



BMU –UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

Abschlussbericht

zum Vorhaben:

Kombinationsverfahren zur Rückgewinnung von Phosphor und Stickstoff bei gleichzeitiger Energieoptimierung der Kläranlage

NKa3 – 002067

Fördernehmer/-in:

Abwasserverband Braunschweig

Umweltbereich

(Abfallwirtschaft, Klimaschutz, Luftreinhaltung, Abwasser- und -entsorgung, Ressourceneffizienz, Energie, Lärmschutz, integrierter Umweltschutz)

Laufzeit des Vorhabens:

05.12.2013-31.12.2024 **Autorin/Ansprechpartnerin**

Frau Dr. Gromadecki
Abwasserverband Braunschweig

**Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz,
Naturschutz und nukleare Sicherheit**

Datum der Erstellung:

31. Mai 2025

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen UBA: 90 030/75	Vorhaben-Nr.:2067
Titel des Vorhabens: Kombinationsverfahren zur Rückgewinnung von Phosphor und Stickstoff bei gleichzeitiger Energieoptimierung der Kläranlage	
Autor(en); Name(n), Vorname(n) Dr. Gromadecki, Franziska, Hermanussen, Oliver, Meyer, Stefanie	Vorhabensbeginn: 05.12.2013
	Vorhabenende (Abschlussdatum): 31.12.2024
Fördernehmer/ -in (Name, Anschrift) Abwasserverband Braunschweig, Celler Straße 22, 38176 Wendeburg	Veröffentlichungsdatum:
	Seitenzahl: 85
Gefördert im Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit	
<p>Kurzfassung/Summary</p> <p>Resultierend aus der deutlichen Überlastung der Kläranlage Steinhof wurde ein innovatives Verfahrenskonzept entwickelt mit dem durch Prozesswasserbehandlung die Kläranlage entlastet wird und darüber hinaus ein geringerer Klärschlammanfall bei höhere Klärgasausbeute erzielt werden kann. Durch die erfolgreiche Umsetzung wird die Umwelt vor ungesteuerten Nährstoffeinträgen und unnötigen Transportwegen geschützt. Das Projekt zeichnet sich durch die innovative Verknüpfung der bekannten Verfahren Thermodruckhydrolyse, MAP-Fällung und Ammoniakstrippung in großtechnischem Maßstab aus. Durch die Nähe des Abwasserverbandes zur Landwirtschaft ist die Nutzung der zurückgewonnenen Nährstoffe auf direktem Wege möglich.</p> <p>As a result of the significant overload at the Steinhof wastewater treatment plant, an innovative process concept was developed that relieves the wastewater treatment plant's load through process water treatment and, in addition, achieves lower sewage sludge production and higher sewage gas yields. Its successful implementation protects the environment from uncontrolled nutrient inputs and unnecessary transport routes. The project is characterized by the innovative combination of the well-known processes of thermal pressure hydrolysis, MAP precipitation, and ammonia stripping on a large-scale technical scale. The proximity of the wastewater association to the agricultural sector ensures consistent applicability.</p> <p>Schlagwörter Thermodruckhydrolyse, MAP-Fällung, Ammoniakstrippung, Prozesswasserbehandlung, Nährstoffrecycling, Klärschlamm, Klärgas</p>	

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Kurzbeschreibung des Unternehmens	1
1.2	Ausgangssituation	1
2	Vorhabenumsetzung	2
2.1	Ziele des Vorhabens	2
2.2	Darstellung der technischen Lösung	3
2.3	Darstellung der Umsetzung des Vorhabens	18
2.3.1	Voruntersuchungen	18
2.3.2	Vorbereitende Arbeiten	20
2.3.3	Planung, Ausschreibung und Vergabe	21
2.3.4	Ausführung	22
2.3.5	Inbetriebnahme	23
2.3.6	Optimierungen und Anpassungen	24
2.4	Behördliche Anforderungen	28
2.5	Konzeption und Durchführung des Messprogramms	28
2.5.1	Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	29
2.6	Konzeption und Durchführung der Erfolgskontrolle	35
2.7	Vorstellung Bilanzierungsmethode	36
2.8	Bilanzierungsrahmen	37
2.9	Bilanzierungszeitraum	37
2.10	Bilanzierungsgrundlage	38
3	Ergebnisse	39
3.1	Bewertung der Vorhabendurchführung	39
3.2	Ergebnisse des Messprogramms	39
3.3	Mengen-, Stoff- und Energiebilanzen	40
3.4	Mengenbilanz	40
3.4.1	Mengenbilanz IMP	40
3.4.2	Mengenbilanz IMP 2	41
3.5	Bilanzierung der organischen Fracht	43
3.5.1	Org.-Bilanz IMP 1 (Referenz)	44
3.5.2	Org.-Bilanz IMP 2	46
3.6	N-Bilanz	47
3.6.1	N-Bilanz IMP 1	47
3.6.2	N-Bilanz IMP 2	48

3.7	P-Bilanz.....	49
3.7.1	P-Bilanz IMP 1 (Referenz).....	49
3.7.2	P-Bilanz IMP 2	50
3.8	Fazit und Zusammenfassung der Bilanzen beider IMPs.....	52
3.9	Vergleich IMPs.....	53
3.9.1	Reduzierung der Rückbelastung	53
3.9.2	Steigerung der Gasproduktion.....	56
3.9.3	Produktion eines N- und P-Düngers	57
3.9.4	Reduktion der zu entsorgenden Schlammmenge sowie Verbesserung der Entwässerbarkeit.....	58
3.10	Sonderanalytik	58
3.10.1	Bestimmung des reaktionären $CSB_{f,ref}$ mittels modifiziertem Zahn-Wellens-Test (ZWT)	58
3.10.2	Dynamische Viskosität	60
3.10.3	Partikelgrößenverteilung	60
3.10.4	Entwässerungskennwert TR(A).....	61
3.10.5	Fingerprint Mikrobiologie	63
3.10.6	Fingerprint anorganische Schadstoffe	63
3.10.7	Fingerprint organische Schadstoffe	66
3.10.8	Fingerprint Spurenstoffe.....	67
3.11	Energiebilanzen	68
3.12	Umweltbilanz.....	71
3.13	Wirtschaftlichkeitsanalyse	73
3.13.1	Kapitalkosten	74
3.13.2	Betriebskosten	75
3.13.3	Einsparungen und Erlöse.....	77
3.13.4	Gesamtwirtschaftlichkeit.....	80
3.14	Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	81
4	Empfehlungen	83
4.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung	83
4.2	Modellcharakter/Übertragbarkeit	83
5	Zusammenfassung / Summary	85

1 Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

Der Abwasserverband Braunschweig (AVBS) ist ein Wasser- und Bodenverband auf der Grundlage des Wasserverbandsgesetzes von 1991 und damit eine Körperschaft des öffentlichen Rechts. Der Abwasserverband Braunschweig ist Eigentümer des Klärwerks Steinhof, in dem das Abwasser der Stadt Braunschweig sowie einiger Gemeinden des Wasserverbandes Gifhorn nach dem neuesten Stand der Technik behandelt wird.

Das mechanisch und biologisch behandelte Abwasser wird anschließend auf den landwirtschaftlichen Flächen der Verbandsmitglieder genutzt oder auf den Rieselfeldern des AVBS nachbehandelt.

Die Betriebsführung des Klärwerks wird durch die Stadtentwässerung Braunschweig (SEBS) wahrgenommen.

1.2 Ausgangssituation

Das Klärwerk Steinhof in Braunschweig stand aufgrund der Überbelastung mit einer angeschlossenen Fracht von im Mittel 350.000 Einwohnerwerten (EW) vor der Herausforderung, seine Ablaufgrenzwerte weiterhin mit ausreichender Sicherheit einhalten zu können. Auf der Grundlage verschiedener Studien und Voruntersuchungen fiel die Entscheidung auf ein innovatives und in dieser Zusammensetzung bisher einzigartiges Erweiterungskonzept. Dieses Gesamtkonzept beinhaltet die Verknüpfung der Teilgebiete der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und Nährstoffrückgewinnung.

Das erarbeitete Konzept umfasst die gezielte Nährstoffrückgewinnung von Stickstoff und Phosphor aus dem Schlammwasserstrom. Zudem gewinnt das Konzept mit dem Bau einer thermischen Desintegration die Vorteile der Effizienzsteigerung der Faulstufe mit der Erhöhung der Eigenenergieproduktion und der zusätzlichen Nährstoffrücklösung.

2 Vorhabenumsetzung

2.1 Ziele des Vorhabens

Die primären Ziele des Vorhabens sind die Entlastung der biologischen Reinigungsstufe durch eine Behandlung der internen Prozesswasserströme aus der Schlammbehandlung bei gleichzeitiger Erhöhung der Eigenenergieerzeugung und einer Reduzierung der nach der anaeroben Behandlung und Entwässerung verbleibenden und zu entsorgenden Schlammengen. Die in den Nährstoffrückgewinnungsprozessen anfallenden zurückgewonnenen Nährstoffe sollen zudem so weit wie möglich regional im Verregnungsgebiet des Abwasserverbandes Braunschweig als Ersatz für die aktuell genutzten Mineraldünger eingesetzt werden.

Im Rahmen einer detaillierten Ökobilanz (Project CoDiGreen, WP2, LCA-Study, 2012) wurde im Vorfeld untersucht, wie sich der Einsatz der hier skizzierten Verfahren auf dem Klärwerk Braunschweig auf die Umwelt auswirken würde. Dabei hat sich gezeigt, dass die thermische Hydrolyse einen substanziellen Beitrag zur Verbesserung der energetischen Bilanz (62 % Verbesserung) und des CO₂-Fussabdrucks (52 % Verbesserung) bewirkt, ohne andere negative Umweltauswirkungen (Versäuerung, Humantoxizität u.a.) auszulösen. Die MAP-Fällung und die Strippung sind energetisch ausgeglichen, wobei letztere den CO₂-Fussabdruck um 38 % verringert. Aus der industriellen Herstellung von Stickstoff resultiert ein CO₂-Ausstoß von rd. 2,3 kg CO₂/kg Stickstoff, der durch die Rückgewinnung vermieden wird. Insgesamt bietet die Kombination der Verfahren also eine erhebliche Verringerung der Umweltbelastung.

Somit werden durch die neuen Nährstoffrückgewinnungsstufen die essentiellen Nährstoffe Stickstoff und Phosphor energieneutral gewonnen, da die Gewinnung wenig Energie erfordert und gleichzeitig der sonst notwendige Energieeinsatz zur Elimination der Stoffe aus dem Abwasser vermieden wird.

Die mit diesem Vorhaben verfolgten Ziele lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ⇒ Entlastung der biologischen Abwasserreinigung durch Minimierung der internen Rückbelastung aus der Schlammbehandlung
- ⇒ Steigerung des Faulgasanfalls
- ⇒ Verminderung der Schlammmenge
- ⇒ Verbesserung der Schlammentwässerbarkeit
- ⇒ Erhöhte Nährstoffrücklösung für die Verfahrensstufen der Phosphor- und Stickstoffrückgewinnung
- ⇒ Produktion von hochwertigen, landwirtschaftlichen Düngemitteln

Als Projektbezeichnung für die Gesamtheit der im Rahmen des UIP geförderten neuen Verfahrensstufen wird im Folgenden der Begriff „**KlärWert**“ verwendet.

Abschlussbericht

2.2 Darstellung der technischen Lösung

Zur Erreichung der vorgenannten Ziele wird durch die Verringerung der Nährstoffrückbelastung in den Schlammwässern die biologische Reinigungsstufe der Kläranlage durch eine gezielte Phosphor- und Stickstoffrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammmentwässerung bestehend aus einer MAP-Fällung (Nuresys-Verfahren) und einer Ammoniak-Luft-Strippung entlastet. Der Phosphor wird in Form von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) gebunden und ausgefällt. Anschließend durchläuft das phosphatarme Schlammwasser eine Ammoniak-Luft-Strippung. Hier wird der Ammonium-gebundene Stickstoff über eine saure Wäsche in eine Diammoniumsulfatlösung (ASL) überführt und ausgeschleust. Die vorgeschaltete MAP-Fällung begünstigt dabei den Prozess, da die nötige Alkalisierung des Schlammwassers bereits zum Teil in dieser Stufe stattfindet. So wird erwartet, dass die so erhaltenen Rezyklate eine hohe Qualität aufweisen und daher voraussichtlich sehr gut für den landwirtschaftlichen Düngeinsatz geeignet sind.

Der Betrieb der aus drei Faultürmen bestehenden Schlammstabilisierung wird geändert und um eine Thermodruckhydrolyse mit Vorentwässerung und Dampferzeugung erweitert. Die bisher gemeinsam gefaulten Rohschlammfraktionen werden getrennt behandelt, wobei der Überschussschlamm nach separater Faulung anschließend (vor-)entwässert und nach Aufschluss in einer Thermodruckhydrolyse zusammen mit dem Primärschlamm erneut anaerob behandelt wird.

Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die neuen Verfahrensstufen des Klärwerks Steinhof:

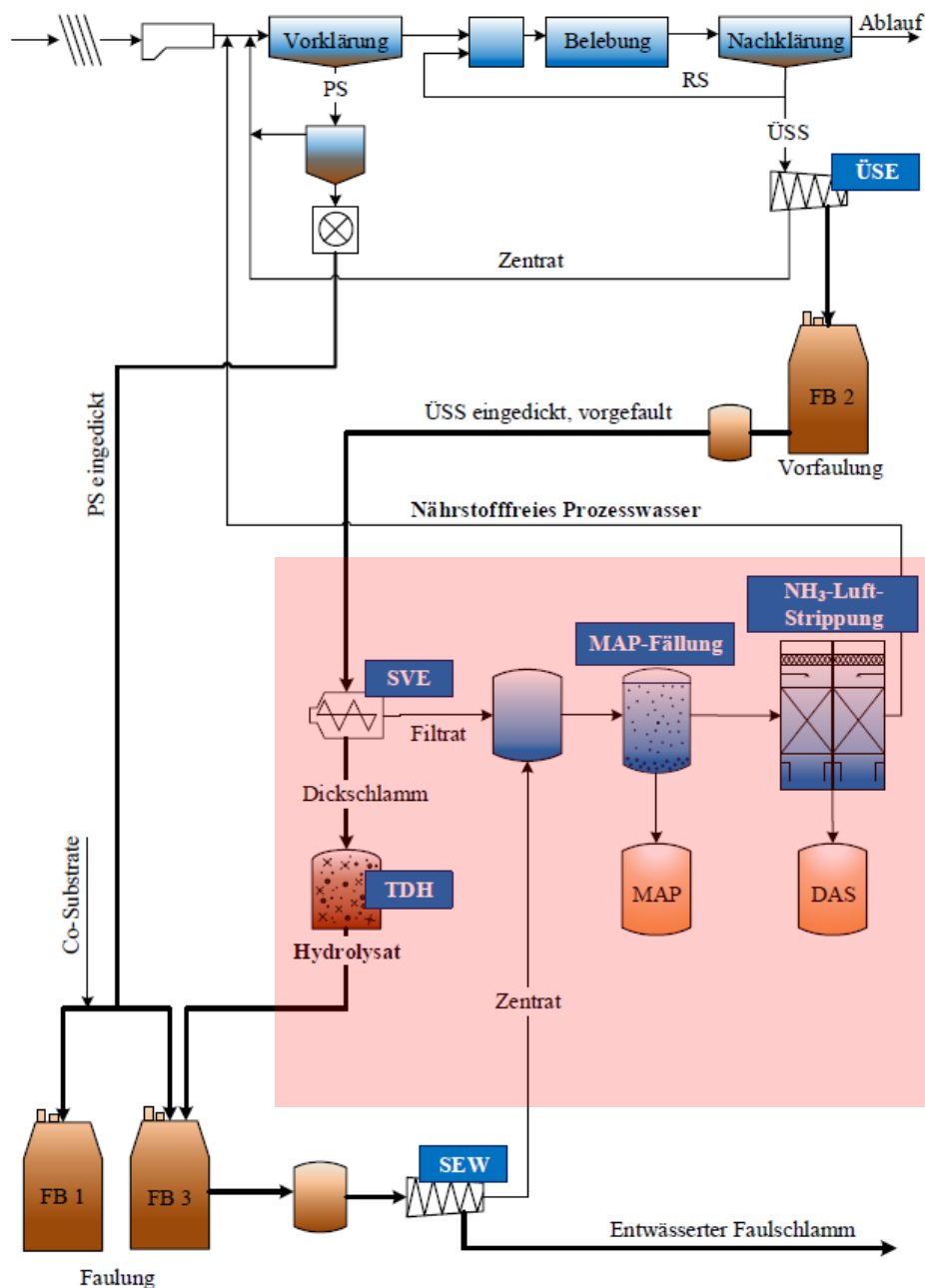


Abbildung 1: Neue Verfahrensstufen auf dem Klärwerk Steinhof (rot hinterlegt)

Durch den Aufschluss des zuvor bereits ausgefaulten Überschussschlammes und die sich anschließende 2. anaerobe Behandlungsstufe wird die Faulgasausbeute erhöht und zugleich die zu entsorgende Klärschlammmenge verringert. Ein Teil des zusätzlichen Faulgases wird für die Dampferzeugung eingesetzt, der Rest wird in der vorhandenen, ausreichend dimensionierten BHKW-Anlage für die Erhöhung der Eigenstrom- und Wärmeproduktion genutzt. Des Weiteren trägt die Thermodruckhydrolyse zu einer Nährstofffreisetzung bei und erhöht damit das Nährstoffrückgewinnungspotenzial.

Mit dem Filtratwasser aus der Schlammvorentwässerung der reinen Überschussschlamm-faulstufe stehen zusammen mit dem Zentratwasser aus der finalen Schlammentwässerung zwei gleichermaßen nährstoffreiche Prozesswässer für die Nährstoffrückgewinnung zur Verfügung.

Abschlussbericht

Insgesamt wird durch die Thermodruckhydrolyse der zu entsorgende Schlammanfall reduziert und zugleich die Entwässerbarkeit gefördert.

Der großtechnische Betrieb und die bislang unerforschte Kombination der einzelnen Verfahren machen aus dem Vorhaben ein wichtiges Full-Scale-Demonstrationsprojekt. Die Innovation der Projektumsetzung liegt insbesondere in der Wechselwirkung aller Verfahren, da die Prozesse optimal auf nachfolgende Stufen abgestimmt sind. Das entwickelte Gesamtkonzept ist ideal auf vergleichbare Abwasserreinigungsanlagen mit der Problemstellung der Überbelastung übertragbar. Somit nimmt das Vorhaben durch seinen Erfahrungsgewinn in Bereichen der Auslegung, Realisierung und Wirtschaftlichkeit für vergleichbare Problemstellungen auf anderen Kläranlagen eine Vorreiterposition ein. Ein weiterer Fokus liegt auf der integrierten Rückgewinnung und Weiterverarbeitung von Nährstoffen zu hochwertigen Rezyklaten (ALS als N-Flüssigdünger und MAP auch Struvit genannt als P-/N-Feststoffdünger) für die landwirtschaftliche Nutzung. Dabei sind verschiedene Maßnahmen zur Etablierung einer produktionstauglichen Düngemittelherstellung erforderlich. Sie liefern wichtige Erkenntnisse für die weitere Optimierung der Prozesskette. Später im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass die Erzeugung von ALS-Lösung als direkt landwirtschaftlich nutzbarer Flüssigdünger erfolgreich demonstriert werden wird, während im Bereich der Struvitproduktion noch Optimierungsarbeiten hinsichtlich der Ausschleusung und Vorbereitung des Struvits für eine Weiterverarbeitung zu einem ausbringungsfähigen Düngeprodukt zu erbringen sind.

Kurzdarstellung der neuen Verfahrensstufen

- ⇒ Schlammvorentwässerung (Schneckenpresse)
- ⇒ Thermodruckhydrolyse mit Dampferzeugung
- ⇒ Nährstoffrückgewinnung im Prozesswasserstrom, bestehend aus:
 - ⇒ Prozesswasserspeicher 600 m³
 - ⇒ MAP-Fällung
 - ⇒ Ammonium-Luft-Stripfung
 - ⇒ Chemikalienlager für Magnesiumchlorid, Schwefelsäure und Natronlauge und ALS

Die neuen Verfahrensstufen werden gemeinsam in einem neu errichteten, zentralen Schlammbehandlungsgebäude (1.200 m², 14 m Höhe) untergebracht. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahrensstufen näher erläutert.



Abbildung 2: Neues Schlammbehandlungsgebäude (Rückseite) mit Prozesswasserspeicher

Schlammvorentwässerung

Die Schlammvorentwässerung (SVE) dient dem Zweck die in der Thermodruckhydrolyse das zu behandelnde Schlammvolumen zu reduzieren und damit den notwendigen Dampfeintrag für die Desintegration des Schlammes zu minimieren.

Die SVE besteht aus den folgenden Komponenten:

- Schlammvorlagebehälter (50 m³)
- Dünnschlammbeschickung
- Polymeraufbereitung und -dosierung
- Entwässerungsschnecke
- Dickschlammtransport
- Filtratnachbehandlung über Trommelfilter
- Säurespülung zur Beseitigung von anorganischen Ablagerungen

Aus dem Ablaufbehälter des Faulturms 2 wird der ausgefaulte Überschussschlamm nach Polymerkonditionierung über eine Schneckenpresse auf 10-17% Trockenrückstand (TR) entwässert. Das hierbei anfallende Filtrat wird nach Reinigung über einen Trommelfilter in den Prozesswasservorlagespeicher der Nährstoffrückgewinnungsstufe gefördert, der vorentwässerte Schlamm wird über eine kurze Rohrleitung direkt in den Schlammvorerwärmer der Thermodruckhydrolyse gepumpt.

Tabelle 1: Leistungsdaten Schlammvorentwässerung

Durchsatz Schneckenpresse	8-20 m ³ /h
Entwässerungsgrad	10-17% (15%)
Siebweite Filtratnachbehandlung	200 µm

Die aufgeführten Anlagenkomponenten sind im vereinfachten Fließbild der Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 3: Schlammvorentwässerung und Filtratnachbehandlung (Trommelfilter)

Abschlussbericht

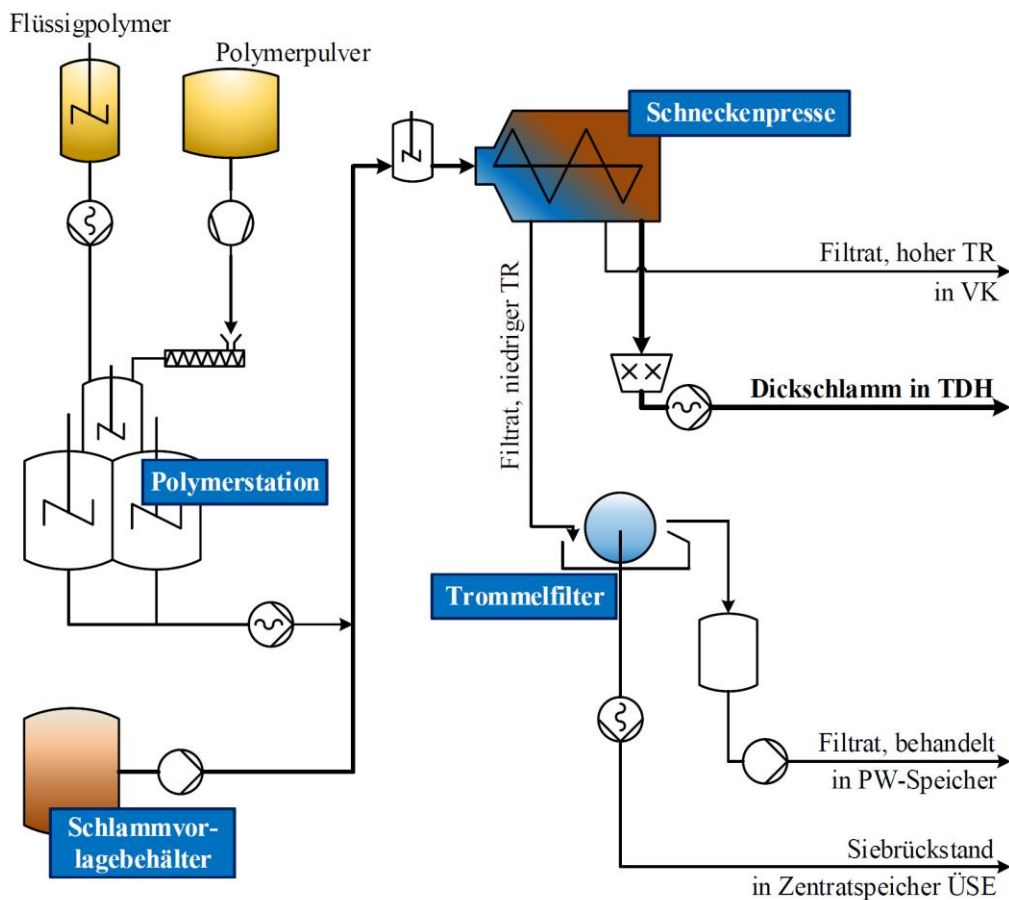


Abbildung 4: Schlammvorentwässerung KW Steinhof, vereinfacht

Thermodruckhydrolyse

Für die Desintegration des ausgefaulten Überschussschlammes kommt das HCHS-System der Fa. Haarslev zum Einsatz. Die Kernkomponenten der TDH sind folgende vier Behälter:

- Schlammvorerwärmer (3 m³)
- Druckhalter (0,15 m³)
- Reaktor (3,2 m³) und
- Entspannungsbehälter (1,0 m³)

Der vorentwässerte Schlamm wird direkt aus der Schneckenpresse kontinuierlich in den Schlammvorerwärmer gefördert, der zugleich als Vorlagebehälter dient. Die Vorerwärmung erfolgt durch Entspannungsdampf aus dem Entspannungsbehälter, wodurch der Frischdampfbedarf wesentlich reduziert wird (Wärmerückgewinnung).

Aus dem Schlammvorerwärmer heraus wird der Schlamm in Intervallen über eine mehrstufige Exzenterpumpe in eine sogenannte Schleuse (Pressurizer) gefördert. Anschließend wird der Schlamm mit Frischdampf aufgeheizt und über den Dampfdruck in den zentralen Reaktor gedrückt. Der Druckhalter ermöglicht den Betrieb der Exzenterpumpe bei deutlich geringerem Druck als den im Reaktor vorherrschenden ca. 6 Bar. Im Reaktor wird der entwässerte Schlamm durch weitere Dampfinjektion auf ca. 165°C bei 6 Bar erwärmt und ca. 20-30 min bei dieser Temperatur gehalten.

