere bei Belebungsanlagen, mit geeigneten Randbedingungen grundsätzlich ohne große Investitionen Ablaufwerte von im Mittel 0,7-0,8 mg P_{ges}/L verfahrenstechnisch und ökonomisch möglich. Zu beachten ist, dass bei der Verwendung von (Schönungs-)Teichen eine häufigere Entnahme des Schlammes vorzunehmen ist, um Rücklöseerscheinungen zu verringern und eine weitergehende Phosphorelimination zu ermöglichen. Kommunale Kläranlagen, die ein Bio-P-Becken besitzen, müssen bei höheren Anforderungen ($\leq 2,0$ mg P_{ges}/L) zusätzlich Fällmittel dosieren, da andernfalls entweder der Ablaufwert nicht betriebsstabil eingehalten werden kann oder es zu Problemen mit MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat) kommen kann. Für Kläranlagen der GK 4 und GK 5 ist die Einhaltung niedriger Mittelwerte von 0,5 mg P_{ges}/L grundsätzlich realisierbar, vorausgesetzt die Nachklärbecken entsprechen dem Stand der Technik und die Anlage wird im Hinblick auf die Schlammabsetzbarkeit betrieblich optimiert.

Die dominierende Rolle für die Erzielung sehr niedriger Phosphorablaufkonzentrationen ($< 0,5$ mg P_{ges}/L) ist die effiziente Abtrennung der partikulären Stoffe in der Nachklärung. Hierauf ist insbesondere im Betrieb durch Maßnahmen zur Optimierung der Absetzbarkeit des Belebtschlammes und bei der Konstruktion der Nachklärung (siehe Empfehlungen im DWA-A 131 (2016)) zu achten. So liegen die absoluten partikulären Phosphorablaufkonzentrationen, berechnet für die bayerischen Kläranlagen, im Mittel bei etwa 0,15 mg P/L (GK 4) bzw. 0,12 mg P/L (GK 5), wobei bei den Anlagen der GK 4 bis zu 0,35 mg P/L im Ablauf vorkommen können (Bild 8). Hinzu kommen ein gelöster, nicht-fällbarer Phosphoranteil von etwa 0,05-0,10 mg P/L (u. a. Phosphite sowie Phosphonate, meist von Indirekteinleitern aus der Metall- und Textilindustrie) sowie ein geringer Anteil an ortho-Phosphat, der aus ökologischen und ökonomischen Gründen nicht gefällt wird, da bei einer vollständigen Fällung des gelösten ortho-Phosphats sowohl mit einem sehr hohen Fällmittelverbrauch als auch mit einem erhöhten Salzeintrag in die Gewässer zu rechnen ist. Somit sind für Belebungsanlagen bei geeigneten Randbedingungen und bei einem optimierten Betrieb Ablaufkonzentrationen von 0,30-0,50 mg P_{ges}/L im Mittel betriebsstabil erreichbar. Für eine betriebssichere Einhaltung von Überwachungswerten $\leq 0,5$ mg P_{ges}/L ist somit meist eine weitestgehende Reduktion des gebundenen Phosphoranteils erforderlich. Welche Maßnahmen dafür infrage kommen (z. B. optimiertes Einlaufbauwerk oder (Flockungs-)Filtration), muss jeweils im Einzelfall untersucht werden.

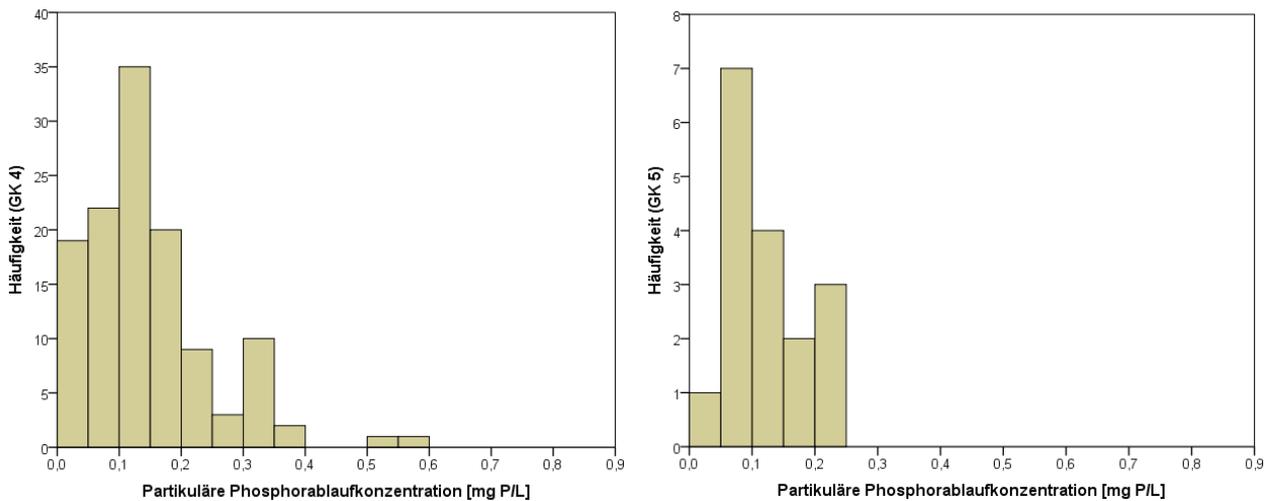


Bild 8: Berechnete partikuläre Phosphorablaufkonzentrationen (AFS-Messwerte multipliziert mit 0,03 für den Phosphoranteil für Anlagen mit reiner chemischer Fällung bzw. 0,06 für Anlagen mit zusätzlichem Bio-P-Becken) für bayerische Kläranlagen der GK 4 (n=122) und GK 5 (n=17) für das Jahr 2015

