

Studie
„Empfehlungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen
für eine großtechnische Umsetzung von Verfahren zur
Phosphorrückgewinnung“

zum Forschungsvorhaben:

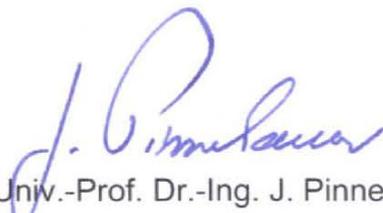
„Phosphorrecycling – Rückgewinnung von industriell bzw.
landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen
aus Abwasser und Klärschlamm“

AZ IV - 9 - 042 423

für das



Aachen, 31. Mai 2007


Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
(Projektleiter)

Inhalt

Verzeichnis der Tabellen	III
Verzeichnis der Bilder	V
1 Einleitung	1
2 Übersicht über die betrachteten Verfahren und Beschreibung des Bewertungsverfahrens	2
3 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche	4
3.1 Auslegungsdaten und Erläuterung der Verfahrenstechniken der Anlagen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche.....	4
3.2 Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten	6
3.2.1 Ermittlung der Investitionskosten.....	6
3.2.2 Ermittlung der Betriebs- und Jahreskosten	9
4 Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung	11
4.1 Auslegungsdaten und Erläuterungen der Verfahrenstechnik der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung..	11
4.2 Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten	13
4.2.1 Ermittlung der Investitionskosten.....	14
4.2.2 Ermittlung der Betriebs- und Jahreskosten	17
5 Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom mittels Nachfällung ..	20
5.1 Auslegungsdaten und Erläuterungen der Verfahrenstechnik der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom mittels Nachfällung.....	20
5.2 Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten	22
5.2.1 Ermittlung der Investitionskosten.....	22
5.2.2 Ermittlung der Betriebs- und Jahreskosten	24
6 Zusammenfassende Bewertung der Jahreskosten der unterschiedlichen Verfahren	27
7 Ausblick und Empfehlungen	29
8 Literatur	31

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3.1: Annahmen zur Bemessung einer Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche	4
Tabelle 3.2: Zusammenstellung der Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus Klärschlammaschen von Monoverbrennungsanlagen.....	6
Tabelle 3.3: Zusammenstellung der Jahreskosten (Summe aus Kapital- und Betriebskosten) für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus der Klärschlammasche von Monoverbrennungsanlagen.....	9
Tabelle 3.4: Erlöse (netto) aus dem Verkauf eines Phosphor-Recyclingproduktes aus Klärschlammasche	10
Tabelle 4.1: Annahmen zur Bemessung einer PRISA-Anlage	11
Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung (Szenario 1)	14
Tabelle 4.3: Zusammenstellung der Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung bei Integration vorhandener Anlagenteile in den Prozess (Szenario 2).....	17
Tabelle 4.4: Zusammenstellung der Jahreskosten (Summe aus Kapital- und Betriebskosten) für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung (Szenario 1).....	17
Tabelle 4.5: Zusammenstellung der Jahreskosten (Summe aus Kapital- und Betriebskosten) für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung bei Integration vorhandener Anlagenteile in den Prozess (Szenario 2)	18
Tabelle 4.6: Erlöse (netto) aus dem Verkauf eines Phosphor-Recyclingproduktes aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung	19
Tabelle 5.1: Annahmen zur Bemessung einer Phosphorrecyclinganlage als Nachfällung.....	20

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Abwasser mittels Nachfällung.....	22
Tabelle 5.3: Zusammenstellung der Jahreskosten (Summe aus Kapital- und Betriebskosten) für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Abwasser mittels Nachfällung.....	25
Tabelle 5.4: Erlöse (netto) aus dem Verkauf eines Phosphor-Recyclingproduktes aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung	26
Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Kostendaten für ein Phosphorrecycling aus den Stoffströmen Asche, Prozesswasser der Schlammbehandlung und Abwasser.....	28
Tabelle 7.1: Netto-Jahreskosten und Phosphorrückgewinnungspotentiale unterschiedlicher Szenarien für NRW	30

Verzeichnis der Bilder

Bild 3.1: Fließbild der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm- asche.....	5
Bild 3.2: Grenzen der Kostenerfassung bei Betrachtung der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm- asche.....	6
Bild 4.1: Fließbild der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Prozesswässern der Schlammbehandlung	12
Bild 4.2: Grenzen der Kostenerfassung bei Betrachtung eines Neubaus der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung (Szenario 1)	13
Bild 4.3: Grenzen der Kostenerfassung bei der Integration bereits vorhandener Anlagenteile in die Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung (Szenario 2)	13
Bild 5.1: Fließbild der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom mittels Nachfällung	21
Bild 5.2: Grenzen der Kostenerfassung bei Betrachtung der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom mittels Nachfällung.....	22

1 Einleitung

Das MUNLV NRW hat mit den Forschungsvorhaben „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Machbarkeit in NRW und Untersuchungen zu zentralen und dezentralen Verfahren“ (AZ IV-9-042420) und „Phosphorrecycling – Rückgewinnung von industriell bzw. landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen aus Abwasser und Klärschlamm“ (AZ IV-9-042 423) mehrere Untersuchungen zur Phosphorrückgewinnung durchführen lassen.

In diesem Teilbericht werden die Ergebnisse von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für einige Verfahren dargestellt.

Diese Untersuchungen wurden vom ISA mit Unterstützung der Deutsche Projekt Union GmbH sowie dem Lehr- und Forschungsbereich Anorganische und Analytische Chemie, Umweltanalytik, Umwelttechnologie und Chemisch-physikalische Recyclingtechnologie der FH Aachen durchgeführt.

2 Übersicht über die betrachteten Verfahren und Beschreibung des Bewertungsverfahrens

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die folgenden Verfahren zum Phosphorreycling untersucht:

- a) Rückgewinnung aus Klärschlammmasche
- b) Rückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung
- c) Rückgewinnung aus dem Faulschlamm von Kläranlagen mit chemischer P-Elimination
- d) Rückgewinnung durch Kristallisation im Überschussschlamm
- e) Rückgewinnung aus separat gewonnenen Fällschlamm

Im Projektverlauf hat sich herausgestellt, dass für die untersuchten Verfahren (c) und (d) aufgrund bereits absehbarer hoher Betriebskosten (Verfahren (c)) bzw. nicht ausreichender Bemessungserkenntnisse (Verfahren (d)) sowie einer nicht umsetzbaren Technik (Verfahren (e)) eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu keinem verwertbaren Ergebnis führen wird. Im Einzelnen ist dies bei dem Verfahren (c) *Rückgewinnung aus dem Faulschlamm von Kläranlagen mit chemischer P-Elimination* zurückzuführen auf den sehr hohen Verbrauch an Chemikalien zur Ansäuerung und Komplexbildung in den einzelnen Verfahrensschritten bei einem gleichzeitig geringen Rückgewinnungspotential. Für das Verfahren (d) *Rückgewinnung durch Kristallisation im Überschussschlamm* hat sich gezeigt, dass die Technik nur schwer beherrschbar ist und noch nicht großtechnisch umgesetzt werden kann.

Auf Grundlage der Ergebnisse des abgeschlossenen Forschungsvorhabens „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Machbarkeit in NRW und Untersuchungen zu zentralen und dezentralen Verfahren“ (AZ IV-9-042420) und in Verbindung mit Erkenntnissen aus dem hier beschriebenen Forschungsprojekt wird zusätzlich zu den Verfahren (a) und (b) das Verfahren der Nachfällung zur Phosphorrückgewinnung im Ablauf einer kommunalen Kläranlage einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen.

Für die genannten Verfahren werden die Investitionskosten unter Annahme einer optimalen Verfahrenstechnik, die aus den wissenschaftlichen Untersuchungen abgeleitet wird, auf Basis von Erfahrungswerten des Ingenieurbüros Grontmij DPU, Literaturangaben und Preisanfragen insbesondere für die einzusetzenden Chemikalien abgeschätzt. Basis sind spezifische Preise, die auf Beckengröße bzw. Anlagendurchsatz bezogen sind.

Bei Ermittlung der Investitionskosten wurden die Nettosummen ermittelt. Die Nebenkosten wie Ingenieurhonorare, Prüf- und Nebengebühren wurden in der Kostenermittlung mit einem Anteil von 10 % bezogen auf die Investitionskosten berücksichtigt.

Grundstückskosten wurden nicht berücksichtigt, da die Anlagen auf Kläranlagen mit entsprechenden Platzreserven installiert werden sollten.