Abschlussbericht

Aus dem Reaktor heraus wird der Schlamm in Intervallen mittels eines Ventils im Entspannungsbehälter auf etwa Umgebungsdruck entspannt, das Hydrolysat kühlt dabei auf ca. 105°C ab. Der dabei freiwerdende Dampf wird zur Vorerwärmung des entwässerten Schlammes in den Schlammvorerwärmer zurückgeführt.

Aus dem Entspannungsbehälter wird der hydrolysierte Schlamm über eine Exzentrerschneckenpumpe kontinuierlich direkt in die Faulung gefördert. Optional kann das heiße Hydrolysat durch die Beimischung von Recyclewasser (Brauchwasser, hergestellt aus nachfiltriertem Kläranlagenablauf mittels eines Feinfilters mit 500 µm Maschenweite der GEFA Prozesstechnik GmbH Kläranlagenablauf) gekühlt bzw. verdünnt werden.

Die bei der Hydrolyse aus dem Schlamm freigesetzten nicht kondensierbaren Gase werden über einen Gaswäscher gereinigt und anschließend zur Vermischung in das vorhandene Faulgassystem eingespeist.

Der für die Thermodruckhydrolyse benötigte Dampf wird über eine mit Mischgas oder Erdgas befeuerbare Dampfkesselanlage, ausgeführt als Großwasserraumkessel, erzeugt.

Das für die Dampferzeugung benötigte Speisewasser wird aus Trinkwasser erzeugt. Hierfür wird das Trinkwasser zunächst über eine Ionenaustauscheranlage vorenthärtet und im Anschluss über eine Umkehrosmose weitestgehend von gelösten Verbindungen (Salzen) befreit. Das Speisewasser wird über einen Wärmetauscher mit der Niedertemperaturabwärme des Kläranlagenheizsystems vorerwärmt und anschließend durch Dampfinjektion atmosphärisch entgast und zusätzlich chemisch konditioniert (pH-Wert-Einstellung und Sauerstoffbindung zur Vermeidung von Korrosion und Betriebsstörungen).

Tabelle 2: Leistungsdaten Thermodruckhydrolyse und Dampferzeugung

Durchsatz Thermodruckhydrolyse	bis 750 kg TR/h bis 4,5 m ³ /h entw. Schlamm
Hydrolysedauer	20-40 min
Hydrolysetemperatur	140-165°C
Hydrolysattemperatur zur Faulung	105°C
Dampferzeugung	bis 1.000 kg/h
Spezifischer Dampfbedarf Hydrolyse	165 kg/m ³
Elektrische Anschlußleistung	30 kW
Mittlere Leistungsaufnahme	ca. 11 kW



Abbildung 5: Thermodruckhydrolyse (Fa. Haarslev)

Abschlussbericht

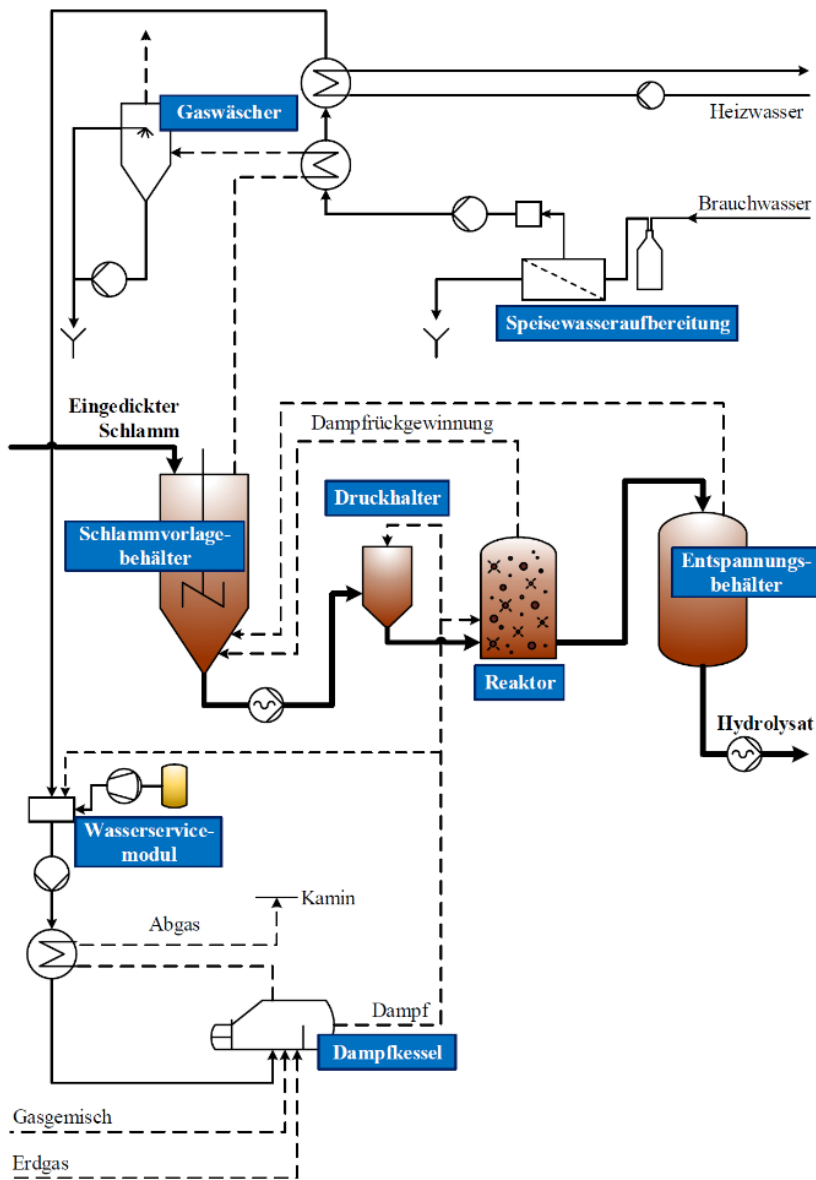


Abbildung 6; Thermodruckhydrolyse KW Steinhof, vereinfacht



Abbildung 7: Dampferzeugung Thermodruckhydrolyse

MAP-Fällung

Die MAP-Fällung auf der Kläranlage Steinhof wurde durch das Kristallisationsverfahren NuReSys realisiert. Die Anlage besteht im Kern aus drei zentralen Behältern:

- Stripper (25 m³)
- Reaktor (25 m³) und
- Settler (11 m³),

sowie der entsprechenden Anlagenperipherie (Prozessluftherzeugung, Chemikalien- und Entschäumerdosierung, Produktaustrag- und Wäsche und Abluftsystem).

Aus dem Prozesswasserspeicher wird der zu behandelnde Prozesswasserstrom im Normalfall über Kreiselpumpen in den (CO₂)-Stripper befördert. Ziel der vorgeschalteten Strippung ist eine Entsäuerung des Prozesswassers durch den Austrag von CO₂. Durch die Entsäuerung wird der pH-Wert in Richtung des für die Struvitfällung erforderlichen pH-Wertes von 8 bzw. darüber verschoben. Zur weiteren pH-Wert-Anhebung kann Natronlauge dosiert werden. Die für die Entgasung erforderliche Druckluftherzeugung erfolgt über zwei Hybridverdichter. Die Druckluft wird über grobblasige Belüftungselemente im Bodenbereich des Strippers eingetragen. Die gesamte in der Anlage anfallende Abluft wird abgesaugt und aus dem Gebäude gefördert. Durch den Lufteintrag in den Stripper kann es zur Schaumbildung kommen, hierfür ist eine Entschäumerstation vorgesehen, über die im Bedarfsfall Entschäumer in den Stripper dosiert werden kann.

Abschlussbericht

Das entsäuerte Prozesswasser fließt über einen Trichterüberlauf im Freigefälle in den Reaktor. Eventuell bereits im Stripper ausfallende und sedimentierende Struvitkristalle werden über Kreiselpumpen aus dem Behälterboden abgezogen und in den Reaktor oder in den Settler gefördert. Durch die Zugabe von $MgCl_2$ -Lösung in den Reaktor wird der Kristallisationsprozess quantitativ eingeleitet. Für die optimale Durchmischung ist im Reaktor ein langsam laufendes Rührwerk installiert.

Das aus dem Reaktor über Freigefälle in den Settler fließende Prozesswasser wird über eine weitere Verbindungsleitung im Bodenbereich zum Teil in den Reaktor zurückgeführt. Über diese Leitung werden zugleich die im Settler sedimentierenden MAP-Kristalle zurück in den Reaktor geführt, um dort ausgeschleust zu werden.

Zur Verbesserung des Kristallrückhalts wird aus dem unteren Ablaufbereich des Settlers Prozesswasser abgezogen und über einen Hydrozyklon klassiert. Die über den Unterlauf des Hydrozyklons abscheidbaren Kristalle werden in den Reaktor zurückgeführt, der Oberlauf wird direkt in den oberen Ablaufbereich eingeleitet und fließt von dort in die Pumpvorlage der Ammoniak-Luft-Stripung ab.

Der Abzug der sedimentierten MAP-Kristalle erfolgt zyklisch über einen zentralen Ablauf am tiefsten Punkt des Reaktors. Im Abzugsbehälter (Schleuse) wird die abgezogene Kristallsuspension in einen modifizierten Sandwäscher eingeleitet, der kontinuierlich mit Recyclewasser durchströmt wird.

Über eine Austragsschnecke wird das Struvit-Fällprodukt in einen Container abgeworfen. Das ursprüngliche dem Teilprojekt 4 zugrundeliegende Konzept sah vor, dass das an dieser Stelle ausgeschleuste Rohstruvit mit geringem Aufwand zu Pellets weiterverarbeitet und dann direkt als Düngerprodukt ausgebracht werden kann. Da der Anbieter des hier eingesetzten Nuresys-Verfahrens auf der Basis der Betriebserfahrungen seiner vorhandenen Referenzanlagen die Erzeugung eines deutlich grobkörnigen Struvitproduktes zugesichert hatte, erhoffte man sich, dass das erzeugte Struvit-Fällprodukt ohne aufwändige Weiterverarbeitung ggf. direkt durch vorhandene landwirtschaftliche Ausbringungstechnik (z. B. Kreiselstreuer) einsetzbar ist. Das im Laufe des Projekts bis Ende 2024 erzeugte Fällprodukt ist allerdings auch nach allen erfolgten und bewertbaren Optimierungen noch sehr feinkristallin, so dass eine direkte landwirtschaftliche Ausbringung noch nicht möglich ist und auch der angestrebte Abscheidegrad noch nicht erreicht wurde. Die im Rahmen des Teilprojektes 4 verstärkt durchgeführten konstruktiven (Anpassung des Settlerbodens) und verfahrenstechnischen Anpassungen (pH-Wert-Verschiebung im Faulschlamm bereits im Vorlagebehälter) der Struvit-Anlage haben zur Erzielung eines besseren Abscheidegrades geführt. Damit ist das Ziel des Vorhabens bzgl. der Nährstoffgewinnung (N) zum Teil erfüllt. Die ebenfalls angestrebte Verbesserung der Struktur zu einem gröberen Produkt war bisher noch weniger erfolgreich. Zukünftig wird die Anlage mit einem Lamellenabscheider im Settler ausgerüstet, um die Abtrennung und anschließender Rezirkulation von Feinstkristallen zu verbessern. Parallel dazu werden auf landwirtschaftlicher Seite alternative Ausbringungsmöglichkeiten eruiert. Die weitere Aufbereitung des feinkristallinen Produktes selbst zu z. B. Pellets wurde verworfen, da in Feldversuchen festgestellt wurde, dass die Pellets eine schlechte Löslichkeit und damit eine schlechte Pflanzenverfügbarkeit besitzen. Die Pellets wurden bei der Ernte zum Teil völlig unverändert wiedergefunden.

Abschlussbericht**Tabelle 3: Leistungsdaten MAP-Fällung**

Durchsatz MAP-Fällung	Bis 25 m ³ /h Prozesswasser
Mittlere Verweilzeit Prozesswasser	2 h
Elektrische Anschlussleistung	51 kW
Spezifischer el. Energiebedarf	1,9 kWh/m ³
MAP-Produktion*	
* 400 mg/l PO ₄ -P im Zulauf, 25 m ³ /h, als reines Produkt (MgNH ₄ PO ₄ *6H ₂ O)	

**Abbildung 8: MAP-Fällung Nuresys**

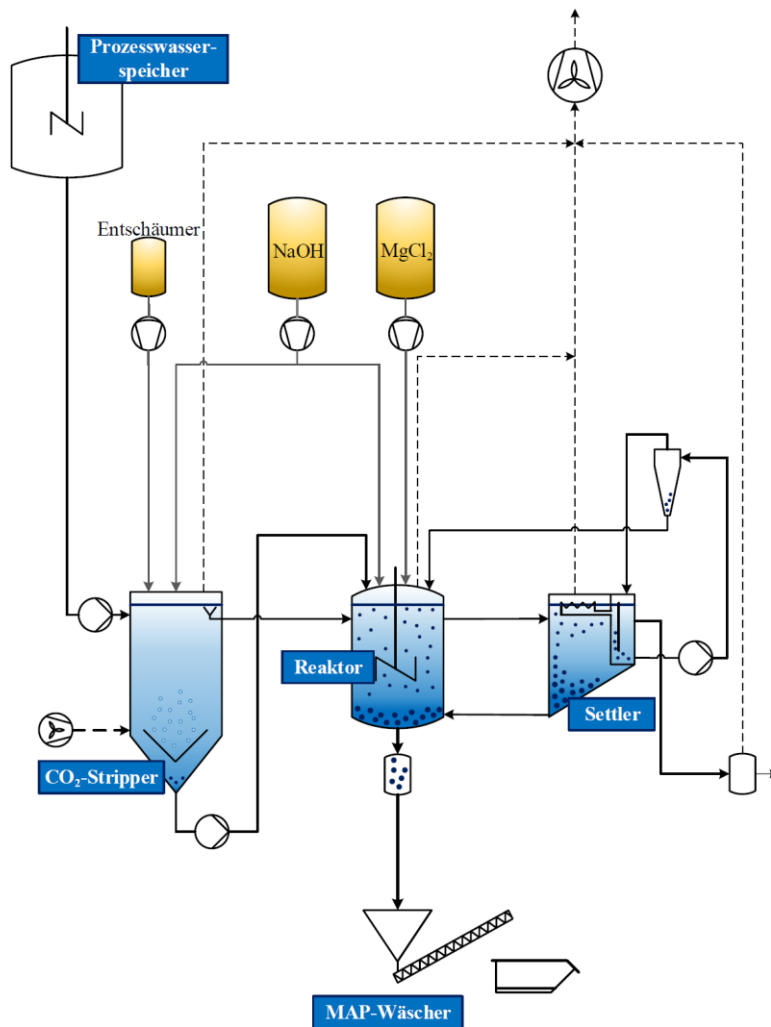


Abbildung 9: MAP-Fällung KW Steinhof, vereinfacht

Ammoniak-Luftstrippung

Die Umsetzung der Stickstoff-Rückgewinnung auf dem Klärwerk Steinhof erfolgt über eine Luft-Strippung der Fa. RVT. Die zentralen Komponenten sind zwei Füllkörperkolonnen (Stripper und Wäscher), die über einen geschlossenen Luftkreislauf miteinander verbunden sind.

Weitere Prozesskomponenten sind das Prozesswasserzirkulationssystem inkl. Pumpen und Wärmetauscher, die Chemikaliendosierung einschließlich Lagerbehälter und der Wäscherkreislauf inkl. Flüssigdüngerspeicher (50 m³ im Außenbereich).

Aus dem Ablaufbehälter der MAP-Fällung heraus wird das phosphatabgereicherte Prozesswasser zunächst durch Zugabe von Natronlauge alkalisiert und über einen Wärmetauscher mit dem Anlagenablauf auf ca. 50°C vorerwärmt. Über einen zweiten mit Heizwasser durchflossenen Wärmetauscher wird das Prozesswasser auf die gewünschte Prozesstemperatur (55°C) nacherwärmt. Ein Großteil des Wärmebedarfs des Verfahrens wird direkt aus dem Ablauf der Anlage über einen Wärmetauscher zurückgewonnen, die Nacherwärmung mit Heizwasser kompensiert im Wesentlichen die anlagenspezifischen Leitungs- und Abstrahlungsverluste.

Abschlussbericht

Über ein Gebläse wird kontinuierlich Prozessluft zwischen den Kolonnen im Kreislauf geführt. Das alkalisierte und erwärmte Prozesswasser wird durch Düsen im Kopf der Desorptionskolonne (Stripper) auf die Füllkörperschüttung verrieselt. Im Gegenstromprinzip kommt die fein verteilte Lösung mit der im Boden eingeblasenen Prozessluft in Kontakt und nimmt dabei das durch pH-Wert- und Temperaturerhöhung gebildete, gasförmige Ammoniak auf und transportiert dieses mit dem Gasstrom in die Sorptionskolonne (Wäscher).

Das nährstoffabgereicherte Prozesswasser wird anschließend aus dem Sumpf des Strippers über Kreiselpumpen abgezogen und nach Abkühlung über den Prozesswasservorerwärmer dem Kläranlagenzulauf zugeführt.

Die über das Gebläse in den Sumpf des Wäschers eingeblasene ammoniakreiche Prozessluft wird im Gegenstrom mit durch Zugabe von Schwefelsäure stark angesäuerter Waschlösung in Kontakt gebracht. Aus Ammoniak und Schwefelsäure bildet sich eine Ammoniumsulfatlösung, deren Konzentration mit zunehmender Ammoniakabsorption steigt. Sobald sich ein Salzgehalt von ca. 38 % eingestellt hat, wird die Zugabe von Schwefelsäure gestoppt und solange weiter Ammoniak sorbiert, bis der gewünschte Ziel-pH-Wert erreicht ist. Anschließend wird die Ammoniumsulfatlösung in den dafür vorgesehenen Lagerspeicher gefördert und die Waschlösung mit Brauchwasser ergänzt. Der erzeugte Stickstoffdünger ist prinzipiell unmittelbar als Flüssigdünger einsetzbar. In der Anlaufphase führten jedoch erhebliche Schwankungen in der Prozesswasserqualität sowie ein diskontinuierlicher Anlagenbetrieb zu einer variierenden Zusammensetzung der Ammoniumsulfatlösung, wodurch die Produktqualität aufgrund der geringen Dichte, und Stickstoffkonzentration und des sehr niedrigen pH-Wertes zunächst nicht durchgehend den Anforderungen der Landwirtschaft entsprach. Mittlerweile konnte durch Prozessoptimierungen eine gleichbleibend hohe Qualität des Düngemittels erreicht werden, sodass es uneingeschränkt für die direkte Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis geeignet ist.

Tabelle 4: Leistungsdaten Ammoniak-Luft-Strippung

Durchsatz Ammoniakstrippung	Bis 25 m ³ /h Prozesswasser
Prozessluftstrom	19.000 m ³ /h
Elektrische Anschlussleistung	52 kW
Spezifischer el. Energiebedarf	1,5 kWh/m ³
Spezifischer Wärmebedarf (ohne WRG)	11,5 kWh/m ³
Produzierte ASL*	418 kg/h
* 1.500 mg/l NH ₄ -N im Zulauf, 150 mg/l im Ablauf, 25 m ³ /h, 38% (NH ₄) ₂ SO ₄	



Abbildung 10: Luftstrippung (Fa. RVT PE) und Chemikalienlager



Abbildung 11: Abtankplatz und Zwischenspeicher Flüssigdünger (ASL)

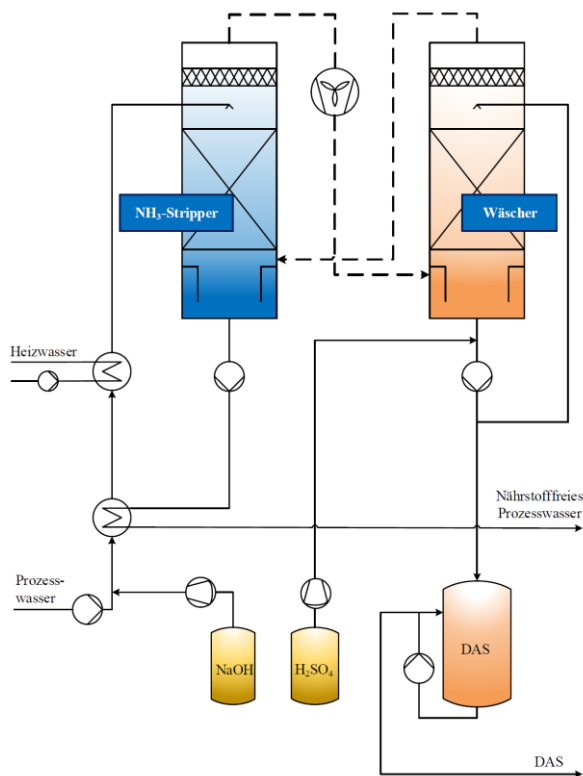


Abbildung 12: Ammoniak-Luft-Strippung KW Steinhof, vereinfacht

2.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens

2.3.1 Voruntersuchungen

Aufgrund der in der Projektkonzeption geplanten weitreichenden Eingriffe in die Schlammbehandlung des Klärwerks Steinhof und der zu erwartenden Rückkopplungen zwischen der Trennung der Schlammströme, Desintegration und Nährstoffrückgewinnung wurden die wesentlichen Prozesse vor Antragstellung in vorbereitenden labor- und großtechnischen Versuchen untersucht, um einerseits die ursprünglichen Konzeptannahmen zu überprüfen und andererseits potentielle Betriebsprobleme im Vorfeld zu erkennen und Auslegungsgrundlagen für die großtechnische Ausführung zu gewinnen.

Im Wesentlichen wurden vor Vorhabenumsetzung folgende vorbereitende Maßnahmen/Untersuchungen durchgeführt:

- Trennung der Schlammströme und separate Faulung von Primär- und Überschussschlamm
- Labortechnische Desintegrationsversuche mit dem auf dem Klärwerk Steinhof anfallendem Überschussschlamm (Roh-ÜSS und ausgefauter ÜSS), Untersuchung des Einflusses verschiedener Desintegrationsbedingungen
- Durchführung von Laborversuchen zu Abbaubarkeit und Gasertrag der verschiedenen Schlammfraktionen (gefaut, ungefaut, desintegriert), Freisetzung von Nährstoffen und schwer abbaubarem CSB

Abschlussbericht

- großtechnische Entwässerung verschiedener Schlammfraktionen (Überschussschlamm, separat ausgefallter ÜSS und PS), begleitende Untersuchungen der Schlammigenschaften (Viskosität, Entwässerbarkeit), Optimierung der Entwässerung hinsichtlich Entwässerungsgrad, Polymerbedarf und Abscheidegrad, Vergleich von Dekanter und Schneckenpresse
- Versuche zur MAP-Fällung und Rückgewinnung aus dem Faulschlammzentrat, Betrieb einer Pilotanlage zur MAP-Fällung zur Fällung des MAP aus den zuvor erzeugten 400 m³ Zentrat
- Durchführung von Pelletierungs- bzw. Granulierungsversuchen mit dem in einer Pilotanlage zur MAP-Fällung der Fa. Veolia (Struvia-Anlage) erzeugten Struvit mit dem Ziel, einen direkt landwirtschaftlich einsetzbaren Dünger in Form von Pellets bzw. Granulaten zu erzeugen
- Besichtigung von Referenzanlagen zur Thermodruckhydrolyse (Exelys, Biothelys, Cambi, Turbotec), zur Nährstoffrückgewinnung (Nuresys) und zur Vorentwässerung mit Schneckenpressen
- Betrachtung Standortverlagerung Überschussschlammverdickung (nicht im Rahmen des UIP gefördert) im Kontext des Projektes KlärWert (UIP-Projekt)
- Variantenbetrachtung Dampferzeugung Thermodruckhydrolyse: Vergleich Standort BHKW mit Abgaswärmenutzung und Dampfleitung mit Direkterzeugung über Dampfkessel am Standort der Desintegration

Schwierigkeiten und Erkenntnisse

- Die Umstellung der Mischfaulung auf eine getrennte mesophile Faulung von Primär- und Überschussschlamm führte nach anfänglich problemlosem Betrieb zu einem Anstieg der Viskosität des separat ausgefallenen Überschussschlammes. Mit der Erhöhung der Viskosität einhergehend war ein Absinken der Heizschlammumwälzleistung verbunden, was durch einen Pumpentausch behoben werden konnte.
- Nach mehreren Wochen stabilen Betriebs der getrennten Faulung kam es zu einem Abriss des Rührwerks im Primärschlammfaulbehälter. Daraufhin mussten die Schlammströme umgeleitet werden. Zur Bergung des Rührwerks und für die Ursachenforschung wurde der Faulbehälter zu Beginn der Entwässerungsperiode entleert und gereinigt. Hierbei stellte sich heraus, dass die Beschichtung der Stahlbehälterwände des Faulbehälters vor allem im oberen Bereich der Gaswechselzone beschädigt war und eine Sanierung erforderlich ist. Eine Untersuchung der anderen Behälter im Kopfbereich zeigte Schäden an der Beschichtung, so dass auch hier eine Entleerung und Sanierung erforderlich wurde.
- Aufgrund der Erfahrungen mit der stark erhöhten Viskosität des reinen Überschussschlammes wurde entschieden, die Rührwerkstechnologie aller Faulbehälter auf die geänderten Schlammigenschaften hin anzupassen.
- Die Laboruntersuchungen zur (Vor-)Entwässerung des separat ausgefallenen Überschussschlammes zeigten einen überdurchschnittlich hohen Polymerbedarf. Im Rahmen der großtechnischen Entwässerungsversuche wurde deshalb dem Aspekt der Reduzierung des Polymerbedarfs besonders Rechnung getragen. Im Rahmen der großtechnischen Entwässerungsversuche konnte der Polymerbedarf gegenüber den Laborversuchen deutlich gesenkt werden,

Abschlussbericht

dennoch mussten im Rahmen der Umsetzung des Gesamtkonzeptes noch weitere Optimierungen erfolgen.