Folglich ist sowohl für die Kläranlagen der GK 2 und GK 3 als auch für die Anlagen der GK 4 und GK 5 eine deutliche Reduzierung der Phosphorfrachten grundsätzlich verfahrenstechnisch möglich, wobei der Aufwand mit strengeren Anforderungen stark steigt, wie auch die eingesetzte Fällmittelmenge mit abnehmenden Ablaufkonzentrationen überproportional zunimmt.

3.4 Personalbedarf

Eine weitestgehende Phosphorelimination (z. B. durch Erhöhung der Fällmittelmenge, Anpassung der Regelung/Steuerung oder Implementierung weiterer Messtechnik) ist für Kläranlagen der GK 4 und GK 5 mit dem bestehenden Personal machbar, sofern keine weiterreichenden baulichen Maßnahmen (z. B. Abwasserfilter) erforderlich sind. Dahingegen ist bei den Kläranlagen der GK 3 und besonders der GK 2 zu prüfen, ob das vorhandene Personal, das in der Regel häufig weitere kommunale Aufgaben übernehmen muss, im Hinblick auf die erforderliche Qualifikation und den zusätzlichen Zeitaufwand ausreicht. Bei den kleineren Anlagen ist nicht nur die Umsetzung der weitestgehenden Phosphorelimination sondern auch die effiziente Verwendung der Fällmittel in hohem Maße von der Qualifizierung und Weiterbildung des Personals abhängig. Die Nachrüstung eines Bio-P-Beckens ist für kleinere Anlagen nicht zu empfehlen, da der personelle Aufwand für diese Anlagen deutlich höher ist und nur in Einzelfällen vom Betriebspersonal zusätzlich abgedeckt werden kann. Zudem ergab sich bei der Befragung der Kläranlagenbetreiber, welche Anlagen mit Bio-P und chemischer Fällung betreuen, dass seit Jahren oftmals der Anteil der Bio-P zugunsten der Fällung aufgrund betrieblicher Probleme reduziert wurde.

3.5 Mess-, Steuerungs- und Regelungs-Technik

Generelle Aussagen zur Implementierung der Steuerungs- und Regelungs-Technik für eine weitestgehende Phosphorelimination können nicht getroffen werden. Grundvoraussetzung bei Kläranlagen mit chemischer Fällung ist, dass sowohl eine Steuerungseinheit vorhanden ist bzw. nachgerüstet wird, als auch die Pumpen automatisch gesteuert werden können. Die Fällmitteldosierung sollte je nach Belastung stufenweise erhöht werden können, da eine konstante Dosierung bei hohen Anforderungen sonst eine zu große Fällmittelmenge benötigen würde. Die Steuerung der Fällmitteldosierung kann zeitabhängig unter Berücksichtigung gemessener Ganglinien, wassermengenproportional oder frachtproportional durchgeführt werden (DWA-A 202, 2011). Daneben ist eine Aufzeichnung der Steuerung sowie der Einstellungen der veränderten Parameter unabdingbar, um eine Datenauswertung durchführen zu können.

Eine Regelungstechnik mit Online-Überwachung kann den Fällmitteleinsatz optimieren, ist jedoch für kleinere Anlagen meist nicht notwendig. Es muss sichergestellt werden, dass die Messgrößen sicher und zuverlässig bestimmt werden. Die Betriebsanweisung muss eine alternative Vorgehensweise aufführen, die bei Störungen in der Messung oder sonstigen Ausfällen zum Einsatz kommen kann.

4 Kosten für Investition und Betrieb einer weitestgehenden Phosphorelimination

Während in Bayern alle kommunalen Kläranlagen der GK 4 und GK 5 über Verfahren zur weitergehenden Phosphorelimination verfügen, ist dies bei den kleineren Anlagen oftmals nicht der Fall. Bei der Planung von Maßnahmen zur weitestgehenden Phosphorelimination ist auch der finanzielle Aufwand bei diesen kleineren Anlagen zu betrachten. Daher erfolgte im Rahmen des LfU-Projektes u. a. eine Kostenabschätzung zur Implementierung einer Simultanfällung bei Belebungsanlagen einer Größenordnung zwischen 1.000 EW und 25.000 EW.