Als Wirtschaftlichkeitskriterium werden Jahreskosten (Euro pro Jahr) als Summe von Kapital- und Betriebskosten zu Grunde gelegt:

1. Kapitalkosten nach LAWA-Leitlinien (Annuität aus Abschreibung und Verzinsung)

- a) kalkulatorischer Zinssatz von 5%
- b) Abschreibungszeiträume:
 - Maschinenteknik 10 Jahre
 - Elektro-, Haus- und MSR-Technik 10 Jahre
 - Bautechnik 30 Jahre
- c) Ermittlung der Annuität gemäß:
 - Annuität = Investitionskosten • KFAKR (i,n)

$$= IK * \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

- Mit :
- i = Zinssatz in %
 - n = wirtschaftliche Lebensdauer in Jahren
 - IK = Investitionskosten
 - KFAKR (i,n) = Kapitalwiedergewinnungsfaktor

2. Betriebskosten

- a) Personal, Wartung
- b) Energieverbrauch
- c) sonstige Betriebsstoffe (Trinkwasser, Betriebswasser für Kühlung, etc)
- d) Instandhaltung, Reparaturen für Bau-, Maschinen- und E-Technik
 - Bautechnik 0,5 % der Investitionskosten
 - Maschinenteknik 2,0 % der Investitionskosten
 - Elektro-, Haus- und MSR-Technik 2,0 % der Investitionskosten
 - Die hier vorliegende Kostenermittlung wurde mit einem mittleren Anteil von 1,25 % der Investitionskosten zusammengefasst.

Bei der Kostenermittlung werden die Jahreskosten absolut und produktspezifisch (Euro je Kilogramm recyceltes Phosphat) sowie auf Einwohnerwerte bezogen (Euro je Einwohner) angegeben.

Die Kostenansätze für unterschiedliche Technologien wurden den Literaturstellen GÜNTHERT u. REICHERT (2001), REICHERT (2003), BOHN (1993), WAGNER (2001) und DPU (2006) entnommen.

3 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

3.1 Auslegungsdaten und Erläuterung der Verfahrenstechniken der Anlagen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

Beispielhaft wird für das Verfahren zum Phosphorreycling aus Klärschlammasche aus Monoverbrennungsanlagen eine Kostenermittlung durchgeführt. Die Anlagengröße wurde mit einer Kapazität von 15.000 Mg Asche pro Jahr festgelegt (zum Vergleich: Austrag der Monoverbrennung Buchenhofen liegt bei 12.000 Mg Asche pro Jahr). Die zur Bemessung relevanten Parameter sind in der Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Annahmen zur Bemessung einer Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

Parameter	Annahmen
Äquivalent zur Anschlussgröße (Basis 1,8 g P/(E•d) und 45 g TS/(E•d) und GV = 48 %)	1.573.000 E
Anlagenkapazität (Mg Asche pro Jahr)	15.000 Mg/a
Zulauf P (einwohnerspezifisch)	1,8 g P/(E•d)
Wirkungsgrad der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche	90 %
Anteil Phosphor gebunden im Schlamm	90 %
Menge P _{recycelt} (Basis P Gehalt in der Asche 6,2 %)	837.000 kg P/a
Menge P _{recycelt} (einwohnerspezifisch)	0,53 kg P/(E•a)
Erlöse für Endprodukt Aluminium-Phosphat	0,50 €/kg P _{recycelt}

Die in Einwohnerwerten ausgewiesene Anschlussgröße einer derartigen Rückgewinnungsanlage (auf Basis des einwohnerspezifischen P_{ges}) als Äquivalent zu einer Kläranlagengröße (auf Basis des einwohnerspezifischen BSB₅) zeigt, dass diese Anlagen die Aschen aus einem großen Einzugsgebiet sammeln und verarbeiten. Aus diesem Grund kommen nur zentrale Standorte zur Errichtung einer solchen Anlage in Betracht. Dies können sowohl sehr große Kläranlagen, zentrale Schlammbehandlungsanlagen oder Monoverbrennungsanlagen sein.

Die Auslegungsdaten und die daraus resultierende Anlagengröße sind dem Bild 3.1 zu entnehmen und bilden die Basis der Kostenermittlung.

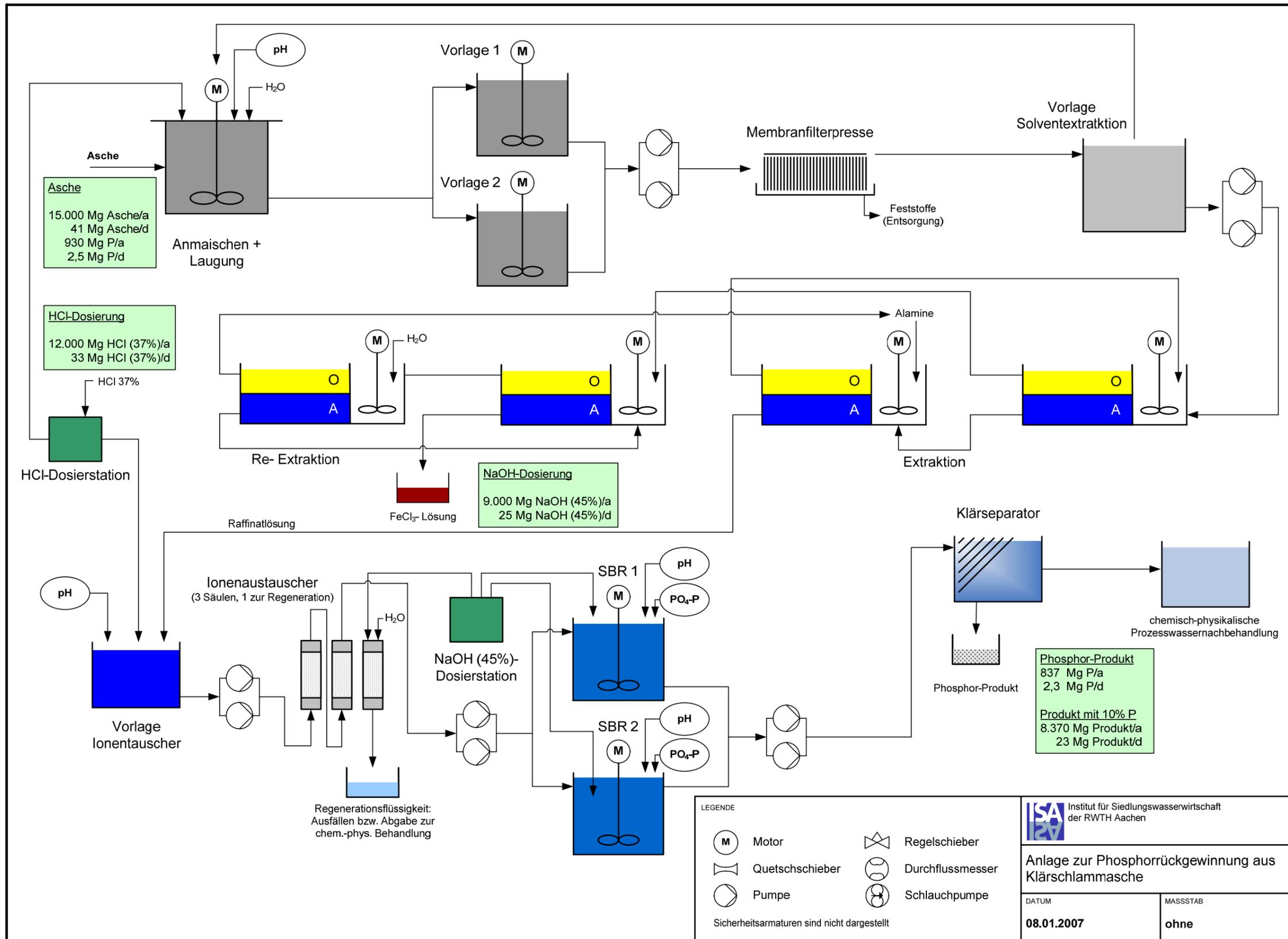


Bild 3.1: Fließbild der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

3.2 Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten

Die Kostenabschätzung enthält alle Investitions- und Betriebskosten, die mit dem Rückgewinnungsprozess in direkter Verbindung stehen (Bild 3.2). Daher sind die Kosten für den Klärschlammtransport zur Monoverbrennung sowie die Kosten für die Monoverbrennung selbst nicht in den Kostenansätzen enthalten.