- Die Schneckenpresse als Vorentwässerungsaggregat stellt eine energieeffiziente Alternative zu Dekantern dar. In den durchgeführten großtechnischen Entwässerungsversuchen wurden die angestrebten Entwässerungsgrade von beiden Verfahren bei vergleichbarem Polymerbedarf erreicht. Zur Sicherstellung der Prozesswasserqualität ist eine nachgeschaltete physikalische Prozesswasserbehandlung (z.B. Siebreinigung) zu berücksichtigen.
- Aufgrund der sehr langen Rohrleitungswege zwischen maschineller Überschussschlammverdickung und Faulung und der hohen Viskosität des Überschussschlammes werden während der derzeit (und auch zukünftig) durchgeführten separaten Faulung von Überschuss- und Primärschlamm hohe Drücke auf der Dickschlammleitung zur Faulung beobachtet, die zwischenzeitlich zum Abschalten der Pumpen führen und eine regelmäßige Spülung der Leitung erfordern. Aus diesem Grunde wurde entschieden, die maschinelle Überschussschlammverdickung zusammen mit den neuen Verfahrensstufen in einem gemeinsamen Schlammbehandlungsgebäude in der Nähe der Faulung neu zu errichten.
- Die Ergebnisse der im Vorfeld durchgeführten Versuche zum Einsatz der Thermodruckhydrolyse bestätigen die angesetzte deutliche Erhöhung der Abbaubarkeit des Überschussschlammes, die Hydrolyse des Überschussschlammes zwischen zwei anaeroben Behandlungsstufen (DLD) hat die stärkste Auswirkung auf das Abbauverhalten und den Biogasenertrag. Die Ergebnisse zu den Betriebsbedingungen der Thermodruckhydrolyse zeigen, dass bei Temperaturen von 160°C und einer Hydrolysedauer von 30 min die besten Ergebnisse erreicht werden.
- Die Laborversuche zur Entwässerbarkeit des Faulschlammes nach der DLD-Behandlung (anaerobe Behandlung der Mischung von hydrolysiertem, vorausgefaultem Überschussschlamm und Primärschlamm) bestätigten die erwartete Erhöhung des Entwässerungsgrades.
- Die Laborversuche zur Thermodruckhydrolyse zeigten in Summe eine verstärkte Freisetzung an schwer abbaubarem CSB, der auf der Basis der durchgeführten Zahn-Wellens-Tests mit geschätzten 5-7 mg/L (bezogen auf den Ablauf des Klärwerks Steinhof) aber im typischen Bereich für diese Verfahren liegt.
- Die durchgeführten Pelletierungsversuche zeigten, dass eine Pelletierung des aus der Pilotanlage der Fa: Veolia (Struvia-Anlage) erzeugten Struvits die Zugabe kleinerer Mengen Bindemittel erfordert, um formstabile Pellets zu erzeugen.

2.3.2 Vorbereitende Arbeiten

Aufgrund der dringend erforderlichen Sanierung der Faulbehälter wurden die hierfür erforderlichen Arbeiten vorgezogen. Nach Planung und Ausschreibung der Sanierungsarbeiten (August 2014) wurde die Beschichtung und die Rührwerke aller drei Behälter erneuert. Betriebsbedingt wurden diese Arbeiten in verschiedenen Abschnitten durchgeführt und konnten im Frühjahr 2016 abgeschlossen werden.

Für die flexible Einbindung der Thermodruckhydrolyse in die bestehende Schlammbehandlung waren komplexe Anpassungen bzw. Erweiterungen der Verfahrens- und Automatisierungstech-

Abschlussbericht

nik der Schlammfäulung erforderlich, weshalb parallel zur Sanierung der Fäulung mit den notwendigen Planungsarbeiten begonnen wurde. Die Ausschreibung des Umbaus der Fäulung erfolgte im Jahr 2016, die Umsetzung und Fertigstellung wurde bis zum Ende des Jahres 2017 abgeschlossen.

Durch die Verlagerung des Standortes der Überschussschlammeindickung wurde die Verlegung neuer Erdleitungen erforderlich. Im Rahmen dieser Maßnahme wurden – so weit wie möglich – die für die Integration der neuen Verfahrensstufen erforderlichen Rohrleitungsanbindungen in den Klärwerksbestand bis in die Nähe des neuen zentralen Standortes vorbereitet. Da die wirtschaftliche und technische Lebensdauer der vorhandenen Eindickzentrifugen 2015 erreicht war, wurde parallel zu den geplanten geförderten UIP-Maßnahmen eine Erneuerung der maschinellen Überschussschlammeindickung beschlossen. Die Wahl des neuen Aufstellortes der Eindickzentrifugen zusammen mit den neuen Verfahrensstufen in der Nähe der Schlammfäulung wurde aufgrund der sich daraus ergebenden betrieblichen Vorteile (Minimierung der Druckverluste bei der Schlammförderung) getroffen.

2.3.3 Planung, Ausschreibung und Vergabe

Als Ergebnis der Vorbetrachtungen wurde ein zentraler Standort für alle Verfahrensstufen in direkter Nähe der Fäulung gewählt. Als Schlamm entwässerungsverfahren vor der Thermodruckhydrolyse wurde die Schneckenpresse gewählt. Die finale Entwurfsplanung wurde im Juni 2016 abgeschlossen. Die Konzeption der Dampferzeugung wurde aus betrieblichen und wirtschaftlichen Gründen angepasst und sah nun anstelle eines separaten Gebäudes in der Nähe der Gasmotorenanlage die Dampferzeugung in direkter Nähe der Thermodruckhydrolyse vor. Auf eine Abgaswärmeeinbindung wurde verzichtet, die Dampferzeugung erfolgt aus Mischgas oder Erdgas.

Die Entwurfsplanung wurde im Sommer 2016 abgeschlossen. Die erforderlichen Bauleistungen wurden europaweit ausgeschrieben, wobei folgendes Vorgehen gewählt wurde:

Zunächst wurden die drei zentralen Verfahrensstufen (Thermodruckhydrolyse, MAP-Fällung und Ammoniak-Luft-Strippung) auf Basis einer funktionalen Leistungsbeschreibung mit klarer Definition der bauseitigen Schnittstellen ausgeschrieben. Durch die funktionale Ausschreibung konnten Anbieter unterschiedlicher verfahrenstechnischer Umsetzungen der gleichen Funktionalität bzw. Zielsetzung am Wettbewerb teilnehmen, zugleich wurde die Wahl der technisch, betrieblich und wirtschaftlich optimalsten Lösung ermöglicht. Aufgrund der komplexen Anlagentechnik und dem funktionalen Charakter der Ausschreibungen erforderte die für die Bewertung der Angebote erforderliche technische Klärung einen überproportional hohen Aufwand. Für jeden der ausgeschrieben Bereiche wurden mindestens drei Angebote abgegeben.

Parallel zu den funktionalen Ausschreibungen wurden die Verfahrenseinheiten der Vorentwässerung und der maschinellen Überschussschlammeindickung geplant und über klassische Leistungsverzeichnisse ausgeschrieben.

Es wurden folgende Firmen beauftragt:

1. Thermodruckhydrolyse und Dampferzeugung: Haarslev (Dänemark)
2. MAP-Fällung: Bremer pro aqua (Deutschland), Verfahrensgeber Nuresys (Belgien)

Abschlussbericht

3. Ammoniak-Strippung: RVT PE (Deutschland)

4. Vorentwässerung: Bremer pro aqua (Deutschland)

5. Überschussschlammeindickung: Fa. Hiller (nicht im Rahmen des UIP gefördert)

Im direkten Anschluss wurde mit den beauftragten Firmen mit der Klärung der technischen Ausführung begonnen. Zeitgleich wurde ein Teil der für die Anbindung des neuen Aufstellungsstandorts erforderlichen Medien – und Ver- bzw. Entsorgungsleitungen benötigten Rohrleitungsarbeiten durchgeführt.

Parallel mit der Aufstellungsplanung der ausgeschriebenen maschinentechnischen Hauptkomponenten wurde mit der Ausführungsplanung und Ausschreibung des neuen Schlammbehandlungsgebäudes, der infrastrukturellen Erschließung und der übergeordneten EMSR- und Maschinentechnik begonnen, da erst nach Auftragsvergabe und technischer Klärung die konkreten Anforderungen an die Bautechnik festgelegt werden konnten. Die ebenfalls EU-weit ausgeschriebenen Leistungen wurden im Frühjahr 2017 an folgende Firmen vergeben:

Bautechnik Rohbau und Außenanlagen: Fa. Max Kroker, Braunschweig

Ausbaugewerke: Fa. Borchering, Diepenau-Lavesloh

Übergeordnete Maschinentechnik: Fa. Schachtbau Nordhausen, Nordhausen

Lüftungs- und Klimatisierungstechnik: Fa. Suchfort, Göttingen

EMSR-Technik: Fa. WTB Elektro, Mansfeld

2.3.4 Ausführung

Nachdem die Baugenehmigung für das neue Schlammbehandlungsgebäude am 10.08.2017 durch die Stadt Braunschweig erteilt war, wurde durch die Fa. Kroker mit den Erdarbeiten begonnen.

Der Rohbau des in Fertigbetonskelettbauweise errichtete neue Schlammbehandlungsgebäude wurde plangerecht bis zum Ende des Jahres 2017 weitestgehend fertig gestellt. Die sich im Frühjahr anschließenden Ausbauarbeiten (Trapezblechverkleidung Wände und Dach, Bodenaufbau und Fliesen wurden in enger terminlicher Verzahnung mit der übergeordneten Maschinentechnik (Portalkranlage, Rohrleitungssysteme und Hilfskomponenten innerhalb des Gebäudes, etc.) und den verfahrenstechnischen Losen durchgeführt.

Die geordnete Installation der Verfahrenstechnik stellte dabei erhöhte Anforderungen an die Planung des Bauablaufs aller Gewerke: Teile der Verfahrenstechnik (MAP-Fällung, Portalkrananlage) wurden z.B. vor Schließung des Daches und über Autokrane von oben eingebracht, für die Strippung und das Chemikalienlager wurde ein Bereich des Daches nur provisorisch geschlossen und für das Einheben der Komponenten wieder geöffnet.

Die Einbringung der restlichen verfahrenstechnischen Komponenten (Schneckenpresse, Zentrifugen, Thermodruckhydrolyse und Dampferzeugung) erfolgte nach Fertigstellung des Innenausbaus über die entsprechend dimensionierten Zugangstore der Halle und Nutzung der Portalkrananlage.

Abschlussbericht

Durch Liefer- und Ausführungsschwierigkeiten im Bereich der Bautechnik (Ausbaugewerke) und des HKL-Loses kam es zu Verzögerungen bei den nachgelagerten Gewerken, so dass zur Sicherstellung des Frostschutzes der Halle zwischenzeitlich eine Beheizung über ein mobiles Heißluftgebläse realisiert werden musste. Trotzdem wurden alle wesentlichen verfahrenstechnischen Komponenten bis zum Ende des Jahres 2018 montiert, die neue Energieversorgung (Mittelspannungsschaltanlage und Trafos) wurde erfolgreich in Betrieb genommen, dass für das Gebäude erforderliche Brandmeldesystem wurde installiert. Des Weiteren wurden die Hauptkabeltrassen ausgebaut, die Innen- und Außenbeleuchtung war in wesentlichen Teilen fertiggestellt und grundsätzlich betriebsbereit.

Als Auflage zur Baugenehmigung war die bisher über die Nachklärbecken bzw. die Ablaufspeicherbecken bereitstellte Löschwasserversorgung zu sichern. Hierfür wurde ein Teil des ehemaligen Biofilters baulich abgetrennt und in einen Löschwasserspeicher umgebaut. Die abschließenden Arbeiten wurden vor Beginn der Inbetriebnahme 2019 abgeschlossen. Die Abnahme der Bauleistungen wurde am 13.12.2018 durchgeführt.

Die restlichen bau- und verfahrenstechnischen Arbeiten, sowie alle Verkabelungs- und Hardwareleistungen wurden bis Mitte des Jahres 2019 im Wesentlichen abgeschlossen, die Programmierung der übergeordneten Automatisierungstechnik wurde zusammen mit den sukzessiven Teilinbetriebnahmen bis zum Ende des Jahres 2019 abgeschlossen.

Generell war die elektrotechnische Abstimmung der verschiedenen funktionalen Gewerke (Desintegration, MAP-Fällung, Strippung) aber auch anderer Bereiche (z.B. Los M3: Lüftung- und Klimatisierung) mit dem auf dem Klärwerk erwarteten Ausführungsstandards schwierig und deutlich zeitaufwändiger als vorhergesehen. Die Vielzahl der zum Teil auch nur kleineren Anpassungen im elektrotechnischen Anlagenbestand, die in den Leistungsumfang der übergeordneten EMSR-Technik fallen, aber auch die Abbildung der übergeordneten Steuerungsfunktionalität über das Prozessleitsystem der Kläranlage führten zu einem erheblichen koordinativen und programmier-technischen Aufwand, der im Vorfeld als geringer eingeschätzt wurde. Dadurch musste in der Umsetzungsphase mehr Programmierarbeit geleistet werden als geplant war. In Kombination mit dem zu derzeit kaum verfügbaren Fachpersonal für Programmierleistungen hat dies zu Verzögerungen geführt, die in der Gesamtprojektdauer von untergeordneter Bedeutung sind.

2.3.5 Inbetriebnahme

Als erste Verfahrensstufe wurde im Juni 2019 die – nicht im Rahmen der UIP-Maßnahmen geförderte maschinelle Überschussschlammeindickung und die Recyclewasseranlage in Betrieb genommen.

Dies war funktional erforderlich, da sämtliche in die Kläranlage zurückgeführten Schmutzwasserströme über das Zentratpumpwerk der Überschussschlammeindickung gefördert werden.

Als nächste Verfahrensstufe gingen im August 2019 die Vorentwässerung und die Thermodruckhydrolyse inkl. Dampferzeugung in Betrieb. Die Inbetriebnahme der Nährstoffrückgewinnungsstufen MAP-Fällung und Ammoniak-Strippung erfolgte mit einem zeitlichen Nachlauf von ca. 2 Wochen, da zunächst ausreichend Prozesswasser aus der Vorentwässerung angesammelt werden musste.

Abschlussbericht

Im September 2019 befanden sich alle neuen Verfahrensstufen in Betrieb, mit Ausnahme der MAP-Fällung (Abnahme 02/2022– bisher ohne Erfüllung der Garantiewerte) und der HKL-Technik (Abnahme 04/2020) wurden alle Leistungen bis zum Ende des Jahres 2019 abgenommen. Nur die Verfahrensstufe der MAP-Fällung befand sich noch in der betrieblichen Optimierung, ein störungsfreier Dauerbetrieb und die mit dem Angebot abgegebenen Leistungswerte (Abscheidegrad, Produktgröße) konnten bis Mai 2022 nicht erreicht werden. Die Optimierung der MAP-Fällung mit dem Ziel eines stabilen Betriebs, einer Erhöhung des Abscheidegrads und eines sicheren Produktaustrags zur Erzeugung eines streufähigen Produktes wurde im Rahmen des Teilprojektes 4 fortgeführt (siehe folgender Abschnitt 2.3.6: MAP-Fällung).

2.3.6 Optimierungen und Anpassungen

Nach der Inbetriebnahme der verschiedenen Verfahrensstufen kam es in verschiedenen Anlagenbereichen zu Betriebsschwierigkeiten bzw. Betriebsstörungen, die neben Instandsetzungen auch Anpassungen bzw. Erweiterungen erforderlich machten:

Vorentwässerung

- *Füllstandmessung im Dickschlammtrichter:* Der vom Hersteller standardmäßig eingebaute Laser-Füllstandsensor führte vermutlich aufgrund von Kondensation auf der Sensoroberfläche immer wieder zu Fehlmessungen und damit zu Betriebsstörungen der Presse. Nach längeren Optimierungsversuchen der Automatisierungstechnik konnte durch Einbau eines hydrostatischen Drucksensors zur Füllstandsmessung ein stabiler Betrieb erzielt werden.
- *Abluftabsaugung:* Da während des Betriebs im Inneren der Schneckenpresse erhöhte Methangehalte (im Bereich der unteren Explosionsgrenze) festgestellt wurden, wurde durch den Betreiber der Betrieb der Schneckenpresse aus Sicherheits Erwägungen heraus entschieden, die Schneckenpresse mit einer EX-geeigneten Abluftabsaugung inkl. Prozessmesstechnik zur kontinuierlichen Überwachung der Abluft auszurüsten. Nach Wiederinbetriebnahme der Schneckenpresse wurden dann trotz aktiver Abluftabsaugung immer noch deutlich erhöhte Methankonzentrationen gemessen, die sich letztlich auf fehlerhafte Sensorwerte zurückführen ließen. Durch einen Austausch des Methan-sensors konnten die prozessmesstechnischen Probleme behoben werden.
- *Siebschäden Schneckenpresse:* An der Schneckenpresse kam es (wiederholt) zu Siebschäden, gut ein Drittel der Siebbleche im Pressbereich wurden dabei aus dem Rahmen geschoben und irreparabel beschädigt. Aufgrund des wiederholten Auftretens wurden in einem gemeinsamen Gespräch mit dem Hersteller der Schneckenpresse die potenziellen Ursachen erörtert. Nachdem mechanische Schadensursachen durch Störstoffe im Dünnschlamm ausgeschlossen werden konnten, wurden die auf den Sieben beobachtbaren Struvitablagerungen als Auslöser identifiziert. Um die Entstehung weiterer Schäden zukünftig zu vermeiden, wurden Teile der Siebbleche der Schnecke modifiziert und eine automatisierte Säurespülung nachgerüstet, die etwaige Ablagerungen von Struvit auflösen soll.
- *Siebschaden Trommelfilter Filtratnachbehandlung:* Vermutlich ebenfalls durch Struvitablagerungen bewirkt, ist es zu Schäden am Sieb des Trommelfilters gekommen. Das Sieb

Abschlussbericht

wurde ausgetauscht, Teile des Filters verstärkt und der Bodenbereich modifiziert, um Sedimentablagerungen in Totzonenbereichen zu unterbinden. Darüber hinaus wurde der Trommelfilter an die Säurespülung angeschlossen.

- *Polymerkonditionierung:* Auf der Basis einer Untersuchung der Schlammeigenschaften durch die externe Fa. Kopp Kläranlagenberatung wurden Optimierungsempfehlungen abgeleitet, die eine Hybriddosierung unterschiedlicher Konditionierungspolymere erforderlich machen. Die Empfehlung wurde in großtechnischen Versuchen mit Polymeren der Fa. Brenntag umgesetzt. Der spezifische Polymerbedarf konnte damit deutlich gesenkt (auf ca. 15 kg WS/ t TR) und zugleich die Qualität des Filtrats (geringere AFS-Werte) verbessert werden. Darüber hinaus wurde durch den Betreiber eine Filtratrückführung installiert, die es ermöglicht, Filtrat aus der Presszone in den Dünnschlammzulauf der Presse zurückzuführen und damit den Betrieb der Presse bei geringen Zuflüssen zu stabilisieren.

Thermodruckhydrolyse

- *Optimierung Gaswäscher:* In dem bisher direkt über die Einspeisung von Recyclewasser (Kläranlagenablauf) gekühlten Gaswäscher kam es durch anorganische Ausfällungen (vermutlich Ca-Verbindungen) in der Wäscherpumpe zu Störungen. Um Ausfällungen zu unterbinden, wurde die direkte auf eine indirekte Kühlung umgebaut, indem ein zusätzlicher mit Recyclewasser gekühlter Wärmetauscher installiert wurde. Seit dem Umbau sind keine Probleme im Bereich des Gaswäschers mehr aufgetreten.
- *Stopfbuchsenleckagen:* An den Stopfbuchsen des Rührwerks am Vorerwärmer und der Hydrolysatpumpe ist es in kurzen Abständen immer wieder zu Undichtigkeiten gekommen. Die verwendeten Stopfbuchsenmaterialien wurden getauscht, die Standzeiten konnten verbessert werden. Die Hydrolysatpumpe wurde auf eine Gleitringdichtung umgerüstet.
- *Dampfinjektion:* Die Dampfinjektionslanze wurde mehrfach modifiziert, indem die Eintrittslöcher vergrößert bzw. weitere Löcher gesetzt wurden.
- *Einbau Mischer im Vorerwärmer:* Durch den Einbau eines zusätzlichen Mischers im Austragsbereich des Vorerwärmers wurde die Vermischung von Frischschlamm und Recycleledampf verbessert, die interne Wärmerückgewinnung optimiert (höhere Temperatur im Vorerwärmer), was zu einer Reduktion des Frischdampfbedarfs führt.

MAP-Fällung

Die MAP-Fällung stellt die einzige Verfahrensstufe dar, welche die an sie gestellten Erwartungen und die vom Lieferanten garantierten Leistungen (Abscheidegrad und mittlere Kristallgröße) bisher nicht erfüllt hat.

Im Kern ist das entstehende Struvitmaterial sehr feinkristallin, wodurch es einerseits zu Ablagerungen und gestörtem Kristalltransport innerhalb der Struvitanlage kommt und andererseits Teile des feinkristallinen Materials in die nachgelagerte Ammoniak-Strippung verschleppt werden.

Abschlussbericht

Durch den Anlagelieferanten Bremer pro aqua wurden zusammen mit dem Verfahrensgeber Nuresys und dem Betreiber diverse Anpassungen an der Anlage durchgeführt, um einerseits die Kristallgröße zu erhöhen und andererseits die Ablagerungen zu verringern. Folgende Optimierungsmaßnahmen wurden durchgeführt:

- Die Steigung des Schrägbodens im Settler wurde durch Einschweißen zusätzlicher Bleche erhöht (zur Verbesserung des Kristalltransports vom Settler in den Reaktor)
- die pH-, Rührwerks- und Belüftungssteuerung wurde angepasst
- die Stöchiometrie der Magnesiumdosierung wurde verändert
- die Verbindungsleitung zwischen Reaktor und Sedimentationsbehälter („Settler“) wurde ausgetauscht (V-Verbindung anstelle einer geraden Rohrverbindung)
- Radar- und Ultraschallmessungen zur besseren Schaumerkennung und Dosierung von Entschäumer wurden installiert (anstelle von Stabsonden)
- Luft- und Wasserspüleleitungen im Settler und der Verbindungsleitung wurden nachgerüstet und in Betrieb genommen
- Einbau eines Rüttlers in den Sedimentationsbehälter, um Struvitablagerungen zu vermeiden bzw. in Bewegung zu bringen
- Installation eines Ablaufkastens im Settler, um den Transport von gebildeten Kristallen in Richtung der Ablauföffnung zum Reaktor zu forcieren
- Verlängerung des Rührwerks und der Dosierleitungen

Generell ist die Betriebsoptimierung der MAP-Fällung ein langsamer Prozess, die Auswirkungen von konstruktiven oder betriebstechnischen Veränderungen sind nicht unmittelbar, sondern erst nach Tagen des Betriebs erkennbar. Da das Faulschlammzentrat aufgrund seiner starken organischen Verunreinigungen bis zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Flotation im letzten Quartal 2022 nicht für die Nährstoffrückgewinnung zur Verfügung stand, konnte nur das Filtrat aus der Vorentwässerung genutzt werden. Bei in der Vergangenheit immer wieder aufgetretenen Stillständen in den Anlagenteilen der Vorentwässerung oder der Thermodruckhydrolyse fehlte dann Prozesswasser für den Betrieb der MAP-Fällung, so dass kein kontinuierlicher Betrieb möglich war. Hinzu kommt, dass der aus der Vorentwässerung im Mittel zur Verfügung stehende Filtratstrom geringer ist als in der ursprünglichen Konzeption angenommen wurde. Ursächlich hierfür ist, dass die in die Faulung geförderte Überschussschlammmenge und damit auch der für die Vorentwässerung zur Verfügung stehende ÜS-Faulschlammstrom geringer ist als aus den der Konzeption der Anlage zugrundeliegenden Betriebsdaten bestimmt wurde.

2023 wurde eine Zentratflotation errichtet und in Betrieb genommen, so dass nun neben dem Filtrat aus der Vorentwässerung auch gereinigtes Faulschlammzentrat in der Nährstoffrückgewinnung eingesetzt werden kann.

Im Rahmen des Teilprojektes 4 wurden bis 2024 folgende weitere Optimierungsmaßnahmen umgesetzt:

- Umbau des Settlers (der Einbau von Leitblechen zur verbesserten Rezirkulation des Struvit-Produktes in der Anlage).

Abschlussbericht

- Planung, Ausschreibung und Umsetzung einer gezielten Belüftung des Schlammvorlagebehälters 4 der Vorentwässerung. Im Rahmen von Vorversuchen wurde festgestellt, dass das Kristallwachstum des Struvits durch chemische Nebenreaktionen beeinträchtigt wird. Weiterhin konnten die Nebenreaktionen in Vorversuchen gezielt durch eine pH-Wertanhebung initiiert werden. Ziel ist es daher, mittels einer pH-Wertanhebung im Faulschlamm bereits die chemische Reaktion zu provozieren. Dies wird durch die Belüftung des Faulschlammes im Vorlagebehälter 4 erzielt werden, sodass die Reaktionen bereits im Schlamm stattfinden und die Ausfällungen über die Vorentwässerung abgetrennt werden können, bevor das Prozesswasser in der Nährstoffrückgewinnung behandelt wird. Zusätzlich wird der ausgefautete Schlamm in dem Vorlagebehälter besser durchmischt, was zu einem stabileren Betrieb der Vorentwässerung führen soll. Da die Umsetzung der Maßnahme als Bestandteil des UIP-Vorhabens erst kurz vor dem Gesamtprojektende abgeschlossen wurde, konnten noch zu wenige großtechnische Erfahrungen zur Bewertung der Maßnahme gesammelt werden. Die ersten Erfahrungen sind durchweg positiv.
- Provisorische, verfahrenstechnische Umfahrung der MAP-Fällung mit dem Zentrat der Faulschlammmentwässerung, sodass lediglich das Prozesswasser (Filtrat) der Vorentwässerung in der MAP-Fällung behandelt wurde. Die getrennte Behandlung der Prozesswässer führte zu einer deutlichen Verbesserung der Prozessstabilität der Nährstoffrückgewinnungsanlagen.