Bei dem im Folgenden dargestellten Beispiel wurde davon ausgegangen, dass eine Phosphorablaufkonzentration von im Mittel $1,0 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ erzielt werden soll. Dabei sind die Kosten für das Fällmittel bezogen auf die Gesamtkosten eher von untergeordneter Bedeutung ($0,04 \text{ €}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ bis $0,21 \text{ €}/(\text{EW} \cdot \text{a})$) (Bild 9). Dominierend sind vielmehr bei den Betriebskosten die Wartung und das Personal und letztendlich die Kosten für die Entsorgung des vermehrt anfallenden Schlammes aus der Fällung (Annahme: Entsorgungspreis von 340 € pro Tonne Trockenmasse). Die durch die erforderlichen Investitionen entstehenden Kosten haben einen hohen Anteil und sind im Wesentlichen für die Kostendegression bei den spezifischen Kosten je Einwohner und Jahr verantwortlich. Insgesamt stellt

sich eine Fällung des Phosphors als finanzierbar dar, wie die spezifischen Kosten im Bereich der kleinen Anlagen von etwa 2-5 €/ (EW·a) zeigen. Die Auswertung verdeutlicht aber, dass bei kleineren Anlagen mit weniger als 5.000 EW die Kosten stark ansteigen, da die Grundausstattung für eine Fällung stets aufzuwenden ist.

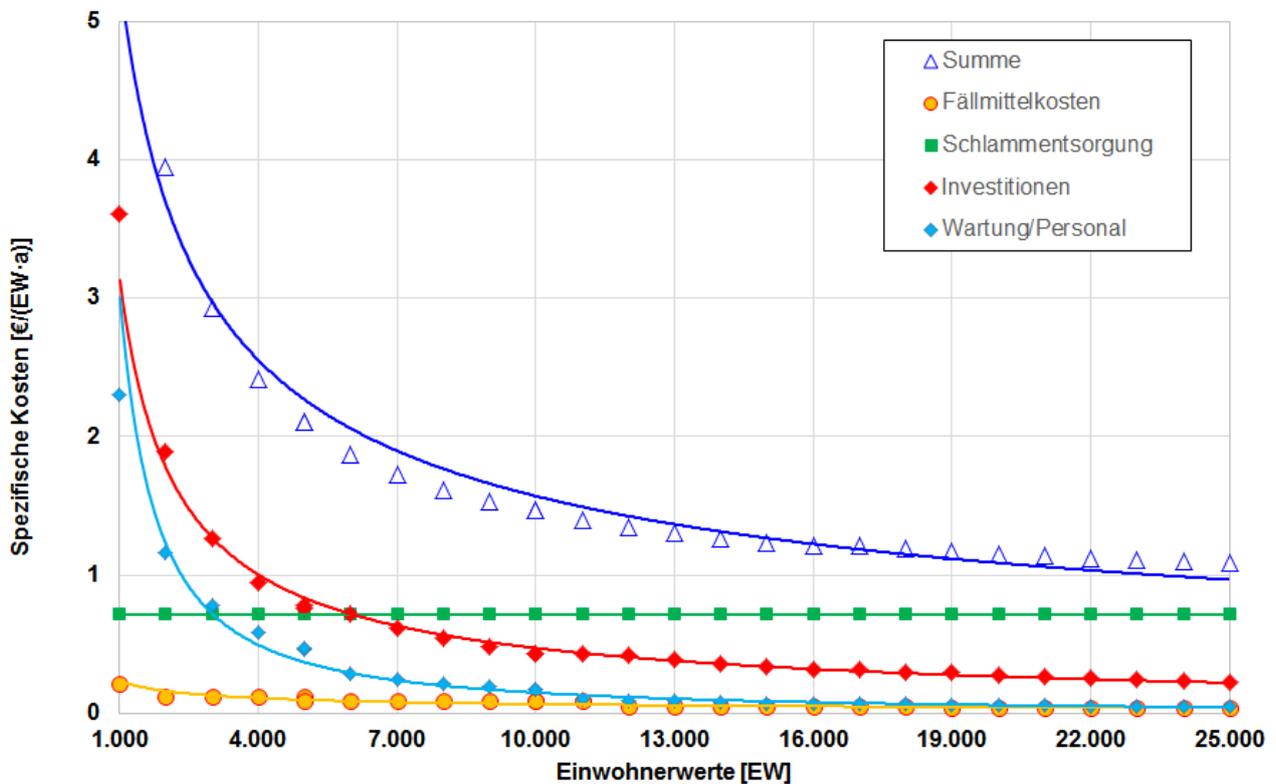


Bild 9: Abgeschätzte Gesamtkosten für Phosphatfällung in Abhängigkeit der angeschlossenen Einwohnerwerte

Bezogen auf den zusätzlich entnommenen Phosphor ergeben sich in etwa folgende spezifische Kosten:

Anlage mit 1.000 EW:	ca. 22 €/kg P
Anlage mit 2.000 EW:	ca. 13 €/kg P
Anlage mit 5.000 EW:	ca. 7 €/kg P
Anlage mit 10.000 EW:	ca. 5 €/kg P
Anlage mit 20.000 EW:	ca. 3,7 €/kg P
Anlage mit 25.000 EW:	ca. 3,5 €/kg P

Insbesondere bei den sehr kleinen Kläranlagen steigt somit der finanzielle Aufwand bezogen auf die entfernte Phosphorfracht beachtlich.