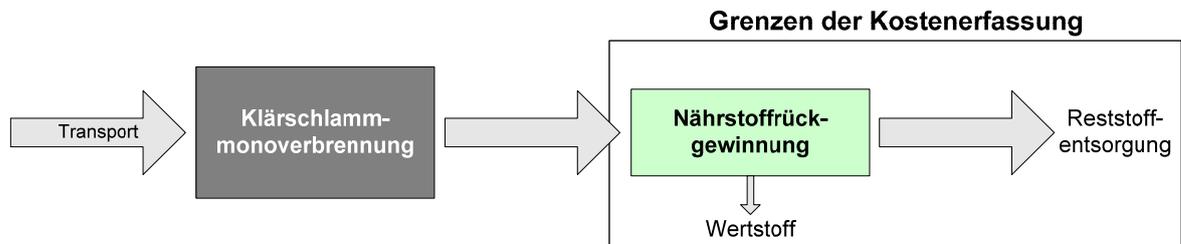


Bild 3.2: Grenzen der Kostenerfassung bei Betrachtung der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

3.2.1 Ermittlung der Investitionskosten

Bei der Ermittlung der Investitionskosten wurde davon ausgegangen, dass eine Anlage zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen in Verbindung mit einer Monoklärschlammverbrennungsanlage mit einer Kapazität von 15.000 Mg Asche pro Jahr oder sehr großen Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von mehr als 500.000 E installiert wird. Die entsprechenden Anlagenteile, Hinweise zu Auslegungen und Ausgestaltung sind der Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Tabelle 3.2: Zusammenstellung der Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus Klärschlammaschen von Monoverbrennungsanlagen

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Anzahl	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
Bautechnik				
GEBÄUDE				
	Gebäude inkl. Fundamente	4.000 m ³	350	1.400.000
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf Bautechnik gesamt (z. B. Baustelleneinrichtung, etc.)	20 %		.280.000
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	10 % der Kosten der Bautechnik	10 %		168.000
Teilsomme Bautechnik				1.848.000

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Anzahl	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
Maschinentechnik				
FÖRDEREINRICHTUNGEN				
	Schneckenförderer, Länge 10 m, Kapazität 2000 kg/h, inkl. Vorlagetrichter	1 St.	30.000	30.000
	Dosierung Asche, Kapazität 2000 kg/h, inkl. Schieber, Dosiermat mit Rührwerk, Förderschnecke	1 St.	8.000	8.000
ANMAISCH- UND LAUGUNGSBEHÄLTER				
	Mischbehälter PE-HD, 10 m ³ , geschlossen, Aufenthaltszeit 60 min	1 St.	10.000	10.000
	Mischer zur Umwälzung von 10 m ³	1 St.	15.000	15.000
DOSIERUNG HCL				
	Dosierung HCl - 37 % in Misch- und Laugungsbehälter und in Vorlage Ionenaustauscher, Dosierstation mit Pumpen, Rohrleitungen und Behälter für HCl	1 St.	40.000	40.000
VORLAGE 1 + 2				
	Behälter PE-HD, V = 10 m ³	2 St.	10.000	20.000
	Mischer zur Umwälzung von 10 m ³	2 St.	15.000	30.000
	Pumpe mit Förderleistung 10 m ³ /h	2 St.	2.000	4.000
MEMBRANFILTERPRESSE				
	Membranfilterpresse, 1 Aggregat inkl. Pumpen	1 St.	1.200.000	1.200.000
	Förderbänder und Umgebung der Presse	1 St.	10.000	10.000
VORLAGE SOLVENTEXTRAKTION				
	Behälter PE-HD mit V = 6 m ³	1 St.	6.000	6.000
	Pumpe mit Förderleistung 5 m ³ /h	2 St.	1.000	2.000
EXTRAKTION UND RE-EXTRAKTION				
	Mixer-Settler-Einheiten inkl. Anlagenperipherie	1 St.	1.300.000	1.300.000
	Zwischenspeicher FeCl ₃ -Lösung mit V = 50 m ³ , Behälter inkl. Peripherie	2 St.	40.000	80.000
VORLAGE IONENAUSTAUSCHER				
	Behälter PE-HD mit V = 6 m ³	1 St.	6.000	6.000
	Pumpen mit einer Förderleistung 5 m ³ /h	2 St.	1.000	2.000
IONENAUSTAUSCHER				
	Ionenaustauscher inkl. Anlagenperipherie, Austauschharz Amberjet 4200 Cl	1 St.	400.000	400.000
DOSIERUNG NATRONLAUGE				
	Dosierung NaOH - 45 % für Ionenaustauscher und P-Fällung; Dosierstation mit Pumpen, Rohrleitungen und Behälter für NaOH	1 St.	40.000	40.000

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Anzahl	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
P-FÄLLUNG (SBR)				
	Behälter PE-HD mit V = 6 m ³	2 St.	6.000	12.000
	Mischer zur Umwälzung von 6 m ³	2 St.	15.000	30.000
	Pumpe mit einer Förderleistung 5 m ³ /h	2 St.	1.000	2.000
KLÄRSEPARATOR				
	Klärschlammseparator: Durchsatz bis 9 m ³ /h	1 St.	150.000	150.000
BEHÄLTER P-PRODUKT UND ABWASSER				
	Zwischenspeicherung, P-Produkt V = 200 m ³	1 St.	80.000	80.000
	Zwischenspeicherung, Abwasser V = 200 m ³	1 St.	50.000	50.000
RESTSTOFFENTSORGUNG				
	10 m ³ -Behälter PEHD (Vorlage/Speicherung)	3 St.	10.000	30.000
	Anlagenperipherie Fördertechnik, Armaturen usw. sowie Behälter für Flockung, Lamellenklärer und Dosieranlage		pauschal	10.000
	Filterpresse		pauschal	400.000
ALLGEMEINES				
	Rohrleitungen und Armaturen für die gesamte Anlage		pauschal	100.000
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf M-Technik gesamt	20 %		813.400
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	Anteilig der Kosten der Maschinenteknik	10 %		488.040
Teilsumme Maschinenteknik				5.368.440
EMSR-Technik				
EMSR-TECHNIK				
	Ausrüstung der gesamten Anlage anteilig der Kosten Bau- und Maschinenteknik	40 %		2.886.576
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf EMSR- Technik ges.	20 %		577.315
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	Anteilig der EMSR-Gesamtkosten	10 %		346.389
Teilsumme EMSR-Technik				3.810.280

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Anzahl	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
Zusammenstellung der Investitionskosten				
Teilsumme Bautechnik				1.848.000
Teilsumme Maschinenteknik				5.368.440
Teilsumme EMSR-Technik				3.810.280
Summe der Investitionskosten				11.026.720

3.2.2 Ermittlung der Betriebs- und Jahreskosten

Auf Basis der Investitionskosten aus der Tabelle 3.2 können die Kapitalkosten ermittelt werden (siehe Tabelle 3.3). Die Betriebskosten ergeben sich nach Tabelle 3.3. Durch Summierung der Kapital und Betriebskosten erhält man die Jahreskosten.

Tabelle 3.3: Zusammenstellung der Jahreskosten (Summe aus Kapital- und Betriebskosten) für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorreycling aus der Klärschlammasche von Monoverbrennungsanlagen

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Anzahl	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€a]
Betriebskosten				
	Natronlauge (NaOH 45 %) (Ansatz: 570 l/h (SBR-Fällung) + 19 l/h (Ionenaustauscher) = 5.160 m³/a)	9.000 Mg	200	1.800.000
	Salzsäure (HCl 37 %) (Ansatz: 1.140 l/h (Mischbehälter) = 9.986 m³/a)	12.000 Mg	100	1.200.000
	Wasser		pauschal	2.000
	Strom		pauschal	25.000
	Entsorgung der Restprodukte; Einleitung Kanalsystem (Ansatz 6,5 m³/h (Filter) + 1 m³/h (Ionenaust.) + 1,2 m³/h (Klärsch.) = 70.000 m³/a)	70.000 m³	5	350.000
	Personalkosten	2 PJ	45.000	90.000
	Instandhaltung pauschaler Ansatz der Investitionskosten	1,25 %		137.834
Summe der Betriebskosten				3.604.834
Kapitalkosten				
Zinssatz		5 %		
Bautechnik	Nutzungszeitraum in Jahren	30 a		114.491
Maschinenteknik	Nutzungszeitraum in Jahren	10 a		662.131
EMSR-Technik	Nutzungszeitraum in Jahren	10 a		469.951
Summe der Kapitalkosten				1.246.573

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Anzahl	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€a]
Jahreskosten				
	Betriebskosten			3.604.834
	Kapitalkosten			1.246.573
Summe der Jahreskosten				4.851.407
Spezifische Kosten				
einwohnerspezifische Kosten				3,08 €(E•a)
produktspezifische Kosten				5,80 €/kg P_{eli.}

Unter Berücksichtigung der maximal rückgewinnbaren Phosphorfracht bzw. der an die Anlage angeschlossenen Einwohnerwerte können die spezifischen Kosten angegeben werden zu **5,80 €/kg P_{eli.}** bzw. **3,08 €(E•a)** (siehe Tabelle 3.3). Da diese Technik großtechnisch noch nicht umgesetzt wurde, werden erhebliche Optimierungspotentiale im Bereich Anlagentechnik und Betrieb gesehen. Die Optimierung der erforderlichen Reaktoren und Betriebsmittelzugabe kann Einsparungen in einer Höhe von 10 - 20 % der spezifischen Kosten betragen.