Ammoniak-Strippping

- *Struvitablagerungen im Wäscherkreislauf:* Durch die Verschleppung von Feinmaterial bzw. eventuell auch durch eine teilweise Neubildung von Struvit und zum Teil anderen Ausfällungen/Ablagerungen kommt es zu Ablagerungen in den Wärmetauschern und am Boden der Stripperkolonne, die eine häufige Spülung mit Salzsäure erforderlich machen. Während die Ablagerungen in den Wärmetauschern und den Leitungen durch die Säurespülung aufgelöst werden können, findet am Boden des Strippers eine Akkumulation statt. Derzeit wird noch davon ausgegangen, dass durch Optimierungen im Betrieb der MAP-Fällung die Entstehung von Ablagerungen reduziert oder weitestgehend verhindert werden kann. Sollte es trotzdem weiter zu signifikanten Ansammlungen von Struvit am Boden des Strippers kommen, könnte das zuvor angedachte Konzept einer dauerhaften pumpengestützten Ausschleusung von Bodenschlamm wiederaufgegriffen werden.
- *Leckagesonden:* Im Bereich der Chemikaliendosierung wurden Leckagesonden nachgerüstet.

Im Weiteren Projektverlauf und im Rahmen des Teilprojektes 4 wurde weitere verfahrenstechnische bzw. konstruktive Optimierungen durchgeführt:

- Austausch der Füllkörper in der Stripperkolonne aufgrund von Ablagerungen, die nicht mit Salzsäure oder heißer Natronlaugenwäsche lösbar waren und zum erhöhten Druckanstieg in der Gebläseleitung führten.

Abschlussbericht

- Umfahrung der MAP-Fällung mit dem Zentrat der Faulschlammwässerung nach der Flotationsanlage und anschließender Siebung, sodass lediglich das Zentrat und nicht das Filtrat in der Strippung behandelt wurde.
- Schaffung einer NaOH-Dosierstelle in die Stripperkolonne, um chemische Reaktionen aufgrund der pH-Wertanhebung vor den Wärmetauschern zu vermeiden.
- Herabsetzung der angestrebten Dichte des ASL. Der Betrieb hat gezeigt, dass die Ausschleusung bei einer geringeren Dichte (1215 kg/m^3 statt 1230 kg/m^3) erfolgen muss, damit die Dichte des Produktes bei 1230 kg/m^3 liegt und eine vermeintlich höhere Dichte des Produktes nicht zu Auskristallisation im Lagerbehälter führt.

2.4 Behördliche Anforderungen

Zur Errichtung der Anlage war eine Baugenehmigung erforderlich. Im Rahmen dieser Genehmigung war die Vorlage und Umsetzung diverser externer Gutachten erforderlich (Brandschutzkonzept, Blitzschutzkonzept, landschaftspflegerisches Begleitplan, etc.).

Die Errichtung und der Betrieb der Dampfkesselanlage als überwachungsbedürftige Anlage erforderten die frühzeitige Einbindung einer zertifizierten Überwachungsstelle (TÜV) und die Stellung eines Erlaubnisanspruches.

Hierbei waren u.a. die Anforderungen der 1. BimSchV zu beachten. Für den Einsatz von Mischgas in der Dampfkesselanlage war eine gesonderte Genehmigung des GAA einzuholen.

Aufgrund der komplexen miteinander verbundenen Maschinen- und Anlagenkomponenten war für den Nachweis der CE-Konformität durch den Auftraggeber eine übergreifende Risikobeurteilung zu erstellen, deren Ergebnisse in der Konstruktion und Fertigung/Errichtung der betrachteten Maschine Berücksichtigung fanden. Die Risikobeurteilung wurde unter Berücksichtigung der Teil-Konformitätserklärungen der Lieferanten der einzelnen Verfahrensstufen durch ein extern beauftragtes Fachbüro (Ing. Büro Winkler, Wallenhorst) erstellt, dass schon in der Planungsphase mit einbezogen wurde.

2.5 Konzeption und Durchführung des Messprogramms

Zur Beurteilung der erfolgreichen Implementierung der neuen Verfahrensschritte bedarf es einer soliden und umfangreichen Datenerhebung. Im UIP ist hierfür die TU Braunschweig, Institut für Siedlungswasserwirtschaft zur wissenschaftlichen Begleitung eingebunden gewesen und ergänzend die Fa. Kopp Kläranlagenberatung für spezielle Fragestellungen im Bezug auf die Klärschlammcharakteristik. Es wurden zwei ausführliche Intensivmessphasen (IMP) durchgeführt und miteinander verglichen. Die IMP 1 zur Abbildung des „Ist-Zustandes“ erfolgte im Januar 2019, die IMP 2 nach Inbetriebnahme der erweiterten Anlagenteile zur weitergehenden Schlammdesintegration und Nährstoffrückgewinnung im November 2021. Der Messzeitraum wurde jeweils über 21 Tage geplant. Die erhobenen Daten wurden mittels kumulativer Bilanzierung auf ihre Stimmigkeit und Aussagekraft geprüft. Im Anschluss wird auf Grundlage der Daten eine Bewertung der im Vorfeld formulierten Ziele vorgenommen.

Abschlussbericht

2.5.1 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Die für die Energiebilanzierung notwendigen Messwerte bzw. Stoffströme wurden soweit vorhanden aus den durch die Universität Braunschweig durchgeführten Bilanzierung des Zustandes vor und nach Inbetriebnahme der neuen Verfahrensstufen entnommen. Des Weiteren wurden technische Kennwerte (z.B. thermische bzw. elektrische Wirkungsgrade von BHKW und Heizkessel aus vorangegangenen Untersuchungen (energetische Feinanalyse der Kläranlage Steinhof) für die Berechnungen herangezogen. Sofern direkte Wärmemengenmessungen vorhanden waren (z.B. Nacherwärmung Strippung), wurden diese – soweit plausibel - herangezogen, die Wärmebilanz der Faulung wurde auf der Basis von Enthalpieströmen (Masse- und Temperaturdifferenzen) bestimmt. Stromverbräuche der einzelnen Verfahrensstufen wurden anhand der für alle Teilbereiche vorhandenen Wirkleistungsmessungen ermittelt.

Die zu Grunde liegenden Datensätze der beiden Messphasen setzen sich aus zwei, auf unterschiedlichen Wegen erfassten Daten zusammen. Zum einen wurden die im Prozessleitsystem (PLS) der Kläranlage erfassten minütlichen Messwerte und zum anderen die aus dem Intensivmessprogramm analytisch erhobenen Daten genutzt.

Daten aus dem Prozessleitsystem (PLS):

Mittels der in allen relevanten Rohrleitungen verbauten magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräte (IDMs) konnte im PLS des Klärwerks Steinhof minütlich der Durchfluss der unterschiedlichen Prozessströme aufgezeichnet werden. Hierbei wurden sowohl flüssige als auch gasförmige Ströme erfasst. Diese Mengen-Messungen bilden zusammen mit den Informationen über die Konzentrationen bestimmter Stoffe die Grundlage zur Frachtermittlung und somit für die Bilanzierung.

Die minütlich erfassten Messwerte wurden zu Tageswerten zusammengefasst und als Durchschnittsstundenwert in m^3/h verwendet. Die anfallenden Faulgasmengen wurden unter Berücksichtigung von Faulgastemperatur und Luftdruck standardisiert in Nm^3 umgerechnet.

Als weitere Information aus dem Prozessleitsystem des Klärwerks sind die Wiegemengen der täglich angelieferten internen und externen Fette zu nennen. Auf Grundlage dieser Informationen kann der Zulauf an Co-Substrat in die Faulbehälter bestimmt werden.

Daten aus der Analyse:

Die Grundlage für den zweiten Teil der Datenerfassung bildet ein umfangreiches Probenahme- und Messprogramm, worin alle relevanten Ströme repräsentativ beprobt und auf die umfangreichen Parameter aus Tabelle 6 bis Tabelle 12 analysiert wurden. Ein Überblick über die Gesamtheit der beprobten Messtellen kann aus Abbildung 13 gewonnen werden. In der Abbildung sind die erweiterten Anlagenteile, die nur in der zweiten IMP beprobt wurden, mit aufgeführt.

In Tabelle 5 sind ergänzend zu Abbildung 13 die Probenahmestellen und beprobten Stoffströme mit zugehöriger Probenahmenummer aufgelistet. Die farblich hervorgehobenen Ströme sind in der IMP 2 zusätzlich in das Messprogramm aufgenommen worden. In der IMP 1 wurden insgesamt 4.466 Proben aus 28 Stoffströmen analysiert. In der IMP 2 wurden die beprobten Stoffströme durch die Inbetriebnahme der neuen Anlagenteile auf 39 erweitert und von allen Projektbeteiligten insgesamt 6.440 Analysen durchgeführt.

Abschlussbericht**Tabelle 5: Übersicht der Probenahmestellen und beprobten Stoffströme für die IMPs**

	Stoffstrom	Teilstoffstrom	Teilstoffstromnummer	
P1a - Intensive Messphase: 3 Wochen	Zulauf KA / Zulauf VK	Zulauf Durchfluss Nivus	1a	
	Rechengut		1b	
	Sandfanggut		1c	
	Ablauf Vorklärung		1d	
	Ablauf KA	Ablauf Klärwerk zum Verband Ablauf zur Verrieselung Überlauf NKB - Gerinne	2a	
	Primärschlamm	PS, eingedickt, gesiebt	3	
	Überschussschlamm	Dünnschlamm ÜS	4	
	Eingedickter ÜS	Dickschlamm ÜS	5	
	Polymer SE	ÜS-Schlamm-Eindickung	6	
	Schlammwasser ÜS	Zentrat SE	7	
	Co- Substrate	Fette	8	
	Vorentwässerung mit nachg. Filter		Filtrat Presszone VEW	9a
			Abl. Filter	9b
			Dickschlamm VEW	9c
			Dampf	10c
			TDH-Hydrolysat	10d
			TDH-Prozesswasser	10e
	Faulgas		FB1	11a
			FB2	11b
			FB3	11c
	Faulschlamm		Ablauf FB1	12a
			Ablauf FB2	12b
			Ablauf FB3	12c
	Entwässerung SEW		Zulauf Entwässerung	13
		Faulschlamm entwässert	14	
		Zentrat SEW	15	
Betriebsmittel MAP+DAS		NaOH	16a	
		MgCl ₂	16b	
		H ₂ SO ₄	16c	
		HCl	16c II	
		Entschäumer MAP-Fällung	16d	
Betriebsmittel-Entwässerung		Polymer VEW (+ Q Nachverdünnung)	16e	
		Polymer SEW (+ Q Nachverdünnung)	16f	
		MgCl ₂ - prov. MAP-Fällung	16g	
Stoffströme im MAP-Prozess		Zulauf MAP-Fällung	17	
		Abl. Stripper MAP-Fällung	18c	
		Ablauf MAP-Fällung	19	
		MAP Endprodukt	20	
		LS Produkt DAS	23	
		Abl. Strippung	24	

Abschlussbericht

Die Analyse der Proben erfolgte im zertifizierten Labor des Klärwerks Steinhof, sowie diverse Sonderanalytik in den Laboren des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW) der TU Braunschweig, bei der Bezirksstelle Braunschweig der Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LUFA) und dem Umwelt Control Labor (UCL). Ein Überblick der erfassten Parameter, der Analyseart sowie des durchführenden Labors kann aus Tabelle 6 bis Tabelle 12 gewonnen werden. Für die Sonderanalytik organische Spurenstoffe, Keime sowie Pharmaka wurden von den durchführenden Institutionen keine Angaben zu den Bestimmungsgrenzen gemacht.

Tabelle 6: Untersuchte Nährstoffe

Nährstoffe				
Parameter	Bestimmungsgrenze	Labor	Untersuchungsmethode	Häufigkeit je IMP
TKN	2,0 mg/l	KWS	DIN EN 25663-H11:1993-11	10x
NH ₄ -N	0,2 mg/l	KWS	DIN ISO 11732-E23:2005-05	10x
NO ₃ -N	0,5 mg/l	KWS	DIN EN ISO 10304-2-1-D20:2009-07	10x
NO ₂ -N	0,1 mg/l	KWS	DIN EN ISO 10304-2-1-D20:2009-07	10x
N _{ges} für Boden	10,0 mg/kg TR	KWS	VDLUFA A2.2.3:1991	10x
SO ₄	5,0 mg/l	KWS	DIN EN ISO 10304-2-1-D20:2009-07	10x
PO ₄ -P	0,05 mg/l	KWS	Küvettest LCK 349	10x
P _{ges}	0,1 mg/l	KWS	DIN EN ISO 11885 E22:2009-09	10x
Ca	2,0 mg/l	KWS		10x
Na	2,0 mg/l	KWS		10x
S _{ges}	0,05 mg/l	KWS		10x
Mg	0,5 mg/l	KWS		10x
K	1,0 mg/l	KWS		10x
B	0,05 mg/l	KWS		10x
Co	0,04 mg/l	KWS		10x
Fe	0,01 mg/l	KWS		10x
Al	0,04 mg/l	KWS		10x

Tabelle 7: Untersuchte anorganische Schadstoffe

Anorg. Schadstoffe				
Parameter	Bestimmungsgrenze	Labor	Untersuchungsmethode	Häufigkeit je IMP
As	8,0 µg/l	KWS	DIN EN ISO 11885 E22:2009-09	10x
Pb	4,0 µg/l	KWS		10x
Cd	0,4 µg/l	KWS		10x
Cr	2,0 µg/l	KWS		10x
Cu	5,0 µg/l	KWS		10x
Ni	2,0 µg/l	KWS		10x
Tl	10 µg/l	KWS		10x
Zn	5,0 µg/l	KWS		10x
Hg	0,2 µg/l	KWS	DIN EN 12846:2012-08 (E12)	10x

Abschlussbericht**Tabelle 8: Untersuchte organische Schadstoffe**

Org. Schadstoffe				
Parameter	Einheit	Labor	Untersuchungsmethode	Häufigkeit je IMP
AOX	[mg/kg]	LUFA	DIN 38414-S 18; 1989-11	1x
PCB	[ng/l]	LUFA	DIN 38414-24; 2000-10	1x
PCDD/PCDF	[ng/l]	LUFA	berechnet nach WHO	1x
Benzo(a)pyren	[µg/l]	LUFA	DIN 38407-39 (F 39); 2011-09	1x
PFT	[µg/l]	LUFA	DIN 38407-42; 2011-03	1x

Tabelle 9: Untersuchte Spurenstoffe (Keime)

Spurenstoffe Keim				
Parameter	Einheit	Labor	Untersuchungsmethode	Häufigkeit je IMP
Gesamtkeime 22°C/ 36°C	[KBE/g]	UCL	SOP HMB_015°: 2017-11;BS	3x
E. Coli	[MPN/100ml]	UCL	DIN EN ISO 9308-2: 2014-06;BS	3x
Coliforme	[MPN/100ml]	UCL	DIN EN ISO 9308-2: 2014-06;BS	3x
Enterokokken	[KBE/100ml]	UCL	DIN EN ISO 7899-2: 2000-11;BS	3x
Salmonellen	[MPN/g]	LUFA	VDLUFA II.1, 14.1; 6. Erg. 2014; 1	3x

Tabelle 10: Untersuchte Spurenstoffe (Pharmaka)

Spurenstoffe Pharmaka				
Parameter	Einheit	Labor	Untersuchungsmethode	Häufigkeit je IMP
Coffein	µg/l	UCL	DIN 38407-F47:2017:07*	3x
Acesulfam	µg/l	UCL	DIN 38407-F47:2017:07	3x
Carbamazepin	µg/l	UCL	DIN 38407-F47:2017:07	3x
Diclofenac	µg/l	UCL	DIN 38407-F47:2017:07	3x
Sulfamethoxazol	µg/l	UCL	DIN 38407-F47:2017:07*	3x
Acetylsulfamethoxazol	µg/l	UCL	DIN 38407-F47:2017:07*	3x
Amidotrioesäure	µg/l	UCL	DIN 38407-F47:2017:07	3x
Benzotriazol	µg/l	UCL	DIN 38407-F36:2014-09*	3x
Methylbenzotriazol	µg/l	UCL	DIN 38407-F36:2014-09*	3x

Abschlussbericht**Tabelle 11: Untersuchte Sonderparameter**

Sonderanalytik			
Parameter	Labor	Untersuchungsmethode	Häufigkeit je IMP
CSB _{ref.}	ISWW	(modif. Zahn-Wellens-Test nach ISWW)	3x
TR(A)	ISWW/ KB Kopp	KB Kopp	IMP 1 = 7x IMP 2 = 2x
PGV	ISWW	Laserbeugung	6x
Viskosität	ISWW	Rheometer	6x

Die teilweise variablen Angaben bezüglich der Häufigkeit der Messungen in Tabelle 12 sind auf unterschiedliche Ströme bezogen. So wurde beispielsweise der TS für den Belebtschlamm 16x und der TS für das Zentrat aus der Überschussschlammeindickung nur 10x beprobt.

Tabelle 12: Übrige erfasste Parameter

Allgemein				
Parameter	Einheit	Labor	Untersuchungsmethode	Häufigkeit je IMP
Q	m ³ /h	PLS	-	d
TR	[%]	KWS	DIN ISO 11465:1996-12	10x bzw. 16x
oTR	[%]	KWS	DIN EN 12879:2001-02	10x
TS	[g/l]	KWS	DIN 38414 S2:1985-11	10x bzw. 16x
oTS	[%]	KWS	DIN EN 12879:2001-02	10x
AFS	[mg/l]	KWS	DIN EN 872 H33:2005-04	10x
CSB _{hom}	[mg/l]	KWS	DIN ISO 15705 H45:2003-09	10x
CSB _{filtr}	[mg/l]	KWS	DIN ISO 15705 H45:2003-09	10x
TOC (NPOC)	[mg/l]	KWS	DIN EN 1484-H3:1997-08	10x
DOC	[mg/l]	KWS	DIN EN 1484-H3:1997-08	10x
TOC	[%]	ISWW	DIN EN 13137:2001-12	9x
TIC	[%]	ISWW	DIN EN 13137:2001-12	9x
Temperatur	[°C]	PLS	-	d
Leitfähigkeit	[µs/cm]	KWS	DIN EN 27888-C8:1993-11	10x
Gasdruck	[mbar]	KWS	-	7x
Gastemperatur	[°C]	KWS	-	7x
Fettmenge	[m ³ /d]	PLS	-	16x
Org. Säuren	[mg/l]	KWS	Hausmethode SOP-A-35	6x
CH ₄ (Biogas)	[%]	KWS	-	7x
CO ₂ (Biogas)	[%]	KWS	-	7x
H ₂ S (Biogas)	[ppm]	KWS	-	7x

Die Probenahme:

Die Probenahme und Analyse der Standardparameter erfolgte an drei Tagen in der Woche. Hierbei wurden Montag, Mittwoch und Donnerstag als Probenahmetage für alle relevanten Prozess-

Abschlussbericht

ströme festgelegt. Am Wochenende erfolgte keine Probenahme. Die Durchführung der Probenahme erfolgte seitens der Mitarbeitenden der SEIBS unter Begleitung von Mitarbeitenden des ISWW der TU Braunschweig. Die Probenahme erfolgte um 7 Uhr morgens und dauerte ca. 1,5 Stunden. Im direkten Anschluss wurden die Proben in Kühlschränken der KWS gelagert und zeitnah analysiert. Für die Sonderanalytik wurden die Proben direkt von den Mitarbeitenden in das ISWW mitgenommen. Die Probenahme für die Spurenstoff- und Keim-Analytik seitens des UCL und der LUFA erfolgte montags.

Die Analyse:

In Tabelle 6 bis Tabelle 12 sind die untersuchten Parameter sowie die zugehörigen Analyse-Verfahren aufgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass die Schlammproben zunächst getrocknet wurden und im Anschluss die Analyse aus der getrockneten Probe erfolgte. Die Angabe zu den Nährstoffgehalten der Schlammströme muss vor der Bilanzierung zunächst in mg/l umgerechnet werden.

Vor diesem Hintergrund wurde das Messprogramm in der IMP 2 durch eine werktägliche TR-Bestimmung der Schlammströme ergänzt. Durch diese Maßnahme wurden die z.T. schwankenden TR-Gehalte der Schlammströme PS, ÜSS, FS 1, FS 2 und FS 3 besser abgebildet. Während der IMP 1 erfolgte lediglich an drei Tagen in der Woche die TR-Bestimmung.

Die Datenaufbereitung:

Die minütlichen Durchflussmengenmessungen der IDMs wurden auf m³/h Durchschnittswerte der jeweiligen Tage zusammengefasst. Die restlichen Daten wurden in vorbereiteten Excel-Dokumenten gebündelt und zunächst auf ihre Stimmigkeit sowie Plausibilität überprüft. Im Anschluss konnten die bereinigten Datensätze durch das ISWW mittels kumulativer Bilanzierung verifiziert werden.

2.6 Konzeption und Durchführung der Erfolgskontrolle

Zur Beurteilung der Effekte der neuen Verfahrensstufen auf die Kläranlage wurde der Zustand vor Inbetriebnahme (Referenz) sowie der Zustand nach Inbetriebnahme und betriebssicherem Betrieb der neuen Anlagenteile abgebildet und verglichen.

Um die Daten als valide einzustufen, wurde eine kumulative Bilanz der Durchflüsse sowie der Kohlenstoffparameter und Nährstoffe erstellt. Den Bilanzierungsrahmen bildete die Schlammbehandlung. Dies liegt darin begründet, dass hier alle festen, flüssigen und gasförmigen Inputs und Outputs erfasst und das System dadurch bilanzierbar wird. Die Betrachtung der Faulung als Ganzes, als auch die Bilanzierung eines einzelnen Faulbehälters war möglich. In der zweiten IMP wurden innerhalb dieses Rahmens die Thermodruckhydrolyse mit vorgeschalteter Entwässerung sowie die Nährstoffrückgewinnungsmodule mit einbezogen. Als Bilanzierungszeitraum wurde das theoretische Schlammalter der Faulung von 21 Tagen angenommen. Der IST-Zustand wurde in der IMP 1 vom 07.01.2019 bis zum 28.01.2019 erfasst. Die IMP 2 fand vom 01.11.2021 bis zum 23.11.2021 statt.

Auf Grundlage dieser Daten wurde im Anschluss eine Bewertung und Erfolgskontrolle der Maßnahmen durchgeführt. Im Fokus der Untersuchung stand letztlich die Frage, welche Auswirkungen die neuen Verfahrensstufen im Vergleich von IMP 1 und IMP 2 auf folgende Punkte haben:

Abschlussbericht

1. Gasertrag der Faulung
2. Verringerung interne Rückbelastung N
3. Verringerung interne Rückbelastung P
4. Produktion eines P-Düngers in Form von Struvit
5. Produktion eines N-Düngers in Form von Diammoniumsulfat
6. Reduktion der zu entsorgenden Schlammmenge
7. Verbesserung der Entwässerbarkeit der Faulschlämme

2.7 Vorstellung Bilanzierungsmethode

Die Bilanzierung ist als erweiterte Plausibilitätsprüfung zu verstehen und ist ein Mittel für die Verifizierung von Messdaten. Um bilanzierbar zu sein, sind für ein System zwei Bedingungen zu erfüllen. Zum einen müssen die Daten in einer regelmäßigen Häufigkeit erfasst werden (Datenverfügbarkeit). Zum anderen haben die Daten in einem bilanzierbaren Zusammenhang zu stehen. Für ein System ist die Bilanzierbarkeit gegeben, wenn sich an den Systemgrenzen die zu- und abfließenden Stoffströme quantitativ aufzeichnen lassen. Das zugrundeliegende Prinzip ist die Massenerhaltung nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Siehe dazu Gleichung 1 für ein geschlossenes System.

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e = 0 \quad (\text{Gl. 1})$$

mit

$\dot{m}_i = \text{Massenstrom in das System} = \text{Import} [\text{kg/d}]$

$\dot{m}_e = \text{Massenstrom aus dem System} = \text{Export} [\text{kg/d}]$

Innerhalb eines geschlossenen Systems kann weder Energie noch Masse verloren gehen. Demnach müssen Massenbilanzen über das System erfüllt werden. Diese Aussage impliziert die Festlegung fester Systemgrenzen sowie eines Bilanzierungszeitraums. Sämtliche Inputströme müssen nach dem Durchlaufen des Systems wiedergefunden werden. Die Differenz zwischen In- und Outputströmen muss unter idealen Bedingungen gleich Null sein.

Unter realen Bedingungen ist diese Forderung nach Gleichung 1 jedoch nicht zu erfüllen. Zum einen liegt dies in der ungenügenden Abbildbarkeit der Realität durch Mess- und Analyseverfahren begründet. Zum anderen werden Vereinfachungen vorgenommen, um das Systems beschreibbar zu machen.

Die Massenbilanz aus Gleichung 1 wird gemäß Gleichung 2 angepasst. Die Aussage ist, dass für einen bilanzierbaren Parameter die Summe aller zufließenden Frachten (S_i) minus die Summe aller abfließenden Frachten (S_e) gleich der zeitlichen Änderung der Stoffmenge ($\Delta S/\Delta t$) im System sein muss. Wird der Bilanzierungszeitraum ausreichend groß gewählt, kann die zeitliche Än-

Abschlussbericht

derung des Stoffes im System vernachlässigt werden ($\Delta S/\Delta t = 0$). Werden über den Bilanzierungszeitraum die zufließenden und abfließenden Frachten jeweils aufsummiert, handelt es sich um eine kumulative Bilanz. Hierdurch gleichen sich mögliche Schwankungen der täglichen Input- und Output-Frachten aus.

$$\sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n S_e = \Delta S/\Delta t \quad (\text{Gl. 2})$$

Der Unterschied zwischen der jeweiligen Summe von Input bzw. Output zu einem Zeitpunkt der Bilanzierung wird als Bilanzabweichung bezeichnet und bestimmt sich nach Gleichung 3. Sind die Inputflüsse in das System höher als die Outputflüsse, tritt eine positive Bilanzabweichung auf. Die Bilanzabweichung ist negativ, wenn sich der genannte Zusammenhang umkehrt.

$$\text{Bilanzabweichung [\%]} = 1 - \left(\frac{\Sigma \text{Output}}{\Sigma \text{Input}} \right) * 100 \quad (\text{Gl. 3})$$

Beträgt die Abweichung der Input- und Output-Frachten der kumulativen Bilanz am Ende des Bilanzierungszeitraums weniger/gleich 10 % gelten die Bilanzen als geschlossen und die Daten als vertrauenswürdig. Ist die Abweichung größer 15 -20 %, kann von einem (ggf. systematischen) Fehler ausgegangen werden.