Den Einfluss der angestrebten Gesamtposphorablaufkonzentration auf die Gesamtkosten der Fällung zeigt Bild 10. Es wird deutlich, dass der Einfluss der mittleren Ablaufkonzentration auf die Kosten zwar innerhalb einer Ausbaugröße erkennbar ist, aber im Vergleich zum Einfluss der Kostendegression bei größeren Anlagen von eher untergeordneter Bedeutung ist. Die Kostensteigerung durch höhere Ablaufanforderungen wird dabei hauptsächlich durch den vermehrten Schlammanfall und dessen Entsorgungskosten verursacht, nicht durch die Kosten des Fällmittels. Die in der Berechnung angesetzten 340 € pro Tonne Trockenmasse ist eine reine Abschätzung, sodass der Wert im Einzelfall stark schwanken kann. Die modellhafte Kostenschätzung ist allerdings für kleine Anlagen mit einer vorgegebenen Ablaufkonzentration von $< 1 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ ungenau, da eventuell zur Erzielung stabiler niedriger Werte zusätzliche Maßnahmen wie Online-Messungen oder intensivere personelle Betreuung eine zunehmende Rolle spielen.

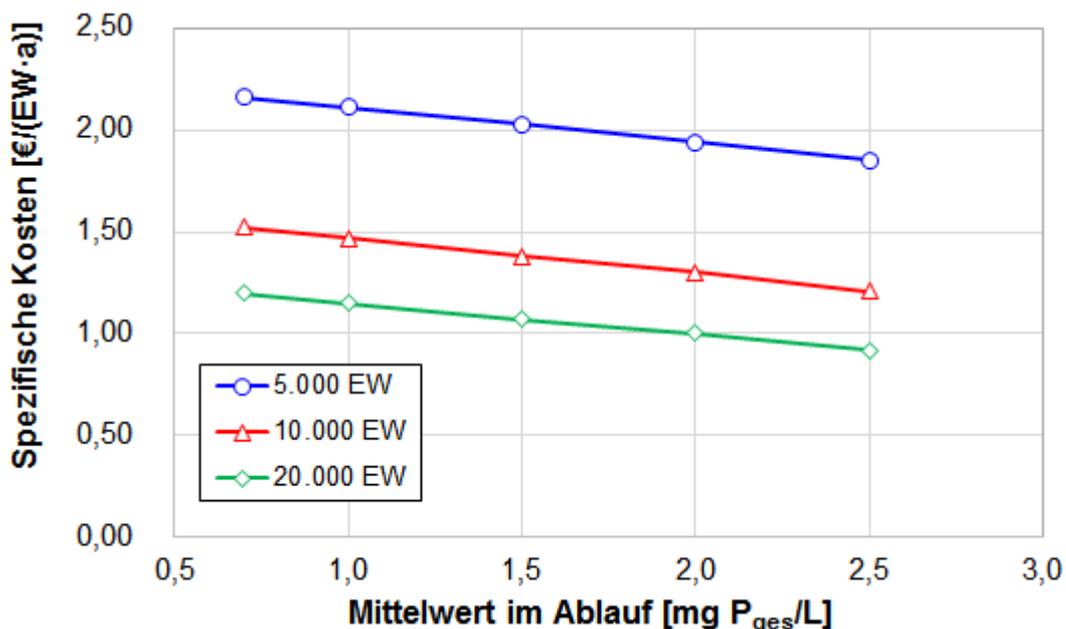


Bild 10: Einfluss des Gesamtposphorablaufwertes auf die Kosten der Phosphatfällung

Die Fällmittelkosten fallen somit in der Regel im Vergleich zu den übrigen Kostenfaktoren (Wartung/Personal, Schlamm Entsorgung, Investitionen) für die Umsetzung einer weitestgehenden Phosphorelimination nicht ins Gewicht. In den betrachteten Fällen liegen die mit der Fällmitteldosierung verbundenen Investitionskosten selbst bei geringen Anschlussgrößen der GK 2 bei ca. 2-5 €/EW·a). Diese spezifischen Kosten für eine zusätzliche Fällung sind bei kleinen Anlagen niedriger als die Kosten für eine Nachrüstung einer Filtration bei großen Anlagen. Eine Optimierung der Dosierung kann durch Mess- und Regeltechnik erzielt werden, wobei diese bei kleinen Anlagen maßgeblich für

die Kosten sind. Da kleine Anlagen in der Regel höhere Zulaufschwankungen haben als große Anlagen, wäre eine gesteuerte Dosierung dort besonders relevant. Eine Zwei-Punkt-Fällung mit nachgeschalteter Raumfiltration ist allerdings für GK 3 und kleiner aufgrund der erhöhten Investitionskosten nicht geeignet. Der Mehranfall an Fällschlamm durch eine zusätzlich erhöhte Fällung ist vergleichsweise gering und somit nicht kostenentscheidend.

Die Regelungen des Abwasserabgabengesetzes können für kleinere und mittlere Anlagen, die bisher keine Phosphatfällung betrieben haben, einen Anreiz zur Nachrüstung einer Fällmittelstation darstellen, da die Erstinvestition mit der Abwasserabgabe der letzten drei Jahre verrechnet werden kann. Zudem fallen aufgrund des niedrigeren Überwachungswertes weniger Abgaben an, sodass die Betriebskosten sinken. Lediglich bei sehr kleinen Anlagen (< 3.000 EW) ergibt sich hieraus kein entscheidender Vorteil. Modellrechnungen anderer Autoren zu den zusätzlichen Betriebskosten haben gezeigt, dass die Phosphorelimination unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Abwasserabgabe oft kostengünstiger ist als eine weitere unverminderte Einleitung der Phosphorfracht in den Vorfluter (Barjenbruch und Exner, 2009).