Den Kosten aus Tabelle 3.3 stehen Erlöse durch den Verkauf des P-Produktes gegenüber, die gemäß der Daten aus Tabelle 3.1 wie folgt ermittelt werden:

Tabelle 3.4: Erlöse (netto) aus dem Verkauf eines Phosphor-Recyclingproduktes aus Klärschlammasche

Bezeichnung	Spezifikation	Spez. Preis	Erlös
	Einwohnerwert 1,5 Mio. E		
	P-Potential 837 Mg P/a		
Jahreserlös	Produkt Aluminium-Phosphat	0,5 €/kg P	418.500 €/a
Summe der Erlöse			418.500 €a
Einwohnerspezifische Erlöse			0,27 €(E•a)

Die Zahlen verdeutlichen, dass eine Kostendeckung durch den Verkauf eines P-Produktes nicht gegeben ist. Die Erlöse liegen deutlich unter den Kapitalkosten.

4 Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung

4.1 Auslegungsdaten und Erläuterungen der Verfahrenstechnik der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung

Beispielhaft wird für das PRISA-Verfahren eine Kostenermittlung durchgeführt. Die zur Bemessung relevanten Parameter sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Annahmen zur Bemessung einer PRISA-Anlage

Parameter	Annahmen
Anschlussgröße Kläranlage	100.000 E
Zulauf P (einwohnerspezifisch)	1,8 g P/(E•d)
Wirkungsgrad MAP Fällung	90 %
Rückgewinnungspotential	40 %
Menge P_{recycelt}	23.652 kg P/a
Menge P_{recycelt} (einwohnerspezifisch)	0,21 kg P/(E•a)
Erlöse für Endprodukt Magnesium-Ammonium-Phosphat	1 €/kg P_{recycelt}

Die Auslegungsdaten und die daraus resultierende Anlagengröße sind dem Bild 4.1 zu entnehmen und bilden die Basis der Kostenermittlung.

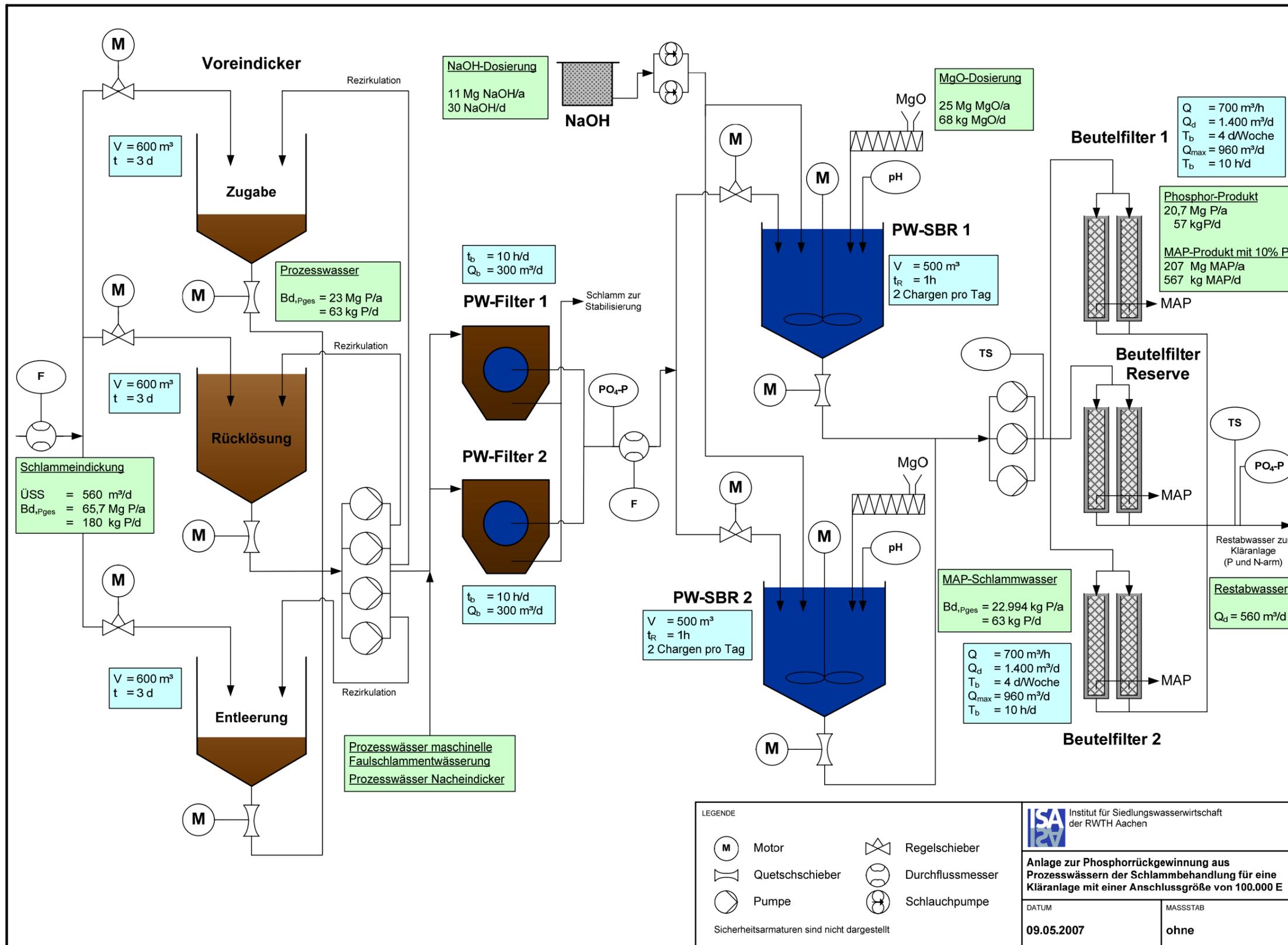


Bild 4.1: Fließbild der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus Prozesswässern der Schlammbehandlung

4.2 Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten

Die Kostenabschätzung enthält alle Investitions- und Betriebskosten, die mit dem Prozess in direkter Verbindung stehen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Szenarien untersucht. Für Szenario 1 wird bei der Erfassung der Investitions- und Betriebskosten von einem vollständigen Neubau der Anlage ausgegangen (Bild 4.1). Die Grenzen der Kostenerfassung sind in Bild 4.2 dargestellt.

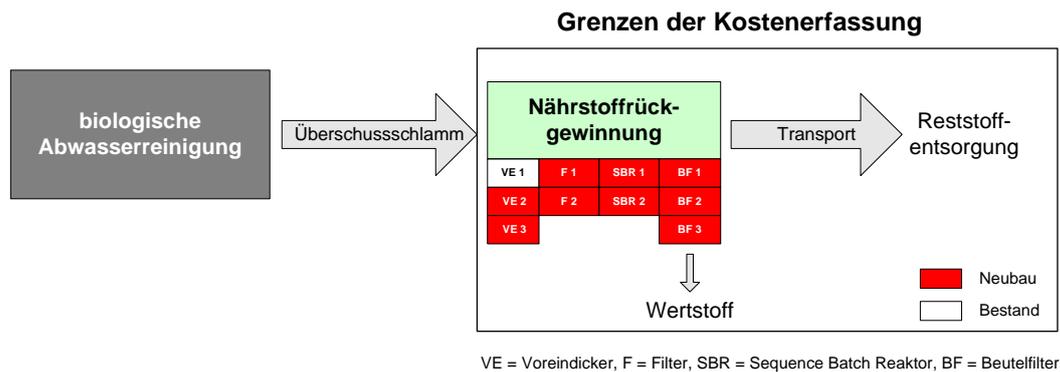


Bild 4.2: Grenzen der Kostenerfassung bei Betrachtung eines Neubaus der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung (Szenario 1)

In Szenario 2 wird die Annahme getroffen, dass auf der Kläranlage vorhandene Anlagen wie ein entsprechender zusätzlicher Eindicker und Prozesswasserspeicher in das fahrendskonzept integriert werden können. Für diesen Fall wird eine weitere Kostenerfassung durchgeführt, deren Grenzen in Bild 4.3 dargestellt werden.