2.8 Bilanzierungsrahmen

Durch das Definieren von klaren Systemgrenzen wird die Voraussetzung geschaffen, möglichst exakt alle Stoffströme zu beschreiben und zu erfassen. Das Bilanzsystem kann dabei beispielsweise den kompletten Faulprozess oder nur Teilsysteme, wie ein Aggregat zur Schlammmentwässerung, umfassen. Wichtig ist hierbei die klare Abgrenzung an den Schnittstellen zwischen den Teilsystemen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projektes KlärWert die Bilanzierung für die anaerobe Faulung erstellt. Die Bilanzierbarkeit dieses System ist durch den geschlossenen Behälter gegeben. Schnittstellen nach außen werden durch den Zulauf, den Ablauf sowie den Gasabzug dargestellt und erfasst. Im Behälter finden entweder Umwandlungsprozesse (Transformationen) oder eine Speicherung (Deponierung) statt. Aus diesem Grund muss eine Massenbilanz sämtliche in diesem System beteiligten Zwischen- und Endprodukte mit einbeziehen.

2.9 Bilanzierungszeitraum

Die Faulbehälter zeigen im Vergleich zu den täglich zu- bzw. abgeführten Stofffrachten eine vielfach größere Kapazität auf. Durch die Wahl eines genügend großen Bilanzierungszeitraums wird die Änderung der im System gespeicherten Menge verglichen mit den transportierten Stofffrachten gering. Somit können die Änderungen im Massenspeicher (Faulbehälter) vernachlässigt werden. Ein weiterer Grund dafür, Bilanzierungen über einen größeren Zeitraum durchzuführen, liegt

Abschlussbericht

in der Verringerung des Einflusses von unsystematischen Schwankungen. Diese treten beispielsweise durch ungleichmäßige Betriebsführung auf. Über einen längeren Zeitraum gleichen sich diese jedoch wieder aus. Vor diesem Hintergrund wurden die beiden IMPs über einen Zeitraum von 21 Tagen durchgeführt. Hierdurch wird zudem sichergestellt, dass das Faulbehältervolumen mindestens einmal ausgetauscht worden ist.

2.10 Bilanzierungsgrundlage

Die Datengrundlage bilden die, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, erhobenen Daten sowie die Informationen aus dem PLS der KWS. Die Bilanzierung erfolgt kumulativ über drei Wochen.

In Tabelle 13 sind die Parameter der aufgestellten Bilanzen aufgeführt. Für die Durchflüsse konnten die Werte der IDMs genommen werden. Für die übrigen Parameter wurde die Fracht der jeweiligen Ströme nach Gleichung 4 berechnet und bilanziert.

Tabelle 13: Übersicht der Bilanzparameter

Parameter	Einheit
Durchfluss Q	[m ³]
CSB	[kg]
TC	[kg]
P	[kg]
N	[kg]

$$\text{Stofffracht} = \text{Durchfluss (Q)} * \text{Konzentration (c)} \quad (\text{Gl. 4})$$

Datenlücken:

Da nur die lückenlose Erfassung der Durchflüsse über den gesamten Bilanzierungszeitraum möglich war, mussten vorhandene Datenlücken bezüglich der Stoffkonzentrationen zur Abschätzung der täglichen Frachten geschlossen werden. Hierbei wurde zwischen homogenen Stoffflüssen, die sich in der Zusammensetzung wenig bzw. nur langsam ändern (Faulschlamm, Überschussschlamm) und Stoffströmen mit potentiell größeren Schwankungen (Primärschlamm) unterschieden. Für den ersten Fall wurde zwischen zwei gemessenen Werten interpoliert, wohingegen bei zweitem Mittelwerte aus den vorhandenen Messwerten eingesetzt wurden.

Plausibilitätsprüfung:

Die erhobenen Daten wurden vor der Bilanzierung zunächst einer Plausibilitätsprüfung unterzogen, um offenkundig falsche Messwerte zu identifizieren. Dieses ist zum einen durch den Abgleich mit Erfahrungswerten möglich. Einen weiteren Weg bildet der direkte Vergleich zweier IDM-Messwerte für den gleichen Stoffstrom. Alternativ kann die Summe eines Stromes mit der Beschickungsmenge dieses Stromes auf die einzelnen FB verglichen werden. Für die Gasmessung kann ein Abgleich zwischen der rechnerisch bzw. theoretisch produzierten Gasmenge aus dem oTR_{abgebaut} sowie der gemessenen Gasmenge erfolgen.

3 Ergebnisse

3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung

Das Vorhaben wurde erfolgreich abgeschlossen, die komplexe Gesamtanlage konnte als Ganzes in Betrieb gehen. Im Bereich der Schlammbehandlung konnte durch die Integration der Thermo-Druckhydrolyse in Kombination mit der zweistufigen Faulung die erhoffte Verbesserung des anaeroben organischen Abbaus erreicht werden. Die in den Voruntersuchungen ermittelte Steigerung der Faulgaserzeugung um gut 20 % und die damit verbundene Erhöhung der Eigenenergieerzeugung konnte großtechnisch durch das Messprogramm bestätigt werden.

Die prognostizierten Verbesserungen bei der finalen Schlammentwässerung konnten bisher noch nicht in dem erhofften Maß erreicht werden. Obwohl der Entwässerungsgrad bisher nur um rd. 10 % (auf rd. 24 % TR) gesteigert werden konnte, konnte der für die Schlammkonditionierung erforderliche spezifische Polymerbedarf gesenkt werden.

Aktuelle Schlammuntersuchungen deuten darauf hin, dass durch eine Absenkung des ortho-Phosphatgehalts direkt im Faulschlamm mit Hilfe einer Vakuumentgasung in Kombination mit einer Magnesiumdosierung eine zusätzliche signifikante Verbesserung der Entwässerbarkeit des Faulschlammes und eine weitere Senkung des spezifischen Polymerbedarfs erreicht werden kann, was allerdings wiederum zu einer Reduzierung der P-Rückgewinnungsrate führen würde.

Die beiden Nährstoffrückgewinnungsstufen sind differenziert zu betrachten. Die Ammoniak-Luft-Strippung als zentrale Stickstoffrückgewinnungsstufe hat viele Erwartungen und Anforderungen erfüllt, die erzielten Umwelteffekte wurden zum Teil (Eliminationsgrad) übertroffen. Das erzeugte Ammoniumsulfat ist von hoher Qualität und frei von Verunreinigungen (vgl. Kap. 3.10.6).

Die MAP-Fällung konnte zwar generell erfolgreich betrieben werden, ein dauerhaft stabiler Betrieb inkl. kontinuierlicher Produktausschleusung wurde aber noch nicht erreicht. Die bisher erzielten Eliminationsraten lagen knapp unter den gewünschten Werten. Bei dem entstandenen Produkt handelt es sich um vorwiegend feinkristallines, amorphes, nahezu schadstofffreies Struvit (vgl. Kap. 3.10.6). Durch das nicht wie erwartet einsetzende Kristallwachstum kam es immer wieder zu Ablagerungsproblemen und Schwierigkeiten bei der Ausschleusung. Aufgrund der zahlreichen Beeinflussungen des Kristallisationsprozesses und der ohne Faulschlammzentrat immer wieder ins Stocken kommenden Prozesswasserversorgung ist die Ursachenforschung bzw. die betriebliche Optimierung des Fällungsprozesses sehr schwierig.

Bei der Inbetriebnahme der verschiedenen Verfahrensstufen konnten zahlreiche wertvolle Erkenntnisse für weitere technische Optimierungen gewonnen werden, die zum Teil schon in der bestehenden Anlagenkonfiguration realisiert werden konnten.

3.2 Ergebnisse des Messprogramms

Im Folgenden werden die Ergebnisse der kumulativen Bilanzierung für beide IMPs vorgestellt. Dabei wird zunächst die Mengenbilanz und darauf aufbauend die CSB-, TC-, Stickstoff- sowie Phosphor-Bilanz betrachtet. Innerhalb der Bilanzkapitel wird eine Unterteilung nach IMP 1 (Referenz) sowie IMP 2 getroffen. Am Ende steht eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein

Abschlussbericht

Vergleich beider IMPs. Zur besseren Übersicht wird darauf verzichtet, die grafischen Verläufe der Bilanzierung für alle Parameter darzustellen. Stattdessen sind exemplarische Kurven abgebildet.

Bei der Durchführung der zweiten IMP wurde darauf geachtet, dass die neuen Anlagenteile im Vorfeld über längere Zeit störungsfrei betrieben wurden. Jedoch gab es kurz vor der geplanten IMP ungeplante Ausfälle der neuen Anlagenteile. Aus diesem Grund konnte die TDH erst am dritten Tag der IMP in Betrieb gehen. Da ohne Betrieb der TDH keine VEW betrieben wird fällt auch kein Filtrat an. Hierdurch ergibt sich die Konsequenz, dass die nachgeschalteten Module zur Nährstoffrückgewinnung ebenfalls verspätet zugeschaltet werden konnten. Vor diesem Hintergrund wurde die IMP um einen Tag verlängert.

3.3 Mengen-, Stoff- und Energiebilanzen

Die nachfolgenden Bilanzen beziehen sich auf die beiden IMPs aus dem Januar 2019 bzw. November 2021. Die Bilanzen werden zunächst für die Faulung als Gesamtheit aufgestellt und nachfolgend für die einzelnen Faulbehälter sowie ggf. neuen Verfahrensmodule.

3.4 Mengenzbilanz

Aus Gleichung 4 geht hervor, dass der Durchfluss einen wesentlichen Faktor zur Berechnung der Fracht darstellt. Dementsprechend werden diese Messwerte als erstes bilanziert, um den Datensatz zu validieren. Das Beschickungsregime sah in beiden IMPs vor, dass PS und Fett nur in FB 1 und 3 und der ÜSS in FB 2 gefault wird. In der ersten IMP konnte dies aus betrieblichen Gründen nicht immer gewährleistet werden und wurde in der Bilanz entsprechend berücksichtigt. In der zweiten IMP wurde die Verteilung der Schlämme nach genannter Beschickungsordnung vollzogen. Das Fett wurde für die erste IMP nach Zeitsteuerung zu 2/3 in FB 1 und zu 1/3 auf FB 3 verteilt. In der zweiten IMP ging das Fett zu 85% in FB 1 und 15% in FB 3. Der in der zweiten IMP anfallende Strom des Hydrolysats der TDH wird zu 1/3 in FB 1 und zu 2/3 in FB 3 beschickt.

3.4.1 Mengenzbilanz IMP

Im Folgenden finden alle Input- und Output-Ströme für das Gesamtsystem Faulung Betrachtung. In Tabelle 14 sind die im Betrachtungszeitraum zu- und abfließenden Volumenströme aufgeführt.

Tabelle 14: Übersicht der In- und Output-Ströme für die gesamte Faulung IMP 1 (Referenz)

	Strom	Wert	Einheit
INPUT	Gesamt Zufluss	12.328	[m ³ /21d]
	Gesamt Zufluss ÜSS	4.767	[m ³ /21d]
	Gesamt Zufluss PS	6.901	[m ³ /21d]
	Gesamt Zufluss Fett	660	[m ³ /21d]
OUTPUT	Gesamt Abfluss FS	11.366	[m ³ /21d]

Im Vorfeld der Mengenzbilanzierung wurden Abweichungen bei den erfassten Gasmengen sowie den theoretisch produzierten Gasmengen ersichtlich. Auf Grundlage des oTR_{abgebaut} wurde ein

Abschlussbericht

theoretischer Gasertrag errechnet der, wie in Tabelle 15 ersichtlich, eine Abweichung von 42,7% von den Messwerten aufzeigt. Nach einer Kalibrierung des IDM durch den Hersteller konnte die Fehlfunktion behoben werden.

Tabelle 15: Vergleich gemessener und theoretischer Gasertrag IMP 1 (Referenz)

	theoretische Methanmenge [Nm ³ nach 21 d]	gemessene Methanmenge [Nm ³ nach 21 d]	Abweichung [%]
FB 1	47.591	44.758	5,9
FB 2	39.923	22.864	42,7
FB 3	55.515	51.504	-7,79

Die Ergebnisse der Mengenbilanzierung sind in Tabelle 16 aufgelistet. Für die gesamte Faulung kann die Bilanz geschlossen werden. Bei den einzelnen Faulbehältern waren die Bilanzabweichungen ebenfalls zufriedenstellend. Einzig bei Faulbehälter 3 zeigt sich eine höhere Bilanzabweichung. Auf Grund dieser Beobachtung wurden die Zu- und Ablauf IDMs mittels Vergleichsmessung über eine Wasseruhr kontrolliert. Hierbei konnte bei dem Zulauf IDM eine Überbestimmung von 15,15 % festgestellt werden. Die Minderbestimmung wurde im Nachgang behoben.

Tabelle 16: Abweichungen der kumulativen Mengenbilanz IMP 1 (Referenz)

Variante	Bilanz-Abweichung [%]
Q-Bilanz gesamte Faulung	7,80
Q-Bilanz FB 1	2,05
Q-Bilanz FB 2	9,33
Q-Bilanz FB 3	12,74

3.4.2 Mengenbilanz IMP 2

In Tabelle 17 sind die im Betrachtungszeitraum zu- und abfließenden Gesamtmengen aufgeführt. Nach Inbetriebnahme der neuen Anlagenteile müssen für die Mengenbilanzen nun ebenfalls die Ströme Dampf, Hydrolysat, Filtrat VEW, sowie Polymer VEW berücksichtigt werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, ob das Gesamtsystem Faulung oder einzelne Faulbehälter betrachtet werden. Da die TDH mit vorgeschalteter Vorentwässerung eine zwischengeschaltete Stufe innerhalb der Faulung darstellt, ist nur der Filtratstrom als Output und der Polymereinsatz und Dampf als zusätzlicher Input zu werten.

Der gefaulte ÜSS aus FB 2 wird zunächst entwässert und der Feststoff der TDH zugeführt. Das Produkt wird als Hydrolysat bezeichnet und auf die FB 1 und 3 verteilt. Aus diesem Grund handelt es sich hierbei um einen faulungsinternen Strom.

Vor diesem Hintergrund ist auch die große Abweichung zwischen Input- und Output-Mengen in Tabelle 17 zu erklären. Um die Bilanz zu schließen, muss der bei der VEW anfallende Filtratstrom berücksichtigt werden.

Tabelle 17: Übersicht der In- und Outputströme für die gesamte Faulung IMP 2

	Strom	Wert	Einheit
INPUT	Gesamt Zufluss	12.393	[m ³ /21d]
	Gesamt Zufluss ÜSS	4.816	[m ³ /21d]
	Gesamt Zufluss PS	5.969	[m ³ /21d]
	Gesamt Zufluss Fett	574	[m ³ /21d]
	Gesamt Hydrolysat	1.034	[m ³ /21d]
OUTPUT	Gesamt Abfluss FS	8.676	[m ³ /21d]
	Gesamt Abfluss Filtrat	2.427	[m ³ /21d]

Die Ergebnisse der Mengenbilanzierung sind in Tabelle 18 dargestellt. Die Bilanz für die gesamte Faulung kann sehr gut geschlossen werden. Für die einzelnen Faulbehälter kann nur eine höhere Abweichung bei FB 3 beobachtet werden. In Abbildung 14 ist exemplarisch der Verlauf für FB 3 aufgezeigt. Aus der Abbildung kann erkannt werden, dass über den gesamten Bilanzierungszeitraum eine gleichbleibende prozentuale Abweichung zwischen den In- und Outputs vorlag. Dies lässt auf einen systematischen Fehler schließen. Es wird vermutet, dass die eingetragenen schlecht bilanzierbaren Fettmengen, die vorrangig in den FB 3 gegeben werden, zu den Abweichungen geführt haben.

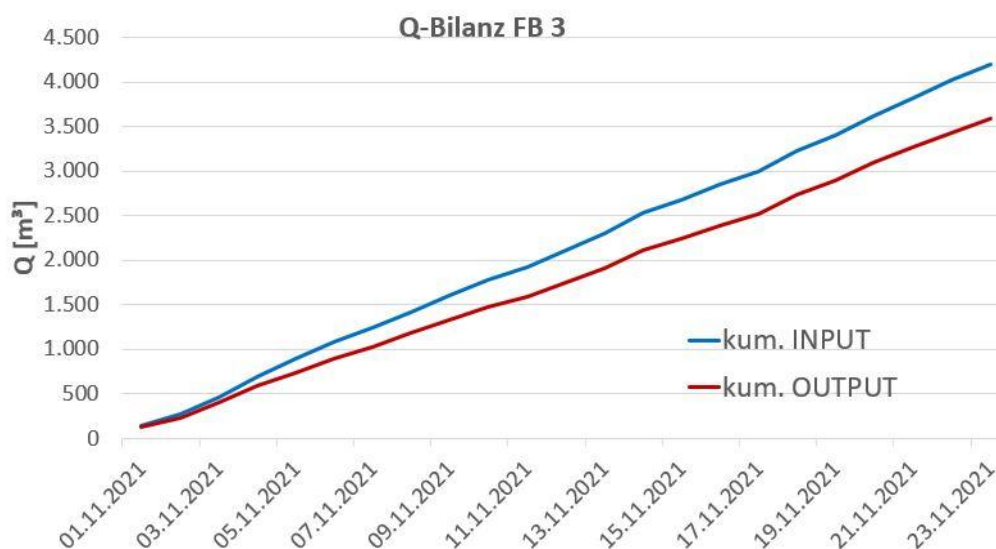


Abbildung 14: zeitlicher Verlauf der Q-Bilanzabweichungen für FB 3 IMP 2

Tabelle 18: Abweichungen der kumulativen Mengenbilanz IMP 2

Variante	Bilanz-Abweichung [%]
Q-Bilanz Gesamte Faulung	3,01
Q-Bilanz FB 1	-5,14
Q-Bilanz FB 2	4,74
Q-Bilanz FB 3	14,33
Q-Bilanz TDH	1,92
Q-Bilanz Nährstoffrückgewinnung	0,00

In Abbildung 15: Vergleich Input IDM und Output IDM FB 3 ist der Abgleich der Input- und Output-Ströme für FB 3 abgebildet. Hier ist eine Minderbestimmung des Faulschlamm IDMs zum Input-IDM um ca. 14,41% zu beobachten. Werden die anfallenden Mengen von ÜSS, PS und Hydrolysat mit den Beschickungsmengen der einzelnen FB verglichen, so decken sich die Messwerte der verschiedenen IDMs sehr gut. Wird das IDM im Zulauf der Zentrifugen zur Schlammentwässerung mit dem IDM im Ablauf FB 3 verglichen, ergibt sich wiederum ein Fehlbetrag. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass für die Mengenerfassung von Ablauf FB 3 eine Minderbestimmung vorliegt, welche für die weitere Bilanzierung berücksichtigt wurde.

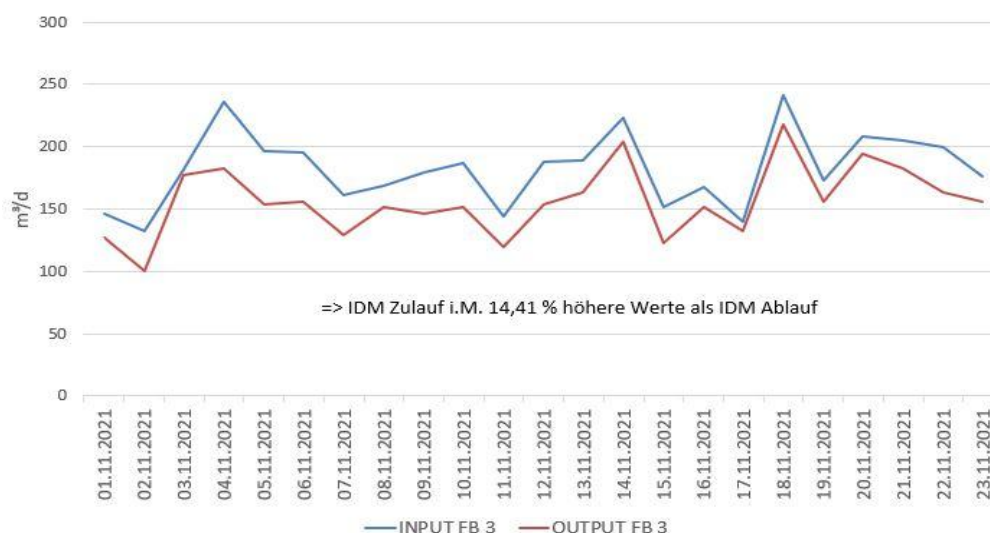


Abbildung 15: Vergleich Input IDM und Output IDM FB 3

3.5 Bilanzierung der organischen Fracht

Die Bilanzierung der organischen Fracht wird im Folgenden mittels zweier Summenparameter erstellt. Zum einen über den chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) sowie dem Total Organic Carbon (TOC). Bei der TOC-Bestimmung wird nur organischer Kohlenstoff erfasst. Durch die biologischen Umsetzungsvorgänge werden diese Fraktionen in anorganische Verbindungen (zumeist

Abschlussbericht

CO₂) umgewandelt. Aus diesem Grund muss eine geschlossene Bilanzierung des Gesamtkohlenstoffs (TC) erfolgen, welcher sich zusammensetzt aus dem Total-Inorganic-Carbon (TIC) sowie dem TOC.

Bei der Erstellung der Organischen (Org.)-Bilanzen sind, im Vergleich zu den Nährstoffbilanzen, zwei Stoffströme von großer Bedeutung. Dies ist zum einen das Co-Substrat (Fett) welches dem System zugeführt wird, und zum anderen das Faulgas, welches das System verlässt.

Das anfallende Faulgas ist überwiegend aus CO₂ und CH₄ zusammengesetzt. Für die CSB-Bilanzierung muss der enthaltene CSB im Methan und für die TC-Bilanzierung der CH₄-C und CO₂-C berücksichtigt werden.

Der zweite Stoffstrom, der bei der Org.-Bilanz eine wichtige Rolle spielt, ist der Input an Co-Substrat. Der Fettstrom fällt aufgrund seiner, im Vergleich zur N und P-Fracht, großen Fracht an Organik bei diesen Bilanzen vermehrt ins Gewicht. Des Weiteren ist der Anteil der Fette an der Biogasbildung groß. Jedoch sind Probenahme, Messungen und Analysen dieses Stoffstroms mit vielen Unsicherheiten belastet und stellen somit eine mögliche Fehlerquelle dar. In Gleichung 5 und Gleichung 6 sind exemplarisch für den TC die zu berücksichtigenden Schlamm- und Gasströme für die Faulung in IMP 1 dargestellt.

$$C_{\text{Input}} = \text{TOC}_{\text{PS}} + \text{IC}_{\text{PS}} + \text{TOC}_{\text{ÜSS}} + \text{IC}_{\text{ÜSS}} + \text{TOC}_{\text{Fette}} + \text{IC}_{\text{Fette}} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$C_{\text{Output}} = \text{TOC}_{\text{FS}} + \text{IC}_{\text{FS}} + \text{CO}_2\text{-C} + \text{CH}_4\text{-C} \quad (\text{Gl. 6})$$

mit:

PS = Primärschlamm

ÜSS = Überschussschlamm

Bei der TC-Bilanz konnte der TOC für das Fett, aufgrund der spezifischen Eigenschaften dieses Stoffstroms, mit den vorhandenen Geräten nicht bestimmt werden. Es wurde jedoch eine Abschätzung mittels der CSB-Werte sowie dem bekannten CSB/TOC-Verhältnis von Fett durchgeführt. Das CSB/TOC-Verhältnis ist eine typische Verhältniszahl mit einer Aussage über den Oxidationsgrad der organischen Kohlenstoffverbindungen. Für Fett liegt das Verhältnis ungefähr bei 3,7 g O₂/g C.

3.5.1 Org.-Bilanz IMP 1 (Referenz)

Wie eingangs erwähnt, findet der über die Gasphase ausgetragene CSB bzw. TC hier ebenfalls Betrachtung. Wie in Kapitel 3.4.1 bereits ausgeführt, konnte eine auffällige Gasminderbestimmung des IDMs bei FB 2 beobachtet werden. Ein Abgleich mit dem theoretischen Gasertrag zeigte eine Abweichung von 43 % auf. In Abbildung 16 ist exemplarisch der CSB-Bilanzverlauf für FB 2 dargestellt. Auf der linken Seite ist die Bilanzierung mit den Mengenwerten der IDM zur Gaserfassung dargestellt. Auf der rechten Seite ist die Bilanzierung mit der theoretischen Gasmenge aus dem oTR_{abgebaut} erstellt worden. Aus der Abbildung 16 wird die Minderbestimmung des IDMs und die daraus resultierende hohe Bilanzabweichung ersichtlich. Im Folgenden wird zudem eine Bilanzierung mit den Messwerten sowie eine mit dem errechneten Gasertrag für FB 2 dargestellt.

Abschlussbericht

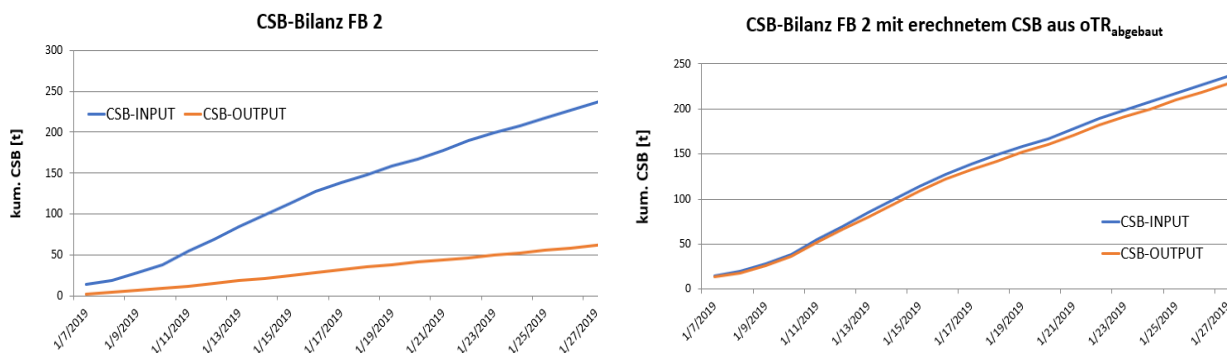


Abbildung 16: CSB-Bilanz mit gemessener Gasproduktion (links) und errechneter Gasproduktion (rechts)

In Tabelle 19 sind die CSB- und TC-Bilanzen mit der aufgezeichneten Gasproduktion des IDMs dargestellt. In Tabelle 20 sind die Bilanzen mit theoretischer Gasproduktion aus dem $oTR_{abgebaut}$ für FB 2 gegenübergestellt.