5 Abschätzung der potenziellen Frachtreduktion durch erhöhte Anforderungen an den Gesamtphosphor im Kläranlagenablauf

5.1 Szenario 1: Erhöhung der Anforderungen für Anlagen der GK 2-5 (Theoretisches Phosphorreduktionspotential von ca. 35 %)

Unter der Annahme einer weitergehenden Phosphorelimination bei den Kläranlagen der GK 2-5 ergeben sich, basierend auf den Daten des Jahres 2015, berechnete Reduktionsmöglichkeiten von rund einem Drittel. Bei diesem Berechnungsmodell ist teilweise mit erhöhten Investitions- und Betriebskosten zu rechnen (siehe Kapitel 4).

Eine mögliche Umsetzung sähe die Einführung von Anforderungswerten von 2,0 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 2 und GK 3 sowie von 0,8 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 4 und GK 5 vor (Variante A, Tabelle 4). Eine andere Umsetzung zur Reduzierung der Phosphoremissionen um rund ein Drittel sähe die Einführung von Anforderungswerten von 2,0 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 2, von 1,0 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 3 und GK 4 sowie von 0,5 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 5 vor (Variante B, Tabelle 5).

Tabelle 4: Reduzierung der Frachten bei erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 1 A, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Größenklasse	Möglicher Mittelwert	Anzahl der betroffenen Kläranlagen	Gesamtemission an P _{ges}	Mögliche Reduktion [t/a]	Mögliche Reduktion [%]
[-]	[mg P _{ges} /L]		[t/a]		
∑ 2-5	1,30 bzw. 0,50	1.026	803	488	35,4
2	1,30	640	175	232	16,8
3	1,30	129	128	68	4,9
4	0,50	244	248	147	10,7
5	0,50	13	252	41	3,0

Tabelle 5: Reduzierung der Frachten bei erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 1 B, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Größenklasse	Möglicher Mittelwert	Anzahl der betroffenen Kläranlagen	Gesamtemission an P _{ges}	Mögliche Reduktion [t/a]	Mögliche Reduktion [%]
[-]	[mg P _{ges} /L]		[t/a]		
∑ 2-5	0,35-1,50	1.007	806	485	35,2
2	1,50	623	199	208	15,1
3	0,80	184	87	109	7,9
4	0,70	179	315	80	5,8
5	0,35	21	205	88	6,4

Von Maßnahmen zur Reduzierung der Phosphorfrachten um rund ein Drittel wären ca. 76 % der Kläranlagen der GK 2-5 betroffen. Eine angepasste Steuerungs- oder Regelungstechnik ist zusammen mit einer Nachklärung nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik (DWA-A 131 (2016)) für die meisten Anlagen Voraussetzung zum Erreichen der angegebenen Mittelwerte. Hohe Kosten entstehen meist nur dann, wenn die Nachklärung nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik entspricht und die Ablaufwerte in Bezug auf den partikulären Anteil nur durch eine hydraulisch optimierte Nachklärung (Einlaufgestaltung, ausreichender Flockungsraum) und nicht durch eine veränderte Betriebsweise erreicht werden können. In fast allen Fällen würden sich der Aufwand und die damit verbundenen Kosten v. a. auf die vergleichsweise kostengünstige Nachrüstung von Fällmittelstationen bzw. die Änderung der Fällmitteldosierung sowie die Implementierung bzw. Anpassung von Steuerungs- oder Regelungstechniken beschränken. Außerdem könnte durch eine

veränderte Betriebsführung, wie dem Betrieb der Belebung bei niedrigeren Schlammindizes (Maßnahme zur Bekämpfung von Schwimm- und Blähschlamm), ein niedrigerer Ablaufwert bei den Belebungsanlagen erreicht werden. Darüber hinaus müssten Kläranlagen der GK 4 und GK 5 vereinzelt auf Zwei-Punkt-Fällung umgerüstet werden, wobei im Regelfall die Umsetzung des Szenarios 1 A technisch gesehen ohne den Bau von Filteranlagen möglich ist, da bei den meisten dieser Anlagen bereits ein Abwasserfilter vorhanden ist bzw. eine Nachrüstung aufgrund einer ausreichenden Nachklärung nicht notwendig sein sollte. Bei Szenario 1 B können im Einzelfall erhöhte Kosten durch weitere bauliche Maßnahmen für die Anlagen der GK 5 entstehen.

5.2 Szenario 2: Starke Erhöhung der Anforderungen für Anlagen der GK 2-5 (Theoretisches Phosphorreduktionspotential von ca. 53 %)

Unter der Annahme einer möglichst weitestgehenden Phosphorelimination bei den Kläranlagen der GK 2-5 (Reduktionspotential von rund der Hälfte der bisherigen Phosphoremissionen) ergeben sich erhöhte Anforderungen für 90,7 % der Anlagen der GK 2-5 (Tabelle 6). Bei diesem Fall ist mit deutlich erhöhten Investitions- und Betriebskosten zu rechnen.