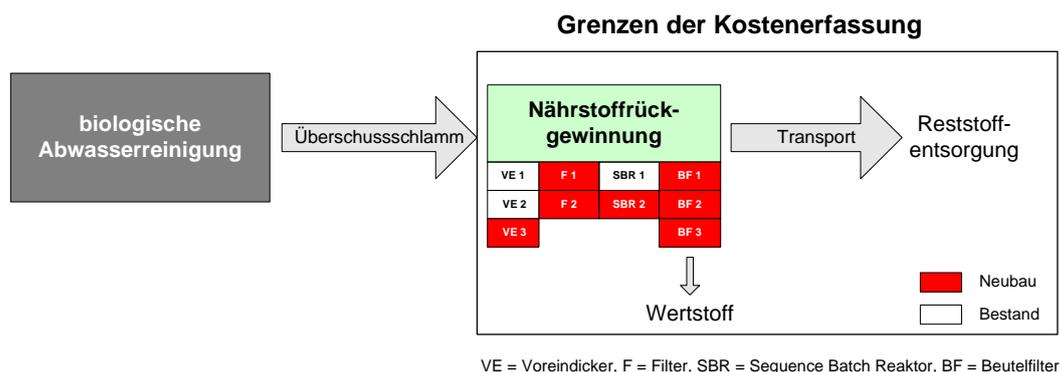


Bild 4.3: Grenzen der Kostenerfassung bei der Integration bereits vorhandener Anlagenteile in die Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung (Szenario 2)

4.2.1 Ermittlung der Investitionskosten

Bei der Ermittlung der Investitionskosten wurde davon ausgegangen, dass keinerlei Anlagenressourcen auf einer Kläranlage vorhanden sind, um derartige Technologien zu implementieren. Die entsprechenden Anlagenteile, Hinweise zu Auslegungen und Ausgestaltung sind der Tabelle 4.2 zu entnehmen. Die Investitionssummen werden von den erforderlichen Volumina zur Schlammeindickung und Prozesswasserspeicherung dominiert.

Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung (Szenario 1)

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
Bautechnik				
VOREINDICKER				
	Neubau von 2 Voreindickern mit einem $V_{\text{ges}} = 1.200 \text{ m}^3$ (600m ³ je VE)	1.200 m ³	240	288.000
PROZESSWASSERSPEICHER, KOAGULATION, REIFEBEHÄLTER				
	Neubau von 2 Behälter mit je $V = 500 \text{ m}^3$; zur Koagulation ($t_R = 0,5 \text{ h}$) und Kristallisation ($t_R = 0,5 \text{ h}$). Die Behälter sind so bemessen, dass je Behälter 2 Chargen pro Tag abefahren werden können; innen beschichtet und abgedeckt	1.000 m ³	255	255.000
PUMPSTATION				
	Maschinenhaus ausgeführt als isolierte Stahlhalle für folgende Anlagenteile: Pumpenvorlage Feststofffilter	20 m ³		
	Umwälzpumpwerk Voreindicker	20 m ²		
	Prozesswasserpumpwerk Voreindicker zum Prozesswasserfilter	20 m ²		
	Feststofffilter (ausgeführt als Tuchfilter 2straßig)	40 m ²		
	Pumpwerk vom Prozesswasser-SBR zur MAP-Separation	15 m ²		
	MAP-Separation mittels Beutelfilter	60 m ²		
	EMSR-Raum	50 m ²		
	erforderliche Gesamtfläche	205 m ²	800	164.000
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf Bautechnik gesamt	10 %		70.700
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	Anteilig der Kosten der Bautechnik	10 %		77.770
Teilsomme Bautechnik				855.470

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
Maschinentechnik				
VOREINDICKER				
	Krählwerk mit Motor und Bodenräumung für Voreindicker, Durchmesser 10 m	2 St.	15.000	30.000
	Umwälzpumpwerk für Voreindicker/ Excenterschneckenpumpen/Drehkolbenpumpen	3 St.	15.000	45.000
	Umwälz- u. Rohrleitungen vom Voreindicker zum Prozesswasserfilter	1 St.	15.000	15.000
	Pumpwerk vom Voreindicker zum Prozesswasserfilter ausgeführt als Excenter-schneckenpumpe/ Drehkolbenpumpe	2 St.	15.000	30.000
	Rohrleitungen und Armaturen vom Prozesswasserfilter zum Prozesswasser-SBR	1 St.	25.000	25.000
FESTSTOFFABTRENNUNG PROZESSWASSER				
	Feststofffilter (Tuchfilter) zur Abtrennung der Feststoffe im Trübwasser	2 St.	75.000	150.000
PROZESSWASSERSPEICHER, KOAGULATION, REIFEBEHÄLTER				
	Rührwerke zur Umwälzung, FU geregelt, je Becken 2 Stück	2 St.	26.000	52.000
	Pumpwerk Prozesswasser-SBR zur MAP-Eindickung ausgeführt als Excenterschneckenpumpen/Drehkolbenpumpen	2 St.	7.500	15.000
	Rohrleitungen und Armaturen vom Prozesswasser-SBR zur MAP-Eindickung	1 St.	30.000	30.000
	Dosierung Natronlauge Pumpen und Rohrleitungen, Lagerbehälter	1 St.	30.000	30.000
	Dosieranlage Magnesiumoxid Dosierschnecken, Rohrleitungen, Lagerbehälter	2 St.	15.000	30.000
MAP-SEPARATION				
	MAP -Separation mittels Beutelfilteranlage 3strahlig (4 Filter zzgl. 2 Reserve)	6 St.	2.500	15.000
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf Maschinentechnik gesamt	10 %		46.700
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	Anteilig der Kosten der Maschinentechnik	10 %		51.370
Teilsomme Maschinentechnik				565.070

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
EMSR-Technik				
EMSR-TECHNIK				
	Teilweise sind in der Maschinenteknik (M) die EMSR- Kosten (E) enthalten; zusätzlich wird ein Anteil der Herstellkosten (HK) berücksichtigt (HK=E+B+M; B = Baukosten und M+B entspricht ca. 80 % der HK)	10 %		177.568
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf EMSR-Technik gesamt	10 %		17.757
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	Anteilig der Kosten der EMSR-Technik	10 %		19.532
Teilsomme EMSR-Technik				214.857
Zusammenstellung der Investitionskosten				
Bautechnik				855.470
Maschinenteknik				565.070
EMSR-Technik				214.857
Summe der Investitionskosten				1.635.397

Sind auf einer Kläranlage entsprechende freie und nutzbare Beckenvolumina vorhanden, können die Investitionskosten deutlich gesenkt und somit die Jahreskosten erheblich reduziert werden. Hierzu wurden für die Kostenermittlung folgende Annahmen bezüglich der Anlagentechnik getroffen (Szenario 2):

- Auf der Kläranlage steht ein Eindickvolumen zur Verfügung, dass eine Aufenthaltszeit von 2 Tagen sicherstellt (⇒ Wegfall der Baukosten und der Kosten für das Krählwerk)
 - ⇒ Hierdurch reduziert sich das neu zu errichtende Volumen von 1.200 m³ auf 600 m³.
- Auf der Kläranlage ist ein Prozesswasserspeicher vorhanden, der als Koagulation und Reifebehälter genutzt werden kann (⇒ Wegfall der Baukosten und der Kosten für das Rührwerk)
 - ⇒ Hierdurch reduziert sich das neu zu errichtende Beckenvolumen von 1.000 m³ auf 500 m³.

Auf Basis dieses Anlagenkonzeptes ergeben sich die in Tabelle 4.3 aufgeführten Investitionskosten.

Tabelle 4.3: Zusammenstellung der Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung bei Integration vorhandener Anlagenteile in den Prozess (Szenario 2)

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
Zusammenstellung der Investitionskosten				
Bautechnik				526.955
Maschinenteknik				515.460
EMSR-Technik				157.6657
Summe der Investitionskosten				1.200.080

4.2.2 Ermittlung der Betriebs- und Jahreskosten

Auf Basis der Investitionskosten aus der Tabelle 4.2 können die Kapitalkosten für den Fall eines Neubaus der Anlage ermittelt werden (siehe Tabelle 4.4). Die Betriebskosten ergeben sich nach Tabelle 4.4. Durch Summierung der Kapital und Betriebskosten erhält man die Jahreskosten.