Tabelle 19: Abweichungen der kumulativen CSB- und TC-Bilanzen IMP 1 (Referenz) mit Gasproduktion aus IDM FB 2

Variante	CSB-Bilanz-Abweichung [%]	TC-Bilanz-Abweichung [%]
Bilanz gesamte Faulung	31,84	19,96
Bilanz FB 1	17,85	13,81
Bilanz FB 2	73,36	39,79
Bilanz FB 3	11,84	5,99

Tabelle 20: Abweichungen der kumulativen CSB- und TC-Bilanzen IMP 1 (Referenz) mit Gasproduktion FB 2 aus $oTR_{abgebaut}$

Variante	CSB-Bilanz-Abweichung [%]	TC-Bilanz-Abweichung [%]
Bilanz gesamte Faulung	12,07	12,44
Bilanz FB 1	17,85	13,81
Bilanz FB 2	3,51	19,10
Bilanz FB 3	11,84	5,99

Die Messwerte der IDM zur Gaserfassung von FB 2 sind eindeutig zu gering, wodurch die Bilanz eine vergleichsweise große Abweichung aufweist. Diese Abweichung wirkt sich auch auf die Bilanzabweichung der gesamten Faulung aus. Über die errechnete Gasmenge hingegen kann die

Abschlussbericht

CSB-Bilanz für FB 2 sehr gut geschlossen werden und auch für die Gesamt-Bilanz verringert sich die Abweichung auf knapp über 10 %.

Im Allgemein zeichnet sich die CSB-Bilanz für die einzelnen Faulbehälter durch relativ große Abweichungen aus. Hierfür kann ein Grund die Schwierigkeiten bei der Fett-Charakteristik und Erfassung liegen. Eine weitere Fehlerquelle stellt die nicht ausreichende Homogenisierung der Schlämme und die daraus resultierende die CSB-Analytik dar.

Die TC-Bilanzen lassen sich ebenfalls nicht ausreichend gut schließen. Einzige Ausnahme bildet hierbei FB 3 mit einer Bilanzabweichung von knapp 6 %. Für die gesamte Faulung kann nach der Korrektur der Gasmengen FB 2 in etwa die gleiche Bilanzabweichung wie bei der CSB-Bilanz beobachtet werden. Die TC-Bilanz für FB 2 kann auch nach der Korrektur der Gasproduktion keine zufriedenstellende Bilanzabweichung aufzeigen.

Da die Abweichungen der FB vom Bilanzierungsstart bis zum Bilanzierungsende konstant sind, kann ein systematischer Fehler in der Probenahme, Probenaufbereitung oder Probenanalytik vorliegen.

3.5.2 Org.-Bilanz IMP 2

Für die zweite IMP können die CSB- und TC-Bilanzen für die gesamte Faulung sehr gut geschlossen werden. In Tabelle 21 sind die Bilanzabweichungen der einzelnen Bilanzierungssysteme aufgelistet. Einzig bei FB 2 zieht sich über den gesamten Bilanzierungszeitraum eine konstante Bilanzabweichung von größer 10 % durch. Diese Tatsache deutet auf einen systematischen Fehler hin. In Abbildung 17 ist exemplarisch der graphische Verlauf für die TC-Bilanz der gesamten Faulung dargestellt.

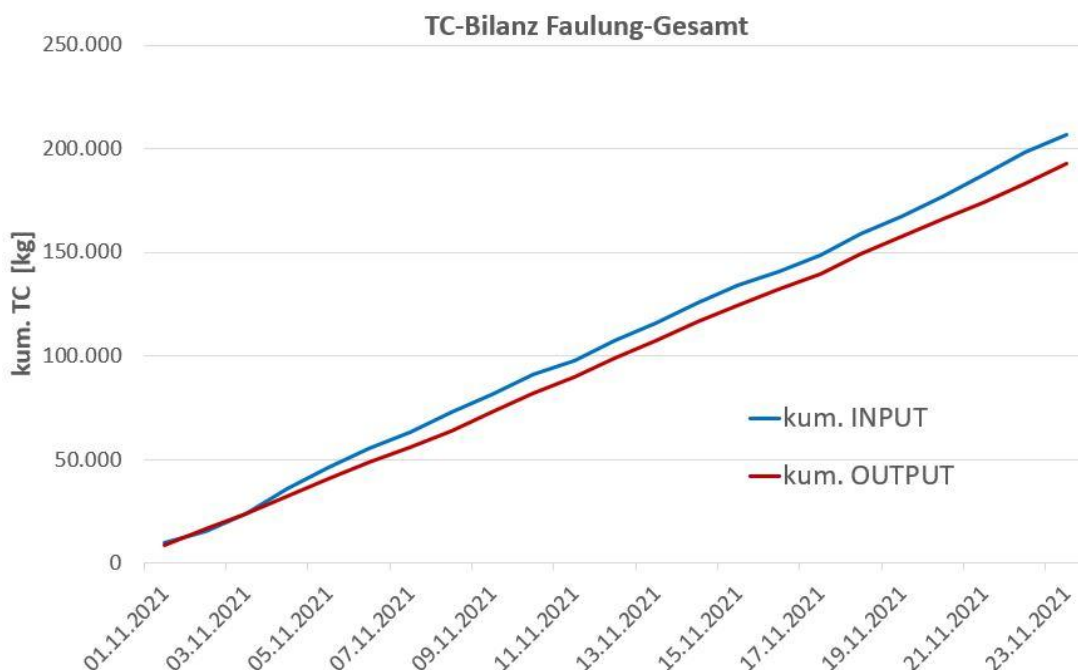


Abbildung 17: zeitlicher Verlauf der TC-Bilanzabweichungen gesamte Faulung IMP 2

Abschlussbericht

Tabelle 21: Abweichungen der kumulativen CSB- und TC-Bilanzen IMP 2

Variante	CSB-Bilanz-Abweichung [%]	TC-Bilanz-Abweichung [%]
Bilanz gesamte Faulung	8,29	6,74
Bilanz FB 1	0,59	6,58
Bilanz FB 2	0,07	11,96
Bilanz FB 3	2,43	6,99
Bilanz TDH	-9,91	n.b.*

* Da bereits die CSB-Bilanz negativ war und für die TC-Bilanz nicht alle Messdaten erfasst werden können. Für die Bewertung ist diese Bilanz von untergeordneter Bedeutung.

3.6 N-Bilanz

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Stickstoff-Bilanz für beide IMPs aufgeführt. Für die IMP 2 wurde zusätzlich eine Bilanz für die beiden Anlagen zur Nährstoffrückgewinnung erstellt.

3.6.1 N-Bilanz IMP 1

In Abbildung 18 ist beispielhaft der kumulative Verlauf für die Stickstoffbilanz von FB 2 dargestellt. Die gute Übereinstimmung ist exemplarisch für die gesamte Faulung und die N-Bilanz kann sehr gut geschlossen werden. Wie in Tabelle 22 dargestellt, fällt einzig die Bilanz für FB 1 mit einer größeren negativen Abweichung auf. Hierbei ist die Abweichung vom Bilanzierungsstart bis zum Bilanzierungsende konstant. Dies lässt auf einen systematischen Fehler in der Probenahme, Probenaufbereitung oder Probenanalytik schließen.

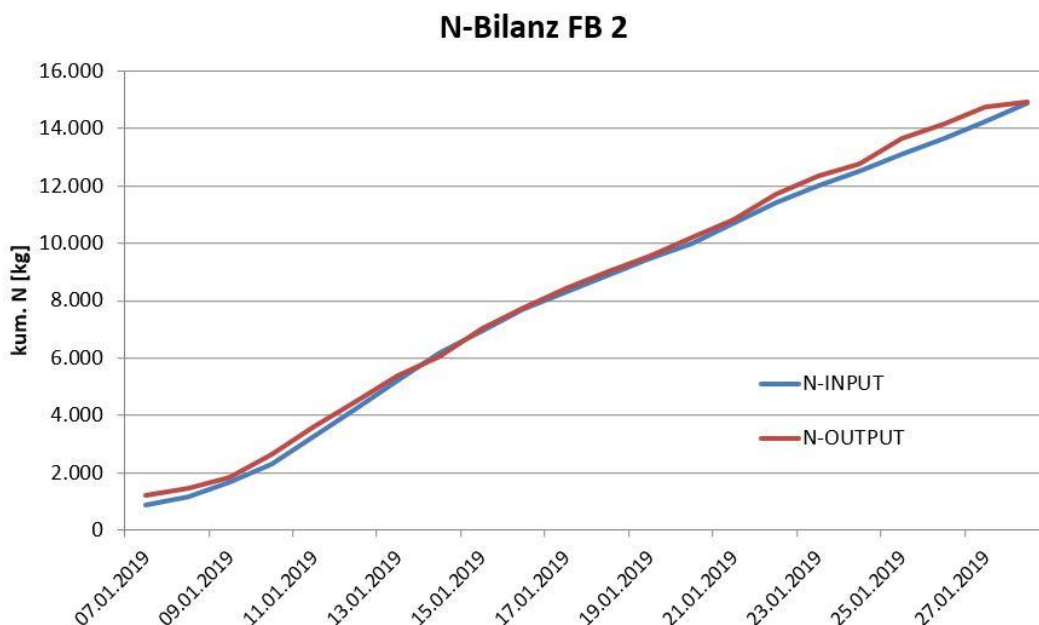


Abbildung 18: zeitlicher Verlauf der N-Bilanzabweichung FB 2 IMP 1

Tabelle 22: Abweichungen der kumulativen Stickstoff-Bilanz IMP 1 (Referenz)

Variante	Bilanz-Abweichung [%]
N-Bilanz gesamte Faulung	4,31
N-Bilanz FB 1	-19,75
N-Bilanz FB 2	-3,59
N-Bilanz FB 3	4,30

3.6.2 N-Bilanz IMP 2

Für die Stickstoffbilanzierung der IMP 2 sind die Bilanzabweichungen in Tabelle 23 zusammengefasst. Für die gesamte Faulung wird eine Bilanzabweichung von knapp 13,5 % im Bilanzierungszeitraum festgestellt. In Abbildung 19 ist der zeitliche Verlauf der kumulativen Input- und Output-Ströme dargestellt.

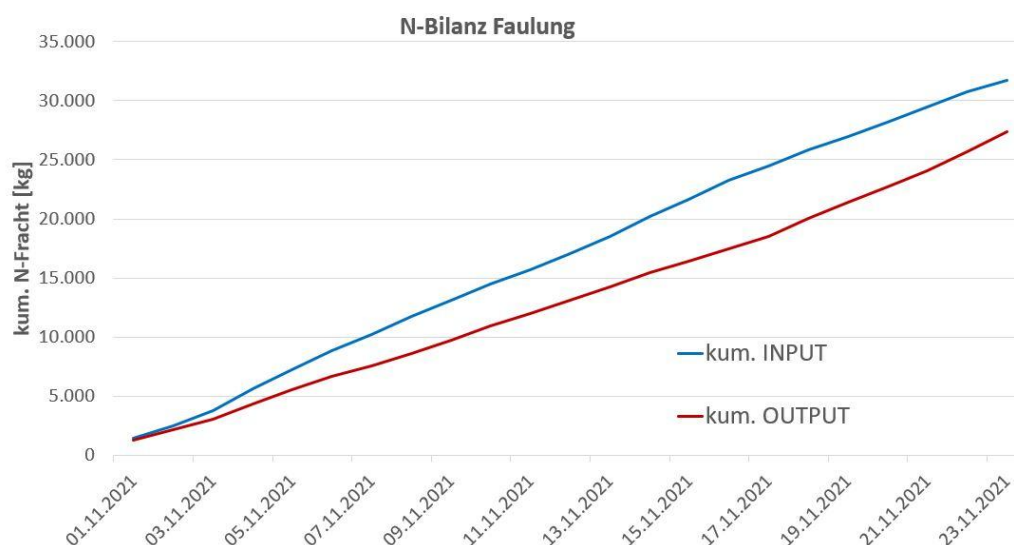


Abbildung 19: zeitlicher Verlauf der N-Bilanzabweichungen gesamte Faulung IMP 2

In Tabelle 23: Abweichungen der kumulativen Stickstoff-Bilanz IMP 2 sind insbesondere die großen Abweichungen für FB 2 und FB 3 von jeweils über 25 % auffällig. Hieraus resultiert die Bilanzabweichung der gesamten Faulung von über 10 %. Die konstant hohe Diskrepanz lässt auf einen systematischen Fehler schließen. Diese Beobachtung wiederholt sich ebenfalls bei der Phosphorbilanz (vgl. Kapitel 3.7). Bei den Faulbehältern kann alleinig für den thermophilen FB 1 eine sehr gute Bilanzierbarkeit mit einer negativen Abweichung von knapp 4 % festgestellt werden. Die TDH konnte ebenfalls mit einer geringen negativen Bilanzabweichung gut bilanziert werden.

Tabelle 23: Abweichungen der kumulativen Stickstoff-Bilanz IMP 2

Variante	Bilanz-Abweichung [%]
N-Bilanz gesamte Faulung	13,56
N-Bilanz FB 1	-4,04
N-Bilanz FB 2	27,61
N-Bilanz FB 3	25,77
N-Bilanz TDH	-4,94
N-Bilanz MAP-Fällung	0,00
N-Bilanz DAS-Strippung	0,00

In den neuen Stufen zur Nährstoffrückgewinnung konnten keine Bilanzabweichungen beobachtet werden. Für die MAP-Fällung wurden in die Bilanzierung Rechenwerte für die produzierte MAP-Menge aufgenommen. Da während des Bilanzierungszeitraums kein MAP aus dem Reaktor abgezogen wurde, musste die produzierte MAP-Menge aus dem Delta P_{zu} zu P_{ab} berechnet werden.

Insgesamt konnten in den beiden Stufen zur Nährstoffrückgewinnung ca. 2.700 kg N zurückgewonnen werden. In der Stufe zur DAS-Strippung konnten 2.350 kg N zurückgehalten und im Mittel eine Prozesseffektivität von 95,4 % N-Elimination verzeichnet werden. Bei der MAP-Fällung wurden 18,1 % des im Zulauf enthaltenen Stickstoffs im Produkt gebunden. Dies entspricht einer Menge von knapp 400 kg N. Diese Angaben beziehen sich lediglich auf einen verkürzten Bilanzierungszeitraum, da aus betrieblichen Gründen die Module zur Nährstoffrückgewinnung lediglich vom 05.11.2021 bis zum 23.11.2021 im Zuge der IMP 2 betrieben werden konnten.

3.7 P-Bilanz

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Phosphor-Bilanz für beide IMPs aufgeführt. Für die IMP 2 wurde zusätzlich eine Bilanz für die MAP-Fällung erstellt.

3.7.1 P-Bilanz IMP 1 (Referenz)

In Abbildung 20 sind die Verläufe der P-Input und P-Output-Ströme für das Gesamt-System Faulung dargestellt. Die gute Übereinstimmung beider Kurven über den gesamten Bilanzierungszeitraum belegt die gute Bilanzierbarkeit bezüglich dieses Parameters.

In Tabelle 24 sind die Bilanzabweichungen der einzelnen FB dargestellt. Mit Ausnahme von FB 1 lassen sich alle Bilanzen sehr gut schließen. Auffällig ist hierbei, dass bei FB 1 alleinig eine negative Bilanzabweichung zu beobachten ist. Dies bedeutet, dass die Output-Fracht den Input übersteigt.

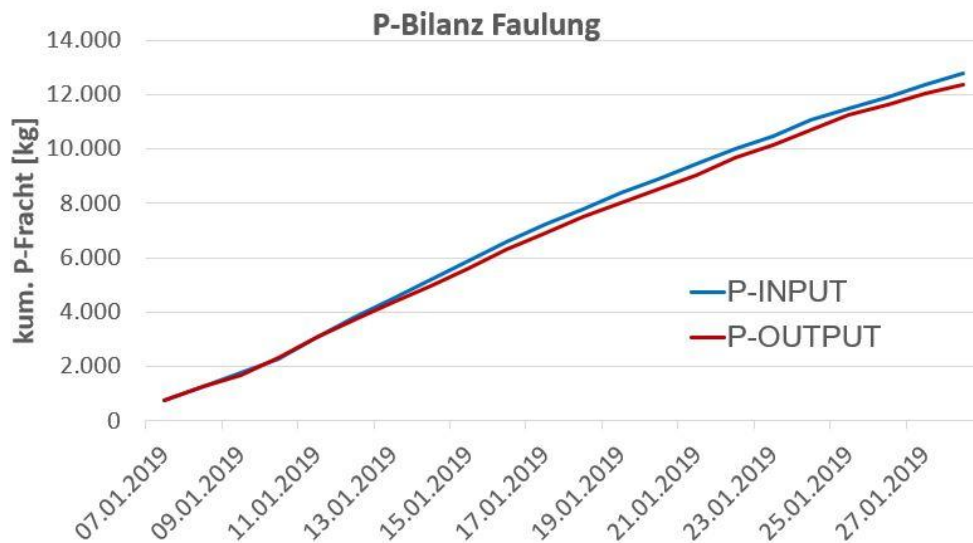


Abbildung 20: zeitlicher Verlauf der P-Bilanzabweichungen gesamte Faulung IMP 1

Tabelle 24: Abweichungen der kumulativen Phosphor-Bilanz IMP 1 (Referenz)

Variante	Bilanz-Abweichung [%]
P-Bilanz gesamte Faulung	3,50
P-Bilanz FB 1	-13,95
P-Bilanz FB 2	8,47
P-Bilanz FB 3	8,66

3.7.2 P-Bilanz IMP 2

Bei der Phosphorbilanz für die IMP 2 konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden, wie bereits bei der N-Bilanzierung in der IMP 2. Auffällig sind wiederum die großen Bilanzlücken bei FB 2 und FB 3 sowie, daraus resultierend, der gesamten Faulung. Einzig bei dem thermophilen FB 1, sowie der TDH lassen sich die Bilanzen zufriedenstellend schließen. Die Bilanzabweichungen sind in Tabelle 25 aufgelistet. In Abbildung 21 ist der zeitliche Verlauf der Bilanzabweichung für die gesamte Faulung dargestellt. Die konstant hohen Abweichungen über fast den gesamten Bilanzierungszeitraum lassen auf einen systematischen Fehler schließen.

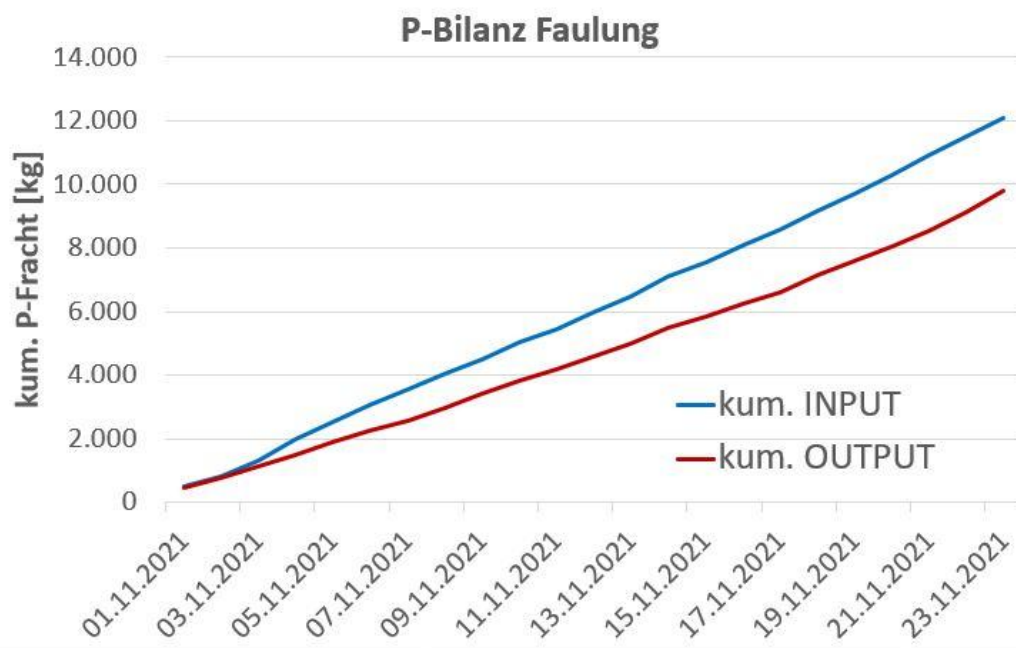


Abbildung 21: zeitlicher Verlauf der P-Bilanzabweichungen gesamte Faulung IMP 2

Tabelle 25: Abweichungen der kumulativen Phosphor-Bilanz IMP 2

Variante	Bilanz-Abweichung [%]
P-Bilanz Gesamte Faulung	18,98
P-Bilanz FB 1	-5,76
P-Bilanz FB 2	19,39
P-Bilanz FB 3	13,95
P-Bilanz TDH	-7,76
P-Bilanz MAP-Fällung	0,00

In der Stufe zur gezielten P-Eliminierung konnten wiederum keine Bilanzabweichungen festgestellt werden. Da während des Bilanzierungszeitraums kein MAP aus dem Reaktor abgezogen wurde, musste die produzierte MAP-Menge aus dem Delta P_{zu} zu P_{ab} berechnet werden. Es konnten rund 710 kg P aus dem Filtrat gefällt werden. Dies entspricht einer Struvitmenge von ca. 5.700 kg, welche im Fällungs-Reaktor zurückgehalten wurde. Die mittlere Effektivität des Prozesses lag für den Parameter PO_4 -P bei 71 % und für NH_4 -N bei 18,1 %. In Abbildung 22 ist der beschriebene Zusammenhang über den zeitlichen Verlauf dargestellt. Diese Angaben beziehen sich lediglich auf einen verkürzten Bilanzierungszeitraum, da aus betrieblichen Gründen die Module zur Nährstoffrückgewinnung lediglich vom 05.11.2021 bis zum 23.11.2021 im Zuge der IMP 2 betrieben werden konnten.

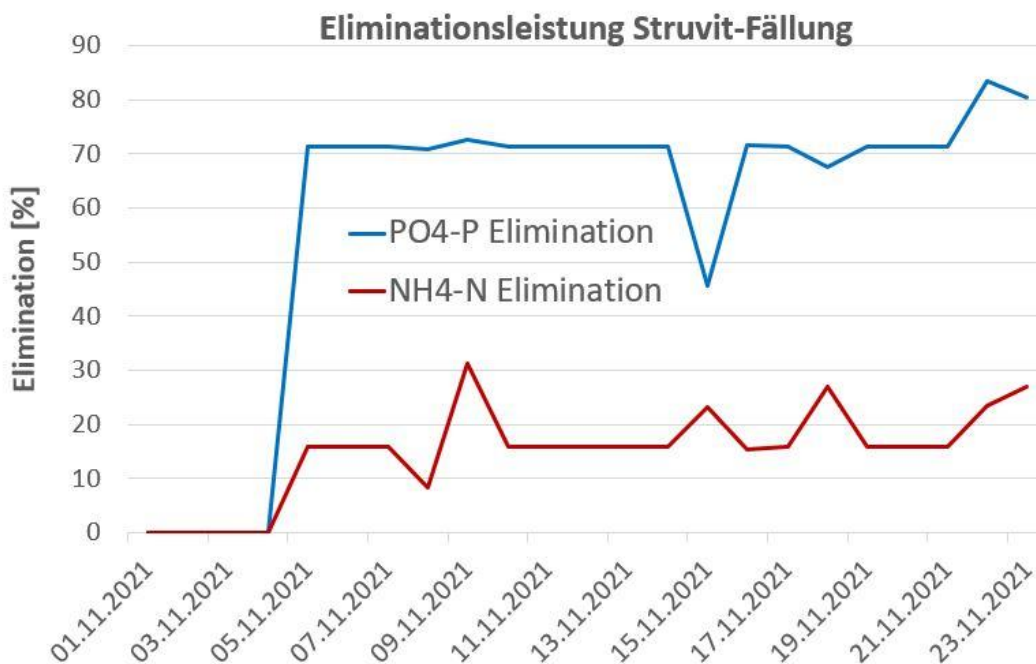


Abbildung 22: Nährstoffelimination der Struvit-Fällung während IMP 2

3.8 Fazit und Zusammenfassung der Bilanzen beider IMPs

In Tabelle 26 sind die Bilanzabweichungen für das Gesamt-System Faulung zusammengefasst. In der ersten IMP können sämtliche Bilanzen bis auf die CSB- und TC-Bilanz geschlossen werden. Ursächlich hierfür sind die Unsicherheiten, die mit der Beschickung und Analyse der Fette sowie der ungenauen Gasmengenmessung zusammenhängen.

Für die zweite IMP lassen sich einzig die Nährstoffbilanzen bezüglich der Parameter N und P für die gesamte Faulung nicht zufriedenstellend schließen. Als ein möglicher Erklärungsansatz könnte eine Ausfällung von Struvit in den FB 2 und FB 3 ggf. in Frage kommen. Durch die getrennte anaerobe Behandlung der Schlämme sowie den erweiterten Zellaufschluss durch die TDH liegen erhöhte gelöste P-Konzentrationen in den FS vor. Infolgedessen kann es ggf. zu einer Übersättigung und Ausfällung der gelösten Phosphat- und Ammonium-Ionen mit dem vorhandenen gelösten Magnesium kommen. Dass im Ablauf der FB nur eine sehr geringe Magnesium-Konzentration zu beobachten ist, kann als weiteres Indiz für diesen Erklärungsansatz angeführt werden.