Eine mögliche Umsetzung des stark erhöhten Reduktionspotentials sähe die Einführung von Anforderungswerten von 1,0 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 2 und GK 3 sowie 0,5 mg P_{ges}/L für Kläranlagen der GK 4 und GK 5 vor. Gerade für die kleineren Anlagen der GK 2 ist ein Anforderungswert von 1,0 mg P_{ges}/L jedoch betrieblich sehr anspruchsvoll, insbesondere wenn Teichkläranlagen zum Einsatz kommen.

Hierzu müssten die meisten Kläranlagen der GK 4 und GK 5 auf Zwei-Punkt-Fällung umgerüstet werden, teils mit Flockungfiltration oder Bio-P. Bei den Anlagen der GK 2 und GK 3 ist meist eine angepasste Steuerungs- und Regelungstechnik notwendig, wobei bei klein dimensionierten Nachklärbecken mit deutlich erhöhten Fällmittelmengen (ca. Faktor 2 über den Erfahrungswerten) bzw. sehr hohen baulichen Kosten zur Optimierung der Nachklärung zu rechnen ist. Daher würde eine Umsetzung von Szenario 2 bei vielen Anlagen zu stark erhöhten Kosten durch bauliche Maßnahmen führen, wobei bei den naturnahen Anlagen (z. B. Abwasserteiche) im Einzelfall ein Systemwechsel (z. B. Belebungsanlage bzw. Anschluss an eine größere Kläranlage) notwendig werden würde. Somit würde diese deutliche Reduzierung der Phosphorfracht im Vergleich zu Szenario 1 sowohl einen stark erhöhten Aufwand bedeuten als auch deutlich höhere Investitions- und Betriebskosten verursachen.

Tabelle 6: Reduzierung der Frachten bei stark erhöhten Anforderungen für Kläranlagen der GK 2-5 (Szenario 2, n=1.325), die prozentuale Reduktion bezieht sich auf die Gesamtjahresfracht von 1.378 t; Datenquelle: LfU/DABay 2015

Größenklasse [-]	Möglicher Mittelwert [mg P _{ges} /L]	Anzahl der betroffenen Kläranlagen	Gesamtemission an P _{ges} [t/a]	Mögliche Reduktion [t/a]	Mögliche Reduktion [%]
∑ 2-5	0,70 bzw. 0,35	1.202	565	726	52,6
2	0,70	707	99	308	22,3
3	0,70	191	77	119	8,6
4	0,35	283	184	211	15,3
5	0,35	21	205	88	6,4

5.3 Schlussfolgerungen

Insgesamt gesehen ist eine deutliche Reduzierung der Phosphorfrachten durch die Verwendung gängiger Verfahren rechnerisch möglich. Jedoch nehmen die Anzahl der betroffenen Kläranlagen sowie die Kosten mit einer Steigerung der Anforderungen deutlich zu. Bei einem Reduktionsziel von rund 50 % (bezogen auf die Gesamtphosphoremissionen der kommunalen Kläranlagen) wären ca. 1.200 Anlagen und somit rund 90 % der Kläranlagen der GK 2-5 von zusätzlichen Maßnahmen zur weitestgehenden Phosphorreduktion betroffen. Durch die Berücksichtigung weiterer Rahmenbedingungen (v. a. örtliche Gegebenheiten, Relevanz des Frachtbeitrags der einzelnen Kläranlage, wirtschaftliche Umsetzbarkeit der Maßnahmen) wird der reale Effekt von diesen Berechnungen abweichen. Bei den kleineren Anlagen ist nicht nur die Umsetzung der weitestgehenden Phosphorelimination, sondern auch die effiziente Verwendung der Fällmittel in hohem Maße von der Qualifizierung und Weiterbildung des Personals abhängig. Somit ist besonders bei den kleineren Anlagen der GK 2 und GK 3 mit zusätzlichen Kosten beim Betriebspersonal zu rechnen, wobei eine Vollzeitstelle für Kläranlagen der GK 3 sinnvoll wäre. Dabei ist zu berücksichtigen, dass viele Tätigkeiten aus Arbeitssicherheitsgründen nur zu zweit ausgeführt werden dürfen und dies besonders in Urlaubs- und Krankheitsfällen zu Problemen beim sicheren Betrieb einer weitestgehenden Phosphorelimination führen kann. Auch aus diesen Gründen ist die Nachrüstung eines Bio-P-Beckens für kleinere Anlagen nicht zu empfehlen.

Folgende Maßnahmen sind für die Einhaltung der strengeren Anforderungen insbesondere bei technischen Abwasserbehandlungsanlagen – in Abhängigkeit von der Ausgangssituation und dem erforderlichen Reinigungsziel – grundsätzlich möglich:

- Nachrüstung einer Phosphatfällung (Fällmittelstation)
- Optimierte Simultanfällung auf der Grundlage eines Messprogramms
- Optimierte Steuerung bzw. Regelung der Fällung
- Optimierte Nachklärung
- Zwei-Punkt-Fällung (bei GK 4 und GK 5)
- Flockungsfiltration (bei GK 5)

6 Hinweise für die Umsetzung im Einzelfall

Ein pauschales Vorgehen zur Implementierung einer weitestgehenden Phosphorreduktion auf einer kommunalen Kläranlage wird als nicht zielführend angesehen, es sollte vielmehr für jede Kläranlage individuell über geeignete Umsetzungsmaßnahmen entschieden werden. Die Umsetzung muss neben den Überwachungswerten auch die örtlichen Randbedingungen berücksichtigen.