Tabelle 4.4: Zusammenstellung der Jahreskosten (Summe aus Kapital- und Betriebskosten) für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung (Szenario 1)

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€a]
Betriebskosten				
	Natronlauge	11 Mg	200	2.200
	Magnesiumoxid	25 Mg	350	8.750
	Beutelfilter: je Monat 1 Satz pro Filter => 72 Stück pro Jahr	72 St.	40	2.880
	Ersatztücher, Stromverbrauch, Wartung (Angabe nach MECANA)	1 St.	2.600	2.600
	Wasser		pauschal	2.000
	Strom		pauschal	4.000
	Personalkosten	0,5 PJ	45.000	22.500
	Instandhaltung pauschaler Ansatz der Investitionskosten	1,25 %		20.442
Summe der Betriebskosten				65.372

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€a]
Kapitalkosten				
Zinssatz		5 %		
Bautechnik	Nutzungszeitraum in Jahren	30 a		52.999
Maschinentec hnik	Nutzungszeitraum in Jahren	10 a		69.694
EMSR-Technik	Nutzungszeitraum in Jahren	10 a		26.500
Summe der Kapitalkosten				149.193
Jahreskosten				
	Betriebskosten			65.372
	Kapitalkosten			149.193
Summe der Jahreskosten				241.565
Spezifische Kosten				
einwohnerspezifische Kosten				2,15 €(E•a)
produktspezifische Kosten				9,07 €/kg P_{eli.}

Unter Berücksichtigung der maximal rückgewinnbaren Phosphatfracht (siehe Tabelle 4.1) bzw. der an die Anlage angeschlossenen Einwohnerwerte können die spezifischen Kosten angegeben werden zu **9,07 €/kg P_{eli.}** bzw. **2,15 €(E•a)**. Diese spezifischen Kosten sind wesentlich nur durch eine Reduzierung der Kapitalkosten zu senken. Dies verdeutlicht die nachfolgende Beispielrechnung für Szenario 2 (Tabelle 4.5)

Tabelle 4.5: Zusammenstellung der Jahreskosten (Summe aus Kapital- und Betriebskosten) für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Prozesswasser der Schlammbehandlung bei Integration vorhandener Anlagenteile in den Prozess (Szenario 2)

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€a]
Kapitalkosten				
Zinssatz		5 %		
Bautechnik	Nutzungszeitraum in Jahren	30 a		32.647
Maschinentec hnik	Nutzungszeitraum in Jahren	10 a		63.576
EMSR-Technik	Nutzungszeitraum in Jahren	10 a		19.446
Summe der Kapitalkosten				115.669
Jahreskosten				
	Betriebskosten			65.372
	Kapitalkosten			149.193
Summe der Jahreskosten				181.041

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€a]
Spezifische Kosten				
einwohnerspezifische Kosten				1,81 €(E•a)
produktspezifische Kosten				7,65 €/kg P_{eli.}

Bei einem vorhandenen Eindickvolumen für eine Aufenthaltszeit von 2 Tagen und einem vorhandenen Tagesspeicher für die Prozesswässer, der für die Koagulation und Kristallisation genutzt werden kann, reduzieren sich die produktspezifischen Kosten auf **7,65 €/kg P_{eli.}** bzw. **1,81 €(E•a)**. Die Kapitalkosten werden hierbei deutlich gesenkt, die Betriebskosten bleiben gleich. Sie haben bei einer Betriebsoptimierung nur noch einen geringen Einfluss auf die Produktkosten.

Diesen Kosten stehen Erlöse durch den Verkauf des P-Produktes gegenüber, die gemäß der Daten aus Tabelle 4.1 wie folgt ermittelt werden:

Tabelle 4.6: Erlöse (netto) aus dem Verkauf eines Phosphor-Recyclingproduktes aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung

Bezeichnung	Spezifikation	Spez. Preis	Erlös
	Einwohnerwert 100.000 E		
	P-Potential 20,7 Mg P/a		
Jahreserlös	Produkt Magnesium-Ammonium-Phosphat	1 €/kg P	20.695 €/a
Summe der Erlöse			20.695 €/a
Einwohnerspezifische Erlöse			0,21 €(E•a)

Die Zahlen verdeutlichen, dass eine Kostensenkung durch den Verkauf eines P-Produktes nicht signifikant ist.

5 Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom mittels Nachfällung

5.1 Auslegungsdaten und Erläuterungen der Verfahrenstechnik der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom mittels Nachfällung

Beispielhaft wird für das Verfahren der Nachfällung im Abwasserstrom zum Phosphorrecycling (vgl. Forschungsvorhaben „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Machbarkeit in NRW und Untersuchungen zu zentralen und dezentralen Verfahren“ (AZ IV-9-042420)) eine Kostenermittlung durchgeführt. Die zur Bemessung relevanten Parameter sind in der Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Tabelle 5.1: Annahmen zur Bemessung einer Phosphorrecyclinganlage als Nachfällung

Annahmen	
Anschlussgröße Kläranlage	100.000 E
Zulauf P (einwohnerspezifisch)	1,8 g P/(E•d)
Wirkungsgrad MP Fällung	90 %
Rückgewinnungspotential	45 %
Menge P _{recycelt}	26.608,50 kg P/a
Menge P _{recycelt} (einwohnerspezifisch)	0,27 kg P/(E•a)
Erlöse für Endprodukt Magnesium-Phosphat	1 €/kg P _{recycelt}

Die Auslegungsdaten und die daraus resultierende Anlagengröße sind dem Bild 3.1 zu entnehmen und bilden die Basis der Kostenermittlung.

5.2 Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten

Die Kostenabschätzung umfasst alle erforderlichen technischen Einrichtungen und Betriebskosten einer Nachfällung, die der Nachklärung nachgeschaltet wird. In Bild 5.2 sind die Grenzen der Kostenerfassung dargestellt.

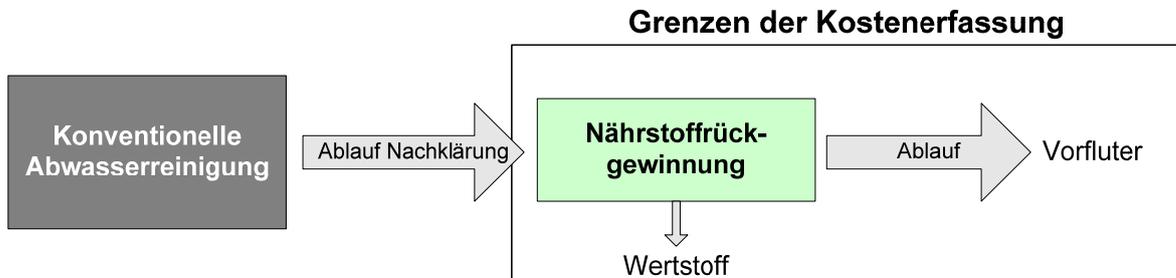


Bild 5.2: Grenzen der Kostenerfassung bei Betrachtung der Anlage zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom mittels Nachfällung

5.2.1 Ermittlung der Investitionskosten

Bei der Ermittlung der Investitionskosten wurde davon ausgegangen, dass keinerlei Anlagenressourcen auf einer Kläranlage vorhanden sind, um derartige Technologien zu implementieren. Die entsprechenden Anlagenteile, Hinweise zu Auslegungen und Ausgestaltung sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der Investitionskosten für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Abwasser mittels Nachfällung

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
Bautechnik				
PUMPENVORLAGE				
	Betonschacht für 3 Pumpen	250 m ³	200	50.000
KRISTALLISATOREN				
	3 Betonbecken rund mit Trichterspitze oberirdisch je Becken $V_{WSP}=1.237 \text{ m}^3$, $H_w = 7 \text{ m}$, $D= 15 \text{ m}$, $V_{ges} 1.767\text{m}^3$, $V = 5.301 \text{ m}^3$ Aufenthaltszeit $t_R=1 \text{ h}$	5.301 m ³	230	1.219.230
MASCHINENHAUS (isolierte Stahlhalle)				
	isolierte Stahlhalle zur Unterbringung der maschinentechnischen Einrichtungen	250 m ²	800	200.000