Tabelle 26: Übersicht Bilanzabweichungen der IMPs bezogen auf die gesamte Faulung

Faulung	IMP 1	IMP 2
Q-Bilanz	7,80	3,01
CSB-Bilanz	12,07	8,29
TC-Bilanz	12,44	6,74
N-Bilanz	4,31	13,56
P-Bilanz	3,50	18,98

Abschlussbericht

Durch die Bilanzierung konnten ungenaue Mengenmessungen identifiziert und behoben werden. Der überwiegende Teil der Analyse-Daten konnte auf Grundlage der Bilanzierung als valide und gesichert angenommen werden. Insbesondere die neuen Anlagenteile der Nährstoffrückgewinnung sowie der TDH weisen eine sehr gute Bilanzierbarkeit auf. Auf Grundlage der beiden Datensätze aus den IMPs werden im Folgenden die Auswirkungen der neuen Verfahrensstufen auf die Kläranlage ermittelt (vgl. Tab. 31, Kap. 3.9.1).

3.9 Vergleich IMPs

Im Folgenden sollen Aspekte, die im Vorfeld des Projekts formuliert und letztendlich zur Implementierung der erweiterten Anlagenstufen geführt haben, Betrachtung finden. Insbesondere die Auswirkung der TDH auf die Gasproduktion der Faulung sowie der Effekt der Nährstoffrückgewinnungsstufen auf die interne N- und P-Rückbelastung werden untersucht.

3.9.1 Reduzierung der Rückbelastung

Durch die Inbetriebnahme der erweiterten Verfahrensschritte ändert sich die Zusammensetzung der einzelnen Ströme, welche in die Kläranlage zurückgeführt werden (vgl. Tabelle 27). In Summe ergeben diese Ströme mit den jeweilig transportierten Frachten die gesamte Rückbelastung. In Tabelle 28 und Tabelle 29 sind die maßgeblichen Ströme der IMP 1 und IMP 2 sowie die maßgeblichen Frachten für die beiden IMPs dargestellt.

Tabelle 27: Zusammensetzung der internen Rückbelastung der jeweiligen IMPs

	Ströme der internen Rückbelastung
Rück _{IMP1}	$\sum (Zentrats_{SE} + Zentrats_{SEW})$
Rück _{IMP2}	$\sum (Zentrats_{SE} + Zentrats_{SEW} + 1.Filtrat_{VEW} + DAS_{Ablauf})$

mit:

Zentrats_{SE} = Zentrat Überschussschlammeindickung

Zentrats_{SEW} = Zentrat Faulschlammwässerung (FB 1 und FB 3)

1.Filtrat_{VEW} = Filtrat Schneckenpresse Presszone FS Eindickung

DAS_{Ablauf} = Ablauf Nährstoffrückgewinnung

Tabelle 28: Rückbelastung durch die einzelnen Ströme IMP 1 (Referenz)

Rückbelastung Gesamt IMP 1 nach 21d	Q [m³]	N-Fracht [kg]	Anteil N [%]	P-Fracht [kg]	Anteil P [%]
Zentrats _{SE}	45.600	4.701	22,26	1.855	47,66
Zentrats _{SEW}	10.655	16.421	77,74	2.037	52,34
SUMME	56.255	21.122	100	3.892	100

Tabelle 29: Rückbelastung durch die einzelnen Ströme IMP 2

Rückbelastung Gesamt IMP 2 nach 21d	Q [m ³]	N-Fracht [kg]	Anteil N [%]	P-Fracht [kg]	Anteil P [%]
Zentrats _{SE}	41.485	1.106	7,64	2.273	61,78
Zentrats _{SEW}	9.581	12.642	87,35	896	24,35
Filtrat _{VEW,Presszone}	485	614	4,24	208	5,6
DAS _{Ablauf}	2.311	110	0,76	302	8,2
SUMME	53.862	14.472	100	3.679	100

In der IMP 2 wurde, anders als geplant, das Zentrats der SEW nicht der Nährstoffrückgewinnung zugeführt. Ursächlich hierfür war der hohe Feststoff- und Organik-Anteil. Der maßgebliche Teilstrom, welcher zu einer Reduktion der Rückbelastung beiträgt, ist das Filtrat der Vorentwässerung des FS 2. Die Fracht dieses Teilstroms war in der IMP 1 in den Strom Zentrats_{SEW} integriert. Aus diesem Grund ist die Reduktion der N- und P-Rückbelastung insgesamt geringer ausgefallen, da nur ein Teilstrom der ursprünglich geplanten Menge einer Behandlung zugeführt werden konnte.

Im Vergleich der beiden IMPs fällt eine große Diskrepanz bei der N-Fracht im Zentrats_{SE} auf. Diese liegt an der wesentlich geringeren Konzentration an TKN in der IMP 2. Während in der IMP 1 eine tägliche TKN-Fracht von 213 kg/d (Mittelwert = 101 mg/l) zu bilanzieren war, lag dieser Wert in IMP 2 lediglich bei 48,5 kg/d (Mittelwert = 26 mg/l). Einhergehend mit der Reduktion des TKN ist ebenfalls eine Verringerung der AFS im Zentrats_{SE} über die beiden IMPs. Während bei IMP 1 noch eine AFS-Konzentration von 1.254 mg/l gemessen wurde hat sich dieser Wert in IMP 2 auf 710 mg/l reduziert. Hier ist insbesondere ab dem ersten Drittel der IMP 2 ein sich stetig verbessernder Abscheidegrad zu verzeichnen. Ursächlich hierfür ist der Austausch der Eindick-aggregate zwischen IMP 1 und IMP 2.

Die Reduktion im Zentrats_{SEW} bezüglich der Parameter N und P ist in Tabelle 30 abgebildet. Ab Herbst 2022 soll das mittels Flotation von den partikulären Stoffen gereinigte Zentrats_{SEW} ebenfalls der Nährstoffrückgewinnung zugeführt werden. Hierdurch wird mit einer weiteren, deutlichen Abnahme der N- und P-Rückbelastung gerechnet.

Da das Zentrats_{SEW} bereits durch den Strom Filtrat_{VEW} entfrachtet wurde, muss, um die Rückbelastung aus der Faulung in IMP 2 abzubilden, der Volumenstrom Filtrat_{VEW,Presszone} sowie DAS_{Ablauf} mit einbezogen werden. Die Rückbelastung ergibt sich aus Tabelle 30.

Tabelle 30: Entwicklung der Frachten im Zentrats_{SEW} über die IMPs

	N-Fracht [kg]	P-Fracht [kg]
Zentrats _{SEW} IMP 1 (Referenz)	16.421	2.037
Zentrats _{SEW} + Filtrat _{VEW} + DAS _{Ablauf} IMP 2	13.366	1.406
Reduktion [kg]	-3.055	- 631
Reduktion [%]	-19	- 31

Aus Tabelle 30 ist weiterhin der Effekt der beiden Stufen zur Nährstoffrückgewinnung auf die Rückbelastung erkennbar. Somit war die Reduktion von 19 % bei N sowie 31 % bei P zu beobachten. In Tabelle 31 sind die absoluten Rückbelastungen sowie die Frachten bezogen auf die Kläranlagen-Zulauf-Frachten dargestellt. Absolut konnte die N-Rückbelastung um knapp 31 % und die P-Rückbelastung um 5 % reduziert werden.

Tabelle 31: Rückbelastung in IMPs bezogen auf Kläranlagen Zulauf über 21d

	Q _{KA,Zu} [m ³ /h]	N-Fracht- Rück. [kg]	N-Fracht KA _{zu} [kg]	Anteil N _{Rück.} be- zogen auf Fracht KA _{zu} [%]	P- Fracht _{Rück.} [kg]	P- Fracht KA _{zu} [kg]	Anteil P _{Rück.} bezogen auf Fracht KA _{zu} [%]
IMP 1 (Refe- renz)	2.386	21.122	101.132	20,88	3.892	13.071	29,77
IMP 2	1.937	14.472	86.658	16,7	3.679	14.608	25,18
Reduktion [kg]		- 6.650	14.474		-213	+1.537	
Reduktion [%]		- 31,5	14,3		-5,46	+ 11,7	

3.9.2 Steigerung der Gasproduktion

Die Gasproduktion der IMP 2 ist in Abbildung 23 über den Bilanzierungszeitraum dargestellt.

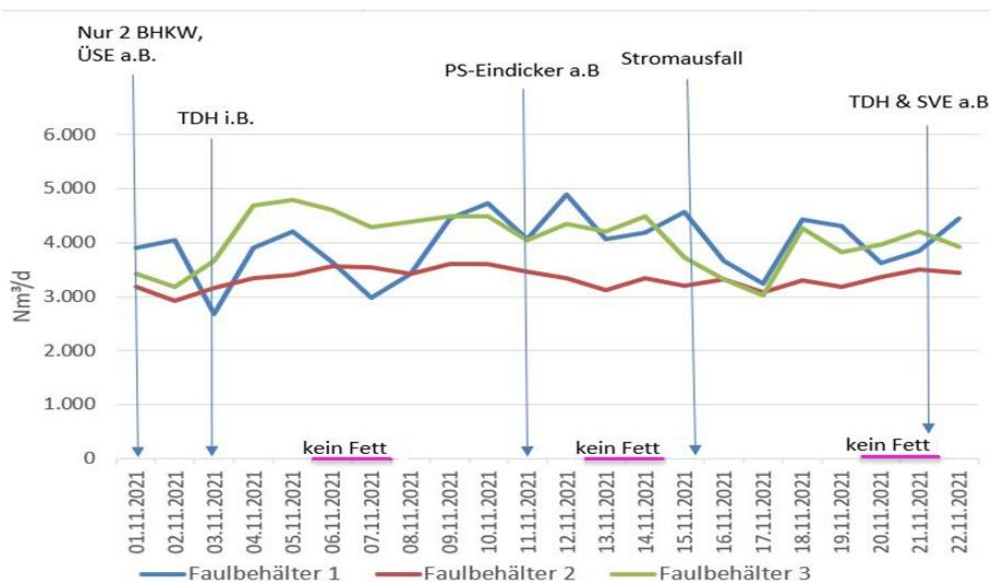


Abbildung 23: Gasproduktion der FB IMP 2

Um die Gasproduktion zu normieren, wurde diese auf den zugeführten oTR bezogen. Der Wirkungsgrad η_{oTR} gibt an, wie weitgehend der Abbau der zugeführten organischen Substanzen abläuft. In Tabelle 32 sind die maßgeblichen Mess- und Rechenwerte bezogen auf die gesamte Faulung aufgelistet.

Tabelle 32: Unterschiede in der Gasproduktion der IMPs für die Faulung über 21d

	oTR-INPUT [kg]	Biogas produziert [m ³]	spezifische Gasproduktion [NI/kg oTR _{zu}]	η_{oTR} [%]	Steigerung spez. Gasproduktion IMP 2 zu IMP 1
IMP 1 (Referenz)	510.802	218.717	428,18	58,1	+23,38 %
IMP 2	493.606	260.769	528,29	63,7	

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, konnte die absolute Menge des produzierten Faulgases um 42.052 m³ gesteigert werden. Der Wirkungsgrad des Abbaus der organischen Substanzen hat um 5,6 Prozentpunkte zugenommen. Damit einhergehend war eine verbesserte spezifische Gasproduktion von knapp 100 NI/kg oTR_{zu} Mehrertrag feststellbar. Zusammenfassend münden diese Beobachtungen in einem Gasmehrertrag von mehr als 23 % nach Inbetriebnahme der TDH im Vergleich zu der Zeit davor.

Abschlussbericht

3.9.3 Produktion eines N- und P-Düngers

Während der IMP 2 konnten pflanzenverfügbare Düngemittel in Form von Struvit als P-Dünger, sowie Diammoniumsulfat (DAS) als N-Dünger hergestellt werden. Die Elimination und Überführung des N aus dem Filtratstrom in das DAS-Produkt hat sehr gut und betriebssicher funktioniert. Insgesamt beläuft sich die Produktion an DAS während der IMP 2 auf rund 16 m³. Die N-Eliminationsleistung war mit über 95 % wie erwartet hoch.

Auch wenn während der IMP 2 kein Struvit geerntet wurde, konnte die Struvit-Fällung bzgl. der Überführung des gelösten PO₄-P in die partikuläre Form erfolgreich betrieben werden. Anhand der Abnahme des gelösten Phosphats, Ammoniums sowie des Magnesiumverbrauchs konnte die entstandene Menge an Struvit von rund 5,7 t berechnet werden. Die P-Eliminationsrate lag im Mittel mit 71 % unterhalb der angestrebten Rate von > 80 %.

Die Proben des Produkts wurden mikroskopisch untersucht und die Kristalle als MAP-typisch identifiziert (vgl. Abbildung 24).

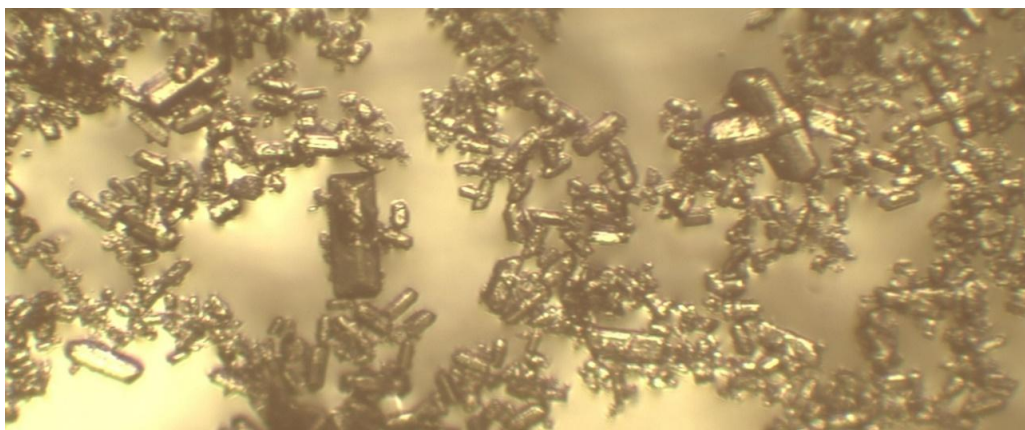


Abbildung 24: 10-fache Vergrößerung produziertes Struvit IMP 2 (Bild A.Kolb)

Des Weiteren konnte im Fällprodukt die stöchiometrische Zusammensetzung von P: N: Mg von 1:1,02:1,08 gefunden werden. Dies entspricht fast der theoretischen Zusammensetzung von Struvit von P: N: Mg von 1:1:1. Des Weiteren konnten keinerlei Schadstoffe nachgewiesen werden, siehe Kapitel 3.10.6. Das MAP lag überwiegend als amorphes Produkt mit geringer Kristallgröße vor. Aufgrund dieser Beobachtungen bedurfte es einer weiteren Phase der Prozessoptimierung und Anpassung, vgl. auch Kap. 2.3.6. Insbesondere die Rückgewinnungsrate weist hierfür ein großes Potential auf.

Beide Düngemittelprodukte wurden in Laboren auf deren Inhaltsstoffe analysiert. Die Ergebnisse bezogen auf die jeweiligen Hauptnährstoffe sind in Tabelle 33 dargestellt, Schadstoffe siehe, Kap. 3.10.6).

Tabelle 33: Mittelwerte der Laboranalysen für die jeweiligen Düngemittel IMP 2

	TR [%]	P _{ges} [g/kg TR]	NH ₄ -N [g/kg TR]	Mg [g/kg TR]	Ca [g/kg TR]	K [g/kg TR]	S [g/kg TR]	SO ₄ [g/kg TR]
Struvit	44	114	53	97	4,39	1,34	0,156	n.b.
ASL	41	< 0,001	104	0,003	0,05	0,002	3,49	290

Im Laufe des Teilprojektes 4 (Düngemittelaufbereitung) konnte die Qualität und Quantität der Produkte durch in Kapitel 2.3.6 umgesetzte, verfahrenstechnische und konstruktive Optimierungen an den Nährstoffrückgewinnungsanlagen deutlich verbessert werden. Zum einen konnte der Phosphor- und Magnesiumgehalt im Struvit gesteigert werden. Zum anderen wurde die produzierte Menge ASL von ca. 60 t im Jahr auf 53 t pro Monat deutlich erhöht.

Tabelle 34: Mittelwerte der Laboranalysen für das TP4 nach Prozessumstellungen (November-Dezember 2024)

	TR [%]	P _{ges}	N _{ges}	Mg	Ca	K	S	Menge [t]
Struvit [g/kgTR]	88	125	51	111	3,45	2,29	70,8	5
ASL [mg/l]	n.b.	u. B.	81.000	3,25	48,16	1,705	n.b.	53

3.9.4 Reduktion der zu entsorgenden Schlammmenge sowie Verbesserung der Entwässerbarkeit

In Tabelle 35 ist der mittlere TR, sowie die zu entsorgende Schlammmenge über den Bilanzierungszeitraum aufgeführt. Der TR konnte um 1,8 Prozentpunkte gesteigert und die zu entsorgende Schlammmenge um 286 t reduziert werden.

Tabelle 35: Zu entsorgende Schlammmenge in beiden IMPs

	mittlerer TR [%]	zu entsorgende Schlammmenge [t/21d]
IMP 1 (Referenz)	22,1	1.100
IMP 2	23,9	814

3.10 Sonderanalytik

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Sonderanalytik dargestellt.

3.10.1 Bestimmung des reaktionären $CSB_{f,ref.}$ mittels modifiziertem Zahn-Wellens-Test (ZWT)

Der Anteil am gelösten CSB, der unter aeroben Bedingungen nicht abgebaut werden kann, entspricht dem schwerabbaubaren, refraktionären $CSB_{f,ref.}$. Zur Bestimmung dieses Anteils wird vom ISWW der modifizierte ZWT eingesetzt.

Abschlussbericht

Diese Untersuchung erfolgte vor dem Hintergrund, dass mit dem Betrieb einer TDH, neben den positiven Effekten auf den Schlamm sowie den Gasertrag, die Freisetzung von schwer abbaubaren refraktionärem $CSB_{f,ref.}$ einhergeht. Als Teil des Hydrolysats gelangen diese $CSB_{f,ref.}$ -Fraktionen in die anaerobe Schlammbehandlung. Nach der Schlammmentwässerung werden die schwerabbaubaren, gelösten Stoffe über das Zentrats_{SEW} zurück in den Kläranlagenzulauf gegeben und durchlaufen die Reinigungsstufen.

Der Anteil am $CSB_{f,ref.}$, welcher während der durchschnittlichen hydraulischen Aufenthaltszeit von ca. 24h nicht aerob abgebaut werden kann, gelangt mit dem Ablauf der Nachklärung in die Vorfluter. Dies hat zum einen Folgen auf die Systeme in der Natur und kann u.U. die CSB-Ablauf Grenzwerte gefährden.

Durch den modifizierten Zahn-Wellens-Test (ZWT) wird die aerobe Abbaubarkeit des gelösten CSB_f bestimmt. Im Labor werden, unter Verwendung des lokalen Belebtschlammes, die aeroben Bedingungen der Kläranlage simuliert. Die Randbedingungen wie bspw. Sauerstoffkonzentration und pH-Wert werden täglich kontrolliert und bei Bedarf reguliert. Am Ende eines Versuchs wird der CSB_f bestimmt und der Abbau bezogen auf den Anfangs- CSB_f ermittelt. Dieser CSB_f wird, bereinigt vom Anteil des Blindansatzes, als schwerabbaubarer $CSB_{f,ref.}$ eingestuft.

Durch den ZWT soll eine Aussage bezüglich der möglichen Zunahme an inerten $CSB_{f,ref.}$ im Kläranlagenablauf nach Inbetriebnahme der TDH getroffen werden. Zu diesem Zweck wurde im ISWW während der IMPs wöchentlich ein ZWT-Versuch eingebaut, überwacht und beprobt. Die Aussagen bezüglich der Rückbelastung beziehen sich auf die Mittelwerte aus den drei Versuchsreihen. In Tabelle 36 sind die Ergebnisse der Untersuchungen sowie die für die Berechnung zugrunde gelegten Randbedingungen dargestellt.

Mit den Ergebnissen des ZWT wurde eine Berechnung der inerten $CSB_{f,ref.}$ -Frachten in den Kläranlagenzulauf vorgenommen. Unter Berücksichtigung des Verdünnungseffektes durch den Kläranlagenzulauf kann der Anteil abgeschätzt werden, welcher nach Durchlaufen der Belebungsstufe im Ablauf der Kläranlage auftritt.

Tabelle 36: Ergebnisse ZWT Anteile inerter CSB im Zentrat

	$Q_{Zentrat}$ [m ³ /d]	Fracht- $CSB_{f,Zentrat}$ [kg/d]	Anteil CSB_{i-} $nert,Zentrat,ZWT$ [%]	Fracht- $CSB_{inert,Zentrat}$ [kg/d]	Zulauf KA [m ³ /d]	Anteil CSB_{i-} $nert,Zentrat,Ablauf$ KA [mg/l]
IMP 1 (Referenz)	517 m ³ /d	1.390	61	848	57.263	14,8
IMP 2	405 m ³ /d	874	67	586	42.895	13,6

Der inerte Anteil im Zentrat SEW hat von IMP 1 zu IMP 2 von 61 % auf 67 % zugenommen. Allerdings hat sich die Zentrat-Menge reduziert und so konnten für beide IMPs ähnlich hohe Anteile von inerten $CSB_{f,ref.}$ im Kläranlagenablauf bestimmt werden. Der berechnete Anteil an inerten $CSB_{f,ref.}$ im Ablauf der KA lag in der ersten IMP mit 14,8 mg/l leicht über dem Wert der IMP 2

Abschlussbericht

mit 13,6 mg/l. Aus diesem Grund ist zu dem Zeitpunkt der IMP 2 keine Zunahme von inerten $CSB_{r,ref.}$ im Kläranlagenablauf aufgrund des Betriebs der TDH zu beobachten.

3.10.2 Dynamische Viskosität

Am ISWW wurden die Messungen zur dynamischen Viskosität mit einem Rheometer *Rheo-stress1* von der Firma Thermofischer durchgeführt. Um eine normierte Viskositätsmessung der Klärschlammproben zu ermöglichen, wurden die Proben zunächst durch einen Siebvorgang (Maschenweite=1 mm) homogenisiert. Nach der Siebung wurde der Feststoffgehalt durch Zentrifugation auf 5 % eingestellt. Anschließend wurde die Viskosität mit Hilfe eines koaxialen Zylinder-Systems gemessen.

In der IMP 2 wurde zusätzlich zu den FS 1-3 das Hydrolysat sowie der eingedickte Überschussschlamm vermessen. In Tabelle 37 sind die Ergebnisse der Messung aufgelistet. Für die FB 1 und FB 3 hat die Viskosität im Vergleich von IMP 1 zu IMP 2 zugenommen. Bei FB 2 abgenommen. Dies könnte das Beschickungsregime widerspiegeln. FB 2 wurde während der IMP 2 nur mit $\ddot{U}SS_d$ beschickt, wodurch sich die Viskosität angepasst hat. Den FB 1 und FB 3 wurde das von der TDH erzeugte Hydrolysat zugeführt. Hierbei ist zu beachten, dass 2/3 des Hydrolyсата auf FB 3 und nur 1/3 auf FB 1 verteilt wurde. Dies spiegelt sich in der Viskosität der jeweiligen Schlämme wider.

Tabelle 37: Vergleich der dynamischen Viskosität der Schlämme für beide IMPs

	IMP 1 (Referenz) [mPa*s]	IMP 2 [mPa*s]
FS 1	72	150
FS 2	202	159
FS 3	78	294
Hydrolysat	n.b.	250
$\ddot{U}SS_d$	n.b.	165

3.10.3 Partikelgrößenverteilung

Für beide IMPs wurden die Partikel in den Faulschlammproben vermessen. Für IMP 2 wurde die Untersuchung auf den $\ddot{U}SS_d$ sowie das Hydrolysat ausgedehnt. In Tabelle 38 sind die Ergebnisse der Messungen aufgelistet. Zu den Einschränkungen dieser Untersuchung ist zu sagen, dass in beiden IMPs unterschiedliche Geräte verwendet wurden. In IMP 1 wurde der Laserscanner PSyA5.21 der Fa. MTS, Düsseldorf eingesetzt. Für die IMP 2 stand dieses Gerät nicht mehr zur Verfügung, weshalb via dynamische Bildanalyse mit dem Gerät QICPIC der Firma Sympatec gearbeitet wurde. Aus diesem Grund sind die Messungen nur bedingt vergleichbar.

Abschlussbericht

Tabelle 38: x_{50} der Partikelgrößenverteilung der Schlämme für beide IMPs

	IMP 1 (Referenz) [μm]	IMP 2 [μm]
FS 1	58,5	78,4
FS 2	25,5	121,4
FS 3	37,2	72,6
Hydrolysat	n.b.	121,9
ÜSS _d	n.b.	89,4

3.10.4 Entwässerungskennwert TR(A)

Der Entwässerungskennwert TR(A) ist eine Vorhersage des maximal erreichbaren Ergebnisses bei einer maschinellen Entwässerung. Es wird davon ausgegangen, dass nur der freie Wasseranteil bei einer maschinellen Entwässerung abgetrennt werden kann. Für die Messung werden die Klärschlammproben zuerst in der Zentrifuge aufbereitet (30 min, 3000 rpm). Der Bodensatz wird apparativ unter definierten und konstanten Randbedingungen getrocknet (Luftaustausch: 30 ml getrocknete Luft/min, Temperatur 35 °C). Aus dem Kurvenverlauf der Trocknungsrate wird die Gewichtsabnahme des Schlammes pro Zeiteinheit ermittelt.

In Abbildung 25 ist beispielhaft der Trocknungsverlauf einer Faulschlammprobe aus IMP 2 dargestellt. Die Trocknungskurve beginnt zeitlich oben rechts bei einem hohen Feuchtegehalt ($\text{Masse}_{\text{Wasser}}/\text{Masse}_{\text{TR}}$) und endet, wenn freies Wasser aus der Probe entwichen ist. Solange freies Wasser in der Probe vorhanden ist, verläuft die Trocknungskurve linear. An Punkt A vermindert sich die Trocknungsrate auf Grund der stärkeren Bindungskräfte des kapillar gehaltenen Zwischenraumwassers an den Schlammpartikeln. Der Trockenrückstand am Punkt A der Trocknungskurve beschreibt die Grenze des maximal erreichbaren Entwässerungsergebnisses bei einer mechanischen Entwässerung.