Allgemein ist festzuhalten, dass sehr strenge Reinigungsziele nicht nur einen sehr hohen Aufwand verursachen, sondern auch mit jeder Steigerung das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen überproportional steigt. Um für Bayern eine möglichst betriebssichere und effiziente Reduzierung der Phosphoremissionen zu erreichen, ist ein differenziertes Vorgehen unter Berücksichtigung der Verhältnisse in den einzelnen Größenklassen und der jeweiligen Immissionssituation erforderlich.

Zu Beginn der Implementierung einer weitestgehenden Phosphorelimination ist zuerst eine Nachberechnung der Dimensionierung der Nachklärung vorzunehmen. Bei einem zu hohen Feststoffabtrieb sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, da eine dauerhafte Dosierung von Fällmitteln zur Verbesserung der Absetzeigenschaften des Schlammes aus Gründen der zusätzlichen Aufsatzung aber auch besonders aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Nachhaltigkeit abzulehnen ist. Beispielsweise kann eine Optimierung des Ein- und Auslaufbauwerkes die Trennleistung der Nachklärung deutlich verbessern. Anschließend ist eine Optimierung der bereits auf einer Kläranlage bestehenden Verfahren durch den Einsatz einer geeigneten Steuerungs- und Regelungstechnik als erste Maßnahme sinnvoll. Die Zusammensetzung des Gesamtphosphors ist abhängig von den angeschlossenen Einleitern, Schwankungen im Einzugsgebiet sowie der Kläranlage selbst und muss im Rahmen eines erweiterten Monitorings bestimmt werden. Eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Phosphoranteile unter Berücksichtigung des Feststoffabtriebs ermöglicht die wirtschaftliche Optimierung bereits bestehender Maßnahmen und hilft mögliche Defizite bezogen auf die Elimination einzelner Phosphorfraktionen aufzuzeigen. In vielen Fällen wäre beispielsweise ein niedrigerer Ablaufwert durch die Reduktion des partikulären Phosphoranteils möglich. Dies könnte durch eine

veränderte Betriebsführung, wie dem Betrieb der Belebung bei niedrigeren Schlammindizes (Maßnahme zur Bekämpfung von Schwimm- und Blähschlamm), oder durch eine hydraulisch optimierte Nachklärung (Einlaufgestaltung, ausreichender Flockungsraum) erreicht werden. Auch eine Reduzierung des Schlammalters kann die Phosphorentfernung erhöhen. Da die Betriebsweise zur Minimierung von Schwimmschlamm/Blähschlamm häufig besser belüftete Belebungsbecken sowie einen höheren Anteil belüfteter Zonen verlangt, kann ein Zielkonflikt zwischen Stickstoffelimination und optimaler Phosphorelimination entstehen. Eine temporäre Erweiterung des Messumfangs ist daher auch zu empfehlen, um zusätzlich eine optimale Verfahrenskombination zu identifizieren und eine bestmögliche Ausnutzung der Potentiale einzelner Maßnahmen zu erreichen.

7 Fazit

In Bayern ist das Reduktionspotential der Gesamtphosphoremissionen bei den Kläranlagen der GK 2-5 am größten (Frachtbetrachtung). Würde bei jeder bestehenden Kläranlage der GK 2-5 eine Umrüstung auf eine weitestgehende Phosphorelimination vorgenommen, wäre rechnerisch eine maximale Reduktion der Gesamtphosphorfracht aus Kläranlagen in einer Größenordnung von etwa 30 % bis 55 % vorstellbar.

Die Betrachtung des Ist-Zustandes auf allen bayerischen Kläranlagen (> 50 EW) anhand statistischer Kenndaten sowie die Bilanzierungen der Phosphorelimination auf zehn ausgewählten Kläranlagen in Deutschland ergaben, dass für die weitestgehende Phosphorelimination die bestehenden Verfahren (chemische Phosphatfällung, ggf. mit Filtration oder in Kombination mit Bio-P) geeignet sind. Für Belebungsanlagen der GK 2 sind durch eine optimierte Simultanfällung mittlere Konzentrationen $\leq 0,8 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ im Ablauf möglich. Bei den Kläranlagen der GK 3-5 ist durch eine Optimierung der Betriebsweise eine mittlere Konzentration des Gesamtphosphors im Kläranlagenablauf von $0,5 \text{ mg P}_{\text{ges}}/\text{L}$ grundsätzlich betriebsstabil erreichbar, sofern die Nachklärung gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik bemessen ist und betrieben wird (DWA-A 131, 2016). Die Verwendung eines Abwasserfilters ist nur bei stark erhöhten Anforderungen notwendig. Dafür ist bei noch nicht optimierten Anlagen mit bereits bestehender Phosphatfällung ein erhöhter Fällmittelbedarf notwendig sowie gegebenenfalls ein größerer Fällmitteltank bzw. eine neue Mess- und Regeltechnik. Bei Anlagen, die bisher ohne Fällung betrieben wurden, ist dagegen eine komplette Fällmittelstation als Erstinvestition erforderlich. Auch bei Tropfkörperanlagen und Teichanlagen mit technischer Stufe, die eine effiziente Fällmitteldosierung erlaubt, besteht ein entsprechendes Optimierungspotenzial ohne Wechsel des Anlagentyps. Gerade für die kleineren, naturnahen Anlagen der GK 2 ist