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
MAP-Abscheide-Becken				
	ausgebildet als Vorklärbecken mit einer Aufenthaltszeit von $t_R = 0,5$ h, $V_{ges} = 625$ m ³ , L = 40 m, T = 2,5 m, B = 6,5 m	625 m ³	265	165.625
REAKTORBECKEN FÜR pH-WERT ANHEBUNG				
	Betonbecken mit Mischer	40 m ³	200	8.000
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf Bautechnik gesamt	10 %		164.286
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	Anteilig der Kosten der Bautechnik	10 %		180.714
Teilsomme Bautechnik				1.987.855
Maschinentechnik				
KRISTALLISATOREN				
	Rührwerke	3 St.	20.000	60.000
	Elektroschieber Zulauf DN 400	3 St.	7.000	21.000
	Quetschventile u. Absperrschieber DN 500	3 St.	9.000	27.000
	Pumpwerk vom Ablauf NKB zur Kristallisation	3 St.	35.000	105.000
	Rohrleitungen und Armaturen vom NKB zu den Kristallisatoren		pauschal	60.000
SÄURE- UND LAUGEANLAGEN				
	NaOH-Dosieranlage		pauschal	40.000
	Säureanlage		pauschal	40.000
	Mischer Säureanlage		pauschal	10.000
MAP-DOSIERANLAGE				
	Dosierung MgO	3 St.	15.000	45.000
ABSETZBECKEN				
	Kreuzstromlamellen im Absetzbecken	3.200 m ²	150	480.000
	Abzugspumpen als Schlauchpumpen	3 St.	3.500	10.500
	technische Ausrüstung Absetzbecken	625 m ³	109	68.125
MAP-SEPARATION				
	MAP Separation mittels Beutelfilteranlage	2 St.	5.000	10.000
	Rohrleitungen und Armaturen vom Absetzbecken zur Beutelfilteranlage		pauschal	60.000
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf Maschinentechnik gesamt	10 %		103.663

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	Einheitspreis [€/Einheit]	Gesamtpreis [€]
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	Anteilig der Kosten Maschinentchnik	10 %		114.029
Teilsumme Maschinentchnik				1.254.316
EMSR-Technik				
EMSR-TECHNIK				
	Teilweise sind in der Maschinentchnik (M) die EMSR- Kosten (E) enthalten; zusätzlich wird ein Anteil der Herstellkosten (HK) berücksichtigt (HK=E+B+M; B = Baukosten und M+B entspricht ca. 80 % der HK)	10 %		405.271
UNVORHERGESEHENES				
	Zuschlag für Allgemeines auf EMSR-Technik gesamt	10 %		40.527
ING. HONORARE UND NEBENKOSTEN				
	Anteilig der Kosten der EMSR-Technik	10 %		44.580
Teilsumme EMSR-Technik				490.378
Zusammenstellung der Investitionskosten				
Teilsumme Bautechnik				1.987.855
Teilsumme Maschinentchnik				1.254.316
Teilsumme EMSR-Technik				490.378
Summe der Investitionskosten				3.732.549

5.2.2 Ermittlung der Betriebs- und Jahreskosten

Auf Basis der Investitionskosten aus der Tabelle 5.2 können die Kapitalkosten ermittelt werden. Die Betriebskosten ergeben sich nach Tabelle 5.3., die Jahreskosten durch Summierung der Kapital- und Betriebskosten.

Tabelle 5.3: Zusammenstellung der Jahreskosten (Summe aus Kapital- und Betriebskosten) für die Errichtung einer Anlage zum Phosphorrecycling aus dem Abwasser mittels Nachfällung

Bezeichnung	Spezifikation, Beschreibung	Menge	E-Preis [€/Einheit]	G-Preis [€/a]
Betriebskosten				
	Natronlauge	320 Mg	200	64.000
	Magnesiumoxid	65 Mg	350	22.750
	Beutelfilter: je Monat 1 Satz pro Filter => 120 Stück pro Jahr	120 St.	40	4.800
	Säure	12 Mg	80	960
	Betriebsstoffe Wasser, Öl		pauschal	1.000
	Strom		pauschal	40.000
	Personalkosten	0,75 PJ	45.000	33.750
	Instandhaltung pauschaler Ansatz der Investitionskosten	1,25 %		46.657
Summe der Betriebskosten				213.917
Kapitalkosten				
Zinssatz		5 %		
Bautechnik	Nutzungszeitraum in Jahren	30 a		123.155
Maschinenteknik	Nutzungszeitraum in Jahren	10 a		154.704
EMSR-Technik	Nutzungszeitraum in Jahren	10 a		60.482
Summe der Kapitalkosten				338.342
Jahreskosten				
	Betriebskosten			213.917
	Abschreibung			338.342
Summe der Jahreskosten				552.259
Spezifische Kosten				
einwohnerspezifische Kosten				5,52 €/E•a
produktspezifische Kosten				20,75 €/kg P_{eli}

Unter Berücksichtigung der maximal rückgewinnbaren Phosphatfracht (siehe Tabelle 5.1) bzw. der an die Anlage angeschlossenen Einwohnerwerte können die spezifischen Kosten angegeben werden zu **20,75 €/kg P_{eli}** bzw. **5,52 €/E•a**. Da bei dieser Technik Anlagenressourcen im Bereich der Nachklärung eher unwahrscheinlich sind, werden zu dieser Technik Optimierungspotentiale nur im Anlagenbetrieb gesehen. Die Optimierung der erforderlichen Reaktoren und Betriebsmittelzugabe kann Einsparungen in einer Höhe von 5-15 % der spezifischen Kosten betragen.

Diesen Kosten stehen Erlöse durch den Verkauf des P-Produktes gegenüber, die gemäß der Daten aus Tabelle 5.1 wie folgt ermittelt werden:

Tabelle 5.4: Erlöse (netto) aus dem Verkauf eines Phosphor-Recyclingproduktes aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung

Bezeichnung	Spezifikation	Spez. Preis	Erlös
	Einwohnerwert 100.000 E		
	P-Potential 26,6 Mg P/a		
Jahreserlös	Produkt Magnesium-Phosphat	1 €/kg P	26.608 €/a
Summe der Erlöse			20.608 €/a
Einwohnerspezifische Erlöse			0,27 €(E•a)

Die Zahlen verdeutlichen, dass eine Kostendeckung durch den Verkauf eines P-Produktes nicht vorhanden ist. Die Erlöse liegen deutlich unter den Kapitalkosten.

6 Zusammenfassende Bewertung der Jahreskosten der unterschiedlichen Verfahren

Die Kostenermittlungen für ein Phosphorreycling mittels der Verfahren PRISA und Nachfällung wurden für eine Kläranlagengröße von 100.000 E durchgeführt. Für die Rückgewinnung aus der Klärschlammasche von Monoklärschlammverbrennungsanlagen wurde ein Anschlussäquivalent von ca. 1,5 Mio. E ermittelt. Je nach Anschlussgröße einer Kläranlage schwanken diese Kosten, d. h. bei größeren Kläranlagen kann ein Recycling einwohnerspezifisch günstiger umgesetzt werden als bei einer kleineren Kläranlage. Insbesondere die Rückgewinnung aus Asche erfordert sehr große zentrale Anlagen. Im Gegensatz dazu kann das PRISA-Verfahren auch auf kleineren Kläranlagen eingesetzt werden. Die direkte Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom über eine Nachfällung erscheint nur für besondere Rahmenbedingungen wie z. B. große Beckenreserven im Bereich der Nachklärung wirtschaftlich.

In der Tabelle 6.1 sind die Kostendaten für eine Phosphorrückgewinnung für die im Forschungsvorhaben beschriebenen Verfahren sowie eine Nachfällung bei der Abwasserreinigung zusammengestellt. Sehr deutlich sind die erheblichen Unterschiede in den Investitionskosten zu erkennen. Das PRISA-Verfahren weist die geringsten absoluten Investitionskosten auf. Werden die einwohnerspezifischen Investitionssummen betrachtet, sind aufgrund des größeren Erfassungsgrades bei der Rückgewinnung aus der Asche die geringsten und bei der Nachfällung die höchsten Kosten fest zu stellen.

Die Rückgewinnung aus der Asche stellt produktspezifisch mit 5,30 €/kg P_{recycelt} Netto-Jahreskosten das günstigste Verfahren dar. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Schlammentsorgung durch eine Entsorgung in Monoverbrennungsanlagen gegenüber einer Mitverbrennung erheblich teurer wird. Die Kosten für eine Verbrennung von Klärschlamm in einer Monoverbrennung betragen 190 bis 870 €/Mg, wohingegen die Kosten einer Mitverbrennung mit 190 – 270 €/Mg (EON, 2006) meistens geringer sind.

Die produktspezifischen Netto-Jahreskosten 8,07 bzw. 6,65 €/kg P_{recycelt} für das PRISA-Verfahren liegen um einen Faktor von ca. 1,5 bzw. 1,25 über den Produktkosten eines Recyclings aus Klärschlammasche, je nach Verfügbarkeit von nutzbarem Beckenvolumen.

Die höchsten produktbezogenen Netto-Jahreskosten mit 19,75 €/kg P_{recycelt} wurden für die Nachfällung ermittelt. Dies ist auf die geringe Rückgewinnungsrate und die hohen Investitionskosten zurückzuführen.

Die einwohnerspezifischen Jahres-Nettokosten (inkl. Erlöse) sind aufgrund der geringen Investitions- und Betriebskosten beim PRISA-Verfahren am geringsten (1,57 bis 1,91 €/(E•a)). Bei der Nachfällung, die einen ähnlich hohen Rückgewinnungsgrad aufweist wie das PRISA-Verfahren sind diese Kosten mit 5,26 €/(E•a) am höchsten.

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Kostendaten für ein Phosphorreycling aus den Stoffströmen Asche, Prozesswasser der Schlammbehandlung und Abwasser

	Einheit	Klärschlamm- asche	Prozesswasser (PRISA) vollständiger Anlagenneubau	Prozesswasser (PRISA) Nutzung von vorh. Becken (50%)	Abwasser (Nachfällung)
absolute Kosten					
Investitionskosten	€	11.026.720	1.635.397	1.200.080	3.732.549
Kapitalkosten	€/a	1.246.573	149.194	115.669	338.342
Betriebskosten	€/a	3.604.834	65.372	65.372	213.917
Brutto-Jahreskosten	€/a	4.851.407	214.566	181.041	552.259
Erlöse	€/a	- 418.500	- 23.652	- 23.652	- 26.609
Netto-Jahreskosten	€/a	4.432.907	190.914	157.389	525.650
spezifische Kosten					
Investitionskosten	€/kg P _{recycelt}	13,17	69,14	50,74	140,28
Kapitalkosten	€/kg P _{recycelt}	1,49	6,31	4,89	12,72
	€/(E•a)	0,79	1,49	1,16	3,38
Betriebskosten	€/kg P _{recycelt}	4,31	2,76	2,76	8,04
	€/(E•a)	2,29	0,65	0,65	2,14
Brutto-Jahreskosten	€/(kg P _{recycelt} •a)	5,80	9,07	7,65	20,75
	€/(E•a)	3,08	2,15	1,81	5,52
Erlöse	€/kg P _{recycelt}	-0,50	-1,00	-1,00	-1,00
	€/(E•a)	-0,27	-0,24	-0,24	-0,27
Netto-Jahreskosten	€/kg P _{recycelt}	5,30	8,07	6,65	19,75
	€/(E•a)	2,82	1,91	1,57	5,26
Anmerkungen					
Endprodukt		AI-P	MAP	MAP	MP
Erlös	€/kg P _{recycelt}	0,5	1	1	1
recyclbare P-Fracht	kg P/a	837.000	23.652	23.652	26.609
Einwohnerwerte	E	1.573.000	100.000	100.000	100.000

Diese Kostenbetrachtungen zeigen, dass mit Umsetzung des PRISA-Verfahrens eine Phosphorrückgewinnung zu Nettokosten von < 2,00 €/E•a umgesetzt werden kann. Für die Rückgewinnung aus der Asche ist aufgrund fehlender Erfahrungen aus dem Anlagenbau und Betrieb derartiger Anlagen noch mit ca. 3,00 €/E•a zu rechnen. Aufgrund vorhandener Optimierungspotentiale können hier noch Kostensenkungen erwartet werden.

7 Ausblick und Empfehlungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Machbarkeit in NRW und Untersuchungen zu zentralen und dezentralen Verfahren“ (AZ IV-9-042420) wurden drei Szenarien zur Umsetzung eines Phosphorrecyclings für Nordrhein-Westfalen erarbeitet. Auf Basis dieses Abschlussberichtes wurden eine Ermittlung der Phosphorrecyclingpotentiale und der damit verbundenen Netto-Jahreskosten durchgeführt. Für NRW sind auf Basis der jährlichen Datenerhebung zum Stand der Abwasserbehandlung (Stand 2005) folgende Ausbaugrade in Abhängigkeit der Kläranlagengrößen festzustellen:

- Gesamtausbaugröße aller kommunalen Kläranlagen in NRW: 35.611.178 E
- Kläranlagen mit einer Ausbaugröße > 20.000 E: 32.928.612 E (ca. 32,9 Mio. E)
- Kläranlagen mit einer Ausbaugröße zwischen 20.000 E und 100.000 E: 9.929.997 E (ca. 9,9 Mio. E)
- Kläranlagen mit einer Ausbaugröße > 100.000 E: 22.998.615 E (ca. 23 Mio. E)

Für die einzelnen Szenarien ergeben sich damit folgende Randbedingungen:

Szenario 1: Phosphor-Nachfällung mit Magnesium zur Phosphorrückgewinnung

Da dieses Verfahren sehr kostenintensiv ist, werden Anlagen mit einer Ausbaugröße von > 100.000 E berücksichtigt. Für NRW ergibt sich ein Erfassungsgrad von 65 %.

Szenario 2: PRISA-Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung.

Dieses Verfahren kann auf jeder Anlage mit anaerober Schlammbehandlung eingesetzt werden. Dies sind i.d.R. meist Anlagen > 20.000 E. Hieraus ergibt sich ein möglicher Erfassungsgrad für NRW von 92 %.

Szenario 3: Phosphorrückgewinnung aus den Klärschlammmaschen der Klärschlammmonoverbrennungsanlagen

Dieses sehr aufwendige und teure Verfahren ist in NRW begrenzt einsetzbar aufgrund der derzeitigen Kapazitäten der Monoverbrennungsanlagen. Bei einer maximalen Auslastung der Anlagen, kann der Klärschlamm von ca. 15,2 Mio. E verbrannt werden. Dies entspricht einem Erfassungsgrad für NRW von ca. 43 %.

In der Tabelle 7.1 sind für die erläuterten Szenarien die Randbedingungen eines Phosphorrecyclings aufgeführt und die entsprechenden Netto-Jahreskosten und Phosphorrückgewinnungspotentiale dargestellt. Für das PRISA-Verfahren wurden die spezifischen Jahres-Nettokosten von 1,91 €/(E•a) für einen Neubau ohne Nutzung vorhandener Beckenvolumina und von 1,57 €/(E•a) für einen Neubau mit Nutzung vorhandener Beckenvolumina zu 1,74 €/(E•a) gemittelt.

Tabelle 7.1: Netto-Jahreskosten und Phosphorrückgewinnungspotentiale unterschiedlicher Szenarien für NRW

	Einheit	Nach-fällung	PRISA	Elution von KS-Asche
Randbedingungen				
Kläranlagengröße	E	> 100.000	> 20.000	278.000
Angeschlossene Einwohnerwerte	Mio. E	23,0	32,9	15,2
Erfassungsgrad	%	65	92	43
spezifische Nettokosten (inkl. Erlöse)	€/(E•a)	5,26	1,74	2,82
Menge P _{recycelt} (einwohnerspezifisch)	kg P/(E•a)	0,27	0,24	0,53
Kosten und Potentiale				
Jahreskosten	Mio. €/a	121,0	57,3	42,7
Phosphorpotentiale	Mg P/a	6.120	7.788	8.066

Die Abschätzung der Kosten und Potentiale einer Phosphorrückgewinnung zeigen, dass für NRW eine Ausrüstung der bestehenden Monoverbrennungsanlagen die wirtschaftlichste Form eines Phosphorrecyclings darstellt. Der Einbau von Nachfällungsanlagen auf Kläranlagen mit einer Anschlussgröße > 100.000 E stellt keine wirtschaftliche Möglichkeit für ein Phosphorrecycling dar. Das PRISA-Verfahren ist deutlich kostengünstiger als die Nachfällung zu betreiben und weist des Weiteren ein noch höheres Rückgewinnungspotential auf.

8 Literatur

- BOHN, T. (1993): Wirtschaftlichkeit und Kostenplanung von kommunalen Abwasserreinigungsanlagen. In: DREES, G. (Hrsg.): Schriftenreihe des Institutes für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart. Band 34. ISBN 3-816-1033-5
- DPU (2006): Teilbericht über die Investitionskosten und Betriebskosten für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche, den Prozesswässern der Schlammbehandlung und dem Abwasser (Nachfällung)
- GÜNTHERT, F.W.; REICHERT, E. (2001): Investitionskosten der Abwasserentsorgung. Hrsg.: Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen. München: Oldenbourg Industrieverlag. ISBN 3-486-26507-5
- MUNLV (2006): Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen. Friedrich, H. und Mertsch, V. (Hrsg), ISBN: 3-9810063-5-6
- REICHERT, E, (2003): Untersuchung zu Kennzahlen als Grundlage für Kostenbetrachtungen in der Abwasserentsorgung. Hrsg.: Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen. München: Oldenbourg Industrieverlag, Heft 84. ISBN 3-486-26553-9
- WAGNER, W. (2001): Kosten von Abwasserreinigungsanlagen. In: WAGNER, W. (Hrsg.): Abwassertechnik und Gewässerschutz. Heidelberg: C.F. Müller Verlag, Kap. 13420, S. 1-47, Kap. 13520, S 1-37