ein Anforderungswert von 1,0 mg P_{ges}/L jedoch betrieblich sehr anspruchsvoll. Die Einhaltung mittlerer Ablaufkonzentrationen unter 0,5 mg P_{ges}/L erfordert grundsätzlich zusätzliche Maßnahmen wie Zwei-Punkt-Fällung, Bio-P, Filtration bzw. Flockungsfiltration, welche für den Einzelfall abzuleiten sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die effiziente Verwendung der Fällmittel in hohem Maße von der Qualifizierung und Weiterbildung des Personals abhängig ist. Somit ist besonders bei den kleineren Anlagen der GK 2 und GK 3 mit zusätzlichen Kosten beim Betriebspersonal zu rechnen. Auch aus diesen Gründen ist die Nachrüstung eines Bio-P-Beckens für kleinere Anlagen nicht zu empfehlen.

Die spezifischen Investitions- und Betriebskosten zur Implementierung einer Simultanfällung bei Belebungsanlagen mit 1.000 EW und 25.000 EW wurden für verschiedene Bemessungsfälle inklusive Steuerung/Regelung berechnet. Diese liegen bei den Kläranlagen der GK 2 bei ca. 2-5 €/ (EW·a). Insbesondere bei den sehr kleinen Kläranlagen steigt der finanzielle Aufwand bezogen auf die entfernte Phosphorfracht deutlich.

Danksagung

An dieser Stelle möchten sich die Mitarbeiter der Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH und das Projektteam des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität München (TUM) für die gute Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) und beim Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) für die Finanzierung bedanken. Besonderer Dank gilt allen an diesem Vorhaben beteiligten Kläranlagenbetreibern sowie den bayerischen Wasserwirtschaftsämtern für die stets freundliche Auskunft und sehr gute Unterstützung.

Literaturverzeichnis

AbwV (2004). Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung), vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 01. Juni 2016 (BGBl. I S. 1290) geändert.

Barjenbruch, M. & Exner, E. (2009). Leitfaden zur Verminderung des Phosphoreintrags aus Kläranlagen. Herausgegeben vom Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt des Landes Thüringen (TMLNU). Online verfügbar unter <http://apps.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1044.pdf> (abgerufen am 15.08.2016).

- Barjenbruch, M. & Exner, E. (2016). Grundlagen der chemischen Phosphorelimination (Chem-P) in Kläranlagen - Das DWA Arbeitsblatt 202. Expertenseminar „Neues zur Phosphorelimination in Kläranlagen“. DWA 2016, Hennef (unveröffentlicht).
- DWA-A 131 (2016). Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2016. ISBN 13: 978-3-88721-331-2.
- DWA-A 202 (2011). Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2011. ISBN 13: 978-3-941897-87-8.
- eawag (2008). Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen. Gutachten im Auftrag der Europa Fachhochschule Fresenius und des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG). Online verfügbar unter <http://flussgebiete.hessen.de> (abgerufen am 15.08.2016).
- EÜV (1995). Eigenüberwachungsverordnung (EÜV) vom 20. September 1995 (GVBl. S. 769, BayRS 753-1-12-U), zuletzt durch § 78 Abs. 3 des Gesetzes vom 25. Februar 2010 (GVBl. S. 66) geändert.
- OGewV (2016). Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373).
- Pinnekamp, J. & Friedrich, H. (2003). Membrantechnik für die Abwasserreinigung. Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Band 1.
- Pinnekamp, J. (2007). Studie „Stand der Phosphorelimination bei der Abwasserreinigung in NRW sowie Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und aus Prozesswässern der Schlammbehandlung“. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter [https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/forschungsvorhaben/details/?tx_mmkresearchprojects_pi1\[uid\]=217](https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/forschungsvorhaben/details/?tx_mmkresearchprojects_pi1[uid]=217) (abgerufen am 30.09.2016).
- Sabelfeld, M. & Geißen, S.-U. (2011). Verfahren zur Eliminierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser. Chemie Ingenieur Technik, 83(6), 782-795.
- Statistisches Bundesamt Wiesbaden (2015). Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung – Öffentliche Abwasserbehandlung und -entsorgung 2013, Fachserie 19, Reihe 2.1.2.
- Voigt, A., Kleffmann, M. & Durth, A. (2013). Verbesserung der Phosphorelimination auf Kläranlagen vor dem Hintergrund steigender Anforderungen. 14. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium am 09. und 10.09.2013, Tagungsband "Aachener Schriften zur Stadtentwässerung", Band 17, 28/1-28/12.
- WHG (2009). Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 04. August 2016 (BGBl. I S. 1972) geändert.