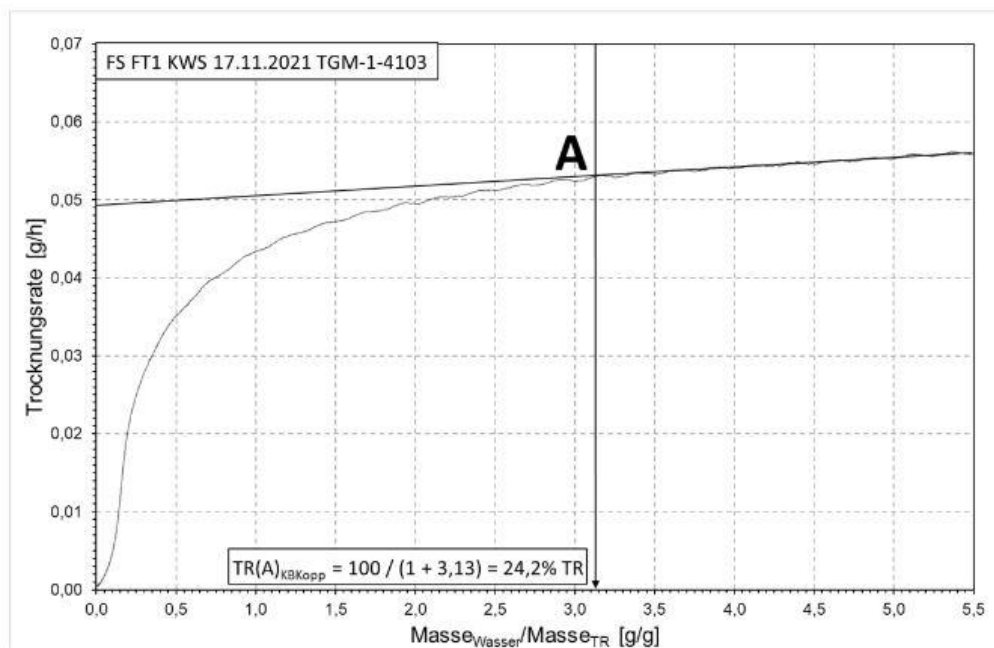


Abbildung 25: Trocknungskurve des FS 1, KWS vom 17.11.2021

Abschlussbericht

In der IMP 1 wurde der TR(A) an sechs Tagen vom ISWW bestimmt. Für die IMP 2 wurde diese Untersuchung an zwei Tagen von der Firma KB Kopp durchgeführt. In Tabelle 39 sind die Mittelwerte beider IMPs gegenübergestellt. Die beiden Messungen der IMP 2 sind für jeden Strom ohne größere Abweichung ($\leq 0,5$ Prozentpunkte). Die sechs Messwerte aus IMP1 sind in Abbildung 26 dargestellt. In Tabelle 39 sind die Mittelwerte der TR(A)-Bestimmung für beide IMPs dargestellt.

Für FS 1 und FS 2 konnte eine Zunahme des maximal möglichen Entwässerungsgrads von IMP 1 zu IMP 2 beobachtet werden. Die Verbesserten TR(A)-Werte können auf die Beschickung mit Hydrolysat zurückzuführen sein. Dieser Effekt müsste sich ebenso bei FB 3 abzeichnen. Hier ist jedoch eine Abnahme zu beobachten. Es wurde jedoch von der Beschickung mit Hydrolysat eine Verbesserung der Entwässerungseigenschaften erwartet. Auch wenn dieser Effekt in den Messwerten nicht zur Gänze abgebildet wurde, konnte im weiteren Betrieb auf der KA eine Verbesserung in den Entwässerungseigenschaften der FS 1 und FS 3 beobachtet werden. So ist der mittlere TR nach der Entwässerung der im Faulschlamm Speicher gemischten Abläufe von FB 1 und FB 3 in IMP 1 22 % und in IMP 2 24 %.

Tabelle 39: Mittelwerte der TR(A)-Bestimmung beider IMPs

	IMP 1 (Referenz) [%]	IMP 2 [%]
FS 1	21,6	24,0
FS 2	11,7	18,7
FS 3	26,1	21,7

Ein Grund für den geringen TR(A) von FS 2 in IMP 2 im Vergleich zu den beiden anderen FBs kann mit der alleinigen Beschickung des Faulbehälters mit ÜSS zusammenhängen, da hierdurch die Entwässerbarkeit reduziert wird. Da dieses Beschickungsregime bereits in IMP 1 gefahren wurde ist hier ebenfalls mit schlechteren Entwässerungseigenschaften als bei FB 1 und FB 3 zu rechnen. Der TR im Austrag der Vorentwässerung über die Schneckenpresse von FS 2 betrug in IMP 2 im Mittel 11,5 %.

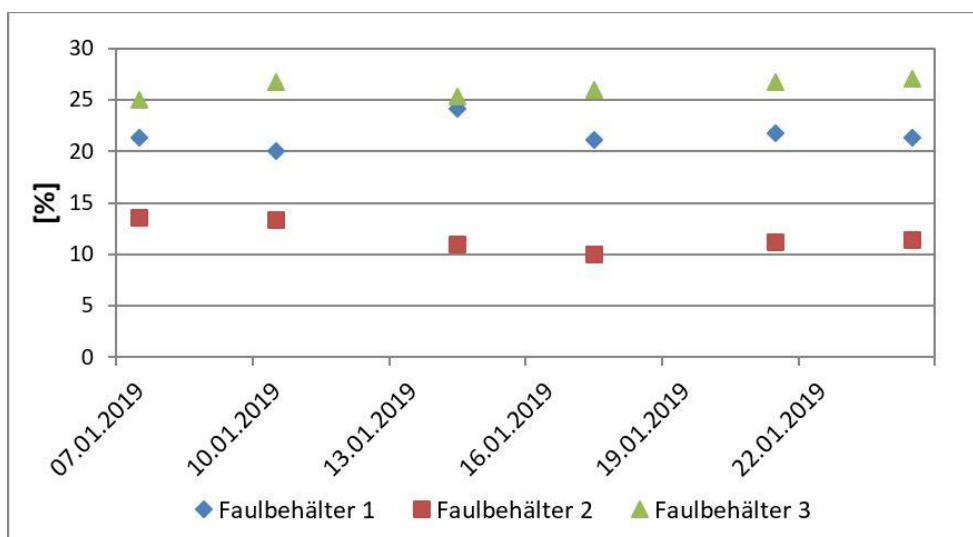
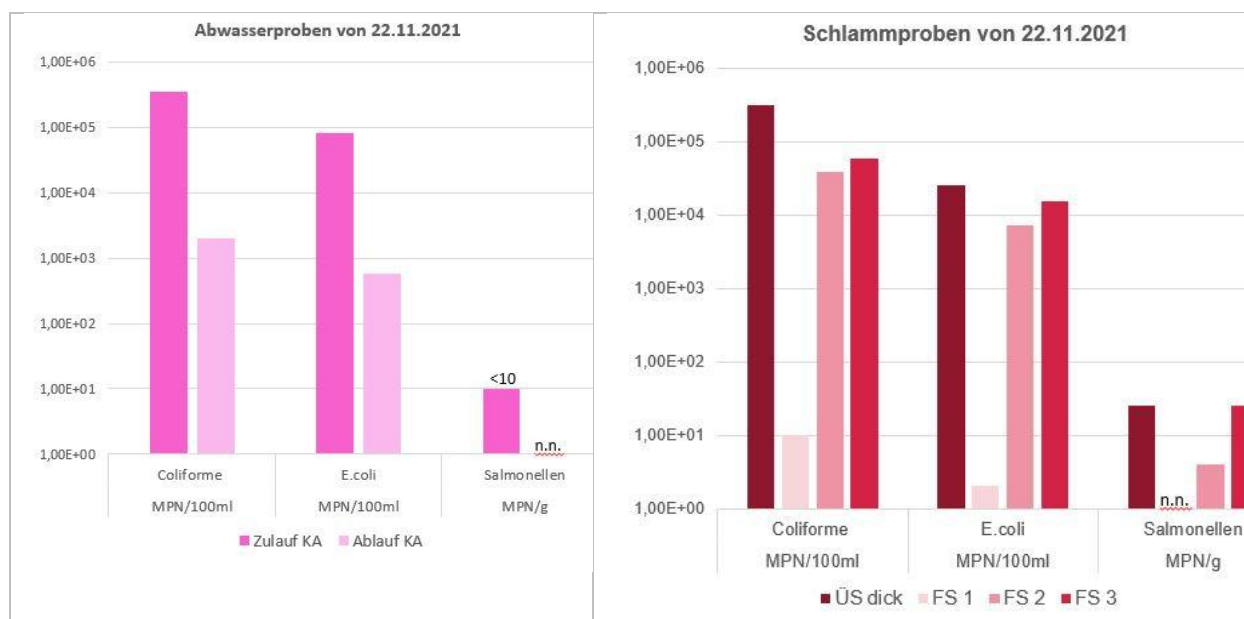


Abbildung 26: TR(A) Messwerte der Schlämme in IMP 1

Abschlussbericht

3.10.5 Fingerprint Mikrobiologie

Im Rahmen beider IMPs wurden Analysen bezüglich mikrobiologischer Inhaltsstoffe durchgeführt. Hierbei wurde sich auf die abwasserrelevanten Bakterien wie Coliforme, E.coli und Salmonellen (Abbildung 27) beschränkt. Zwischen beiden IMPs konnten keine großen Unterschiede beobachtet werden. In Abbildung 27 ist exemplarisch die Abnahme von gesundheitlich relevanten Bakterien im Zu- und Ablauf der Kläranlage sowie in den Schlämmen dargestellt. Die Reduktion innerhalb der Kläranlage beträgt bei beiden IMPs ungefähr zwei log-Stufen. Für die Schlämme zeigten sich bei dem thermophil betriebenen FB 1 die geringsten Konzentrationen an Krankheitserregern.



**Abbildung 27: Fingerprint Mikrobiologie Kläranlage und Schlämme IMP 2;
Salmonella spp. nach VDLUFA II.1, 14.1; 6. Erg. 2014; #1
Coliforme Bakterien: DIN/EN ISO 9308-2:2014-06; BS
E.Coli: DIN/EN ISO 9308-2:2014-06; BS**

3.10.6 Fingerprint anorganische Schadstoffe

Im Rahmen der IMPs wurden die Schwermetallkonzentrationen (SM-Konzentrationen) aller relevanten Ströme erfasst. Hierdurch sollte u.a. der Einfluss der TDH auf eine mögliche vermehrte Freisetzung bzw. Akkumulation der SM innerhalb der Schlammströme untersucht werden. In Tabelle 40 sind die mittleren SM-Konzentrationen ausgewählter Ströme in IMP 1 und IMP 2 aufgelistet. Unterhalb der Stoffstrombezeichnung ist die Probenhäufigkeit n angegeben.

Tabelle 40: mittlere Konzentrationen der anorganischen Schadstoffe in Faulschlammströmen und Zentrat

	FS 1 n = 10 [mg/kg TR]		FS 2 n = 10 [mg/kg TR]		FS 3 n = 10 [mg/kg TR]	
	IMP 1	IMP 2	IMP 1	IMP 2	IMP 1	IMP 2
	As	3,2	3,3	3,7	3,7	3,2
Pb	22,8	22,0	16,9	16,0	23,6	25,2
Cd	0,67	0,8	0,5	0,7	0,7	0,9
Cr	26,4	21,1	19,2	14,1	28,7	23,1
Cu	221,5	225,3	200,5	197,3	219,1	266,2
Ni	25,5	23,8	28,5	19,8	26,2	26,5
Tl	< 0,4	< 0,2	< 0,4	< 0,2	< 0,4	< 0,2
Zn	964,8	742,7	766,2	636,1	949,3	847,5
Hg	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,58

Tabelle 41: mittlere Konzentrationen der anorganischen Schadstoffe der zusätzlichen Stoffströme in IMP 2

	Zentrat _{SEW} n = 10 [µg/l]	
	IMP 1	IMP 2
As	< 0,08	< 0,08
Pb	0,13	0,06
Cd	0,0052	< 0,004
Cr	0,0068	0,02
Cu	0,82	0,33
Ni	0,21	0,10
Tl	< 0,2	< 0,2
Zn	3,26	1,10
Hg	< 0,003	< 0,003

Beim Vergleich der SM-Konzentrationen beider IMPs ist keine bemerkenswerte Änderung innerhalb der Schlammströme zu verzeichnen. Insbesondere bei den FB 1 und 3 wurde erwartet, dass aufgrund der Beschickung mit dem Hydrolysat eine Veränderung zu beobachten sein wird. Die Konzentrationen liegen jedoch innerhalb eines vergleichbaren Bereichs. Tendenziell ist eine leichte Verringerung der SM-Konzentration in IMP 2 zu beobachten. Somit wurde kein nennenswerter Einfluss der TDH auf die SM-Konz in den Faulschlamm nachgewiesen.

Allerdings ist in IMP 2 ebenso eine Verminderung der SM-Frachten im Zulauf der KA zu verzeichnen. In Tabelle 42 sind die mittleren SM-Konzentrationen sowie die Zulaufmengen zur KA für beide IMPs dargestellt.

Tabelle 42: mittlere SM-Konzentrationen im Zulauf und Zulaufmenge der Kläranlage für beide IMPs

		IMP 1	IMP 2
Q	m ³ /d	2.386	1.930
As	µg/l	< 8	< 8
Pb		10	< 4
Cd		< 0,4	< 0,4
Cr		6	4
Cu		84	68
Ni		8	7
Tl		< 10	< 10
Zn		250	198
Hg		< 0,2	< 0,2

In Tabelle 43 sind die mittleren Konzentrationen der anorganischen Schadstoffe für die zusätzlichen Stoffströme dargestellt, die nach Inbetriebnahme der neuen Module anfallen.

Tabelle 43: mittlere Konzentrationen der anorganischen Schadstoffe der zusätzlichen Stoffströme in IMP 2

	Filtrat VEW n = 7 [mg/l]	Hydrolysat n = 7 [mg/kg TR]	Struvit n = 4 [mg/kg TR]	DAS n = 9 [mg/l]
As	< 0,08	3,65	< 1	< 0,08
Pb	< 0,04	17,67	< 0,5	0,25
Cd	< 0,004	0,76	< 0,1	0,006
Cr	< 0,02	15,68	3,07	0,005
Cu	< 0,05	218,57	1,35	3,88
Ni	< 0,02	21,75	0,58	0,057
Tl	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zn	< 0,05	703,71	3,1	3,09
Hg	< 0,001	0,32	< 0,2	0,0023

Das Hydrolysat sowie das Filtrat zeigen keine auffälligen Konzentrationen an SM auf. Beim DAS hingegen kann eine Zunahme der Cu- sowie Zn- Konzentration im Vergleich zum Zulaufstrom beobachtet werden. Da sich weder im Input- noch im Output-Strom der Strippung eine ähnliche Konzentration nachweisen lässt, ist zu vermuten, dass in diesem Fall das Cu und das Zn über die technische Schwefelsäure dem Prozess zugeführt wurden. Hierdurch gelangen diese in das Endprodukt. Es ist bekannt, dass technische Schwefelsäure aufgrund ihres Herstellungsprozesses Cu und Zn in den hier gefundenen Konzentrationsbereich aufweisen kann. Eine Analyse der hochkonzentrierten Schwefelsäure zur Überprüfung dieser Hypothese war jedoch aus Arbeitsschutzgründen in den Laboren nicht möglich. Da in der Düngemittelverordnung (DüMV) bisher keine Grenzwerte diesbezüglich bestehen, kann sich an der Deklarationsgrenze für Dünger nach der DüMV orientiert werden. Demnach kann beim DAS von einem sicheren Düngemittel nach DüMV gesprochen werden. Bei der Beschaffung der Schwefelsäure soll in Zukunft vermehrt auf die Qualität der Säure geachtet werden.

Abschlussbericht

Beim produzierten Struvit konnten nur geringe SM-Frachten nachgewiesen werden. In Tabelle 44 ist die ICP-OES Analyse den europäischen Grenzwerten für anorganische Düngemittel nach PFC 1(C) [2] sowie der nationalen DüMV [3] gegenübergestellt. Es wird ersichtlich, dass alle Anforderungen erfüllt werden. Während der IMP 2 wurde Chrom in seiner Gesamtheit mit der ICP-OES erfasst. Die weitere Analyse ergab einen Anteil von 0,06 mg/kg TR für Cr(VI). Demnach sind die Anforderungen der Verordnungen erfüllt.

Tabelle 44: Überblick über Grenzwerte auf nationaler und europäischer Ebene. VERORDNUNG (EU) 2019/1009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES in PFC 1(C): ANORGANISCHES DÜNGEMITTEL

Paramter	Einheit	DüMV	PFC 1(C): anorganische Düngemittel	Struvit
Cd	mg/kg P ₂ O ₅	50	60	< 0,1
Cr (VI)	mg/kg TM	2	2	n.b.
Hg	mg/kg TM	1	1	< 0,2
Ni	mg/kg TM	80	100	0,58
Pb	mg/kg TM	150	120	< 0,5
As	mg/kg TM	40	40	< 1
Cu	mg/kg TM	-	600	1,35
Zn	mg/kg TM	-	1.500	3,1

3.10.7 Fingerprint organische Schadstoffe

Im Rahmen beider IMPs wurden Analysen bezüglich organischer Schadstoffe durchgeführt. Hierdurch sollte ein möglicher Einfluss der neuen Verfahrensstufen auf den Abbau bzw. die Remobilisierung der organischen Schadstoffe beobachtet werden. In Tabelle 45 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Für beide IMPs zeigen sich ähnliche Konzentrationen entlang der Kläranlagenströme. Tendenziell ist für beide IMPs eine Zunahme bzw. Akkumulation der Schadstoffe in Richtung der Faulschlämme zu beobachten. Ein Einfluss der neuen Verfahrensstufen war nicht zu sehen.

Tabelle 45: Fingerprint organische Schadstoffe beider IMPs

	IMP 1 (Referenz)	IMP 2
AOX	von 56,1 bis 229 mg/kg => tendenziell Zunahme Richtung FS	von <50 bis 348 mg/kg => tendenziell Zunahme Richtung FS
PCB	stets <0,1 µg/l bzw. < <0,01 µg/kg	stets <0,1 µg/l bzw. < <0,01 µg/kg
PCDD/ PCDF	stets <0,5 ng/l	In Zu- und Ablauf sowie in den Zentra- ten stets <0,2 ng/l In Schlämmen z.T. 2,5-5,0 ng/kg In MAP- und DAS-Endprodukt ca. 2,0 ng/kg => tendenziell Zunahme Richtung FS
Benzo(a)pyren	stets <0,1 µg/l; In Schlämmen z.T. 0,06-0,14 mg/kg; =>tendenziell Zunahme Richtung FS	In Zu- und Ablauf sowie in den Zentra- ten stets < 0,1 µg/l Außer: Zentrat SEW = 0,13 µg/l In Schlämmen z.T. 0,08-0,35 mg/kg => tendenziell Zunahme Richtung FS
PFT	<0,05 µg/l bzw. <0,01 mg/kg	stets <0,05 µg/l bzw. <0,02 mg/kg Au- ßer: Zu- und Ablauf MAP-Fällung sowie Ablauf Strippung (ca. 0,1 µg/l)

3.10.8 Fingerprint Spurenstoffe

Während beider IMPs wurden Analysen bezüglich der Konzentration von Spurenstoffen durchgeführt. Hierdurch sollte ein möglicher Einfluss der neuen Verfahrensstufen auf den Abbau bzw. die Remobilisierung dieser Stoffe betrachtet werden. Zu diesem Zweck wurde der Analyseumfang auf gängige Leitparameter eingeschränkt. In Tabelle 46 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen sowie die jeweiligen Reduktionsraten der Spurenstoffe aufgeführt. In beiden IMPs konnten für den Großteil der Spurenstoffe reproduzierbare Eliminationsraten gemessen werden. Als Ausnahme von dieser Beobachtung sind die beiden Röntgenkontrastmittel Iopromid, Iomeprol sowie die beiden Arzneimittelwirkstoffe/-Metabole Metoprolol und Clarithromycin zu sehen. Für diese Spurenstoffe konnte in der IMP 2 ein wesentlich größerer Anteil eliminiert werden als in IMP 1. Trotz der TDH lässt sich keine Erhöhung der Spurenstoffkonzentration nachweisen.

Die Zunahme der Konzentration an Amidotrizoesäure konnte in beiden IMPs beobachtet werden. Da es sich hierbei um einen lipophilen Stoff handelt, könnte ein Teil des Stoffs im Kläranlagenzu-
lauf an Partikel gebunden sein. Während des Durchlaufens der Kläranlage kommt es zu Rücklö-
seprozessen, wodurch die Zunahme dieses Stoffes innerhalb der Kläranlage erklärbar ist.

**Tabelle 46: Zu- bzw. Abnahme mittlere Spurenstoffkonzentration zwischen Kläranlagenzu-
lauf und Kläranlage**_{Ablauf}

	IMP 1 (Referenz)		IMP 2	
	Zu und Ab Konz. [µg/l]	Reduktion	Zu und Ab Konz. [µg/l]	Reduktion
Coffein	97 => 0,28	-99,7%	102,6 => 0,13	-99,8%
Acesulfam	40,5 => 0,6	-98,5%	53,67 => 0,12	-99,8%
Carbamazepin	0,89 => 0,85	-4,5%	0,92=>0,79	-14,4%
Diclofenac	3,4 => 3,6	+5,9%	3,40 => 3,17	-6,86%
Sulfamethoxazol	0,7 => 0,37	-47,5%	0,77 => 0,40	-47,8%
Acetyl-Sulfamethoxazol	0,68 => <0,2	-70%	1,36 => 0,05	-96,3%
Amidotrizoesäure	0,89 => 3,2	+256%	2,20 => 4,30	+95,4%
Benzotriazol	19 => 8,95	-52,9%	13,67 => 5,80	-57,5%
Iopamidol	1,9 => 9,1	+376%	5,72 => 1,30	-77,3%
Iopromid	13,5 => 12,6	-6,7%	24,60 => 5,97	-47,1%
Iomeprol	1,2 => 1,0	-17,4%	4,84 => 2,57	-75,7%
Clarithromycin	0,68 => 0,69	+0,7%	0,34 => 0,15	-54,8%
Metoprolol	7 => 5,9	-15,7%	5,77 => 2,53	-56,0%
Sotalol	0,53 => 0,46	-13,2%	0,49 => 0,40	-18,2%

3.11 Energiebilanzen

Durch die Errichtung der neuen Verfahrensstufen Thermodruckhydrolyse und Nährstoffrückgewinnung werden zum einen neue thermische und elektrische Verbraucher in den Kläranlagenprozess integriert. Zugleich erhöht sich die energetische Effizienz des Gesamtsystems, indem die Eigenenergienutzung durch die Erhöhung der Faulgasproduktion verbessert wird oder an anderen Stellen z.B. durch die Verringerung der Stickstoffrückbelastung über die Nährstoffrückgewinnungsstufen der Energieverbrauch (für die Belüftung) gesenkt wird. Bei der Bewertung der Energiebilanzen ist zu berücksichtigen, dass diese vom Anlagendurchsatz bzw. der spezifischen Auslastung der Verfahrensstufen mitbestimmt werden. Speziell für den Bereich der Nährstoffrückgewinnungsstufen ist hier zu bedenken, dass diese während der Bilanzierungsperioden nur mit dem Filtrat aus der Vorentwässerung betrieben wurden und damit nur bei ca. 1/3 der maximalen Kapazität. Generell ist zu erwarten, dass der spezifische Energieverbrauch bei einem höheren Durchsatz im Bereich der Nennlast (z.B. bei zukünftiger Mitbehandlung des Zentrats) tendenziell niedriger ausfällt.

Energieerzeugung

Aus dem Vergleich der beiden Intensivmessphasen ergibt sich eine Steigerung der spezifischen Faulgasproduktion um rd. +23,4 %. Aufgrund der im Vergleich zum Referenzzustand in der IMP2 leicht geringeren organischen Schlammfracht entsprach dies, auf die absolute Steigerung der Faulgaserzeugung (77,1 m³/h bzw. 459 kW) bezogen, einer Zunahme von +19,5 %. Von dieser Menge wurden im Mittel rd. 58 % (44,5 m³/h bzw. 265 kW) für die Dampferzeugung eingesetzt. Die restlichen 42 % (32,6 m³/h bzw. 194 kW) wurden in der BHKW-Anlage in zusätzlichen Strom und Wärme umgesetzt (80,5 kW elektrische und 77 kW thermische Energie).

Wärmebilanz

Die Umstellung der Faulung auf eine zweistufige Faulung mit zwischengeschalteter Thermodruckhydrolyse ändert den Wärmebedarf der Faulung im Wesentlichen nicht, sondern führt nur zu einer Verschiebung der Wärmeströme, da ein Teil der Schlammvorerwärmung durch das über Dampfinjektion erhitzte Hydrolysat erfolgt. Durch das in der 2. Faulstufe mit kaltem Primärschlamm vermischte heiße Hydrolysat reduziert sich der Nacherwärmungsbedarf zur Erreichung der angestrebten Faulraumtemperatur. Die Abstrahlungsverluste der Faulbehälter hängen nur von der Faulraumtemperatur und der Außentemperatur ab und werden durch die Integration der Thermodruckhydrolyse nicht beeinflusst und insofern nicht weiter berücksichtigt. Die Faulraumtemperaturen wurden im Vergleich zum Referenzzustand ohne Thermodruckhydrolyse konstant gehalten (FB 1: 55°C, FB 2+FB 3: 38°C). Die für die Dampferzeugung benötigte thermische Energie wird durch die Verbrennung eines Teils des zusätzlich erzeugten Faulgases (265 kW) und zu einem kleinen Teil über die Speisewasservorerwärmung (rd. 20 kW) bereitgestellt. Letzterer Anteil reduziert indirekt über das Hydrolysat den Wärmebedarf für die Faulschlammerwärmung und ist bilanziell deshalb nicht relevant.

Im Bereich der Nährstoffrückgewinnung ist nur die Ammoniak-Luftstrippung von Relevanz für die thermische Energiebilanz, da das Prozesswasser auf die notwendige Prozesstemperatur von 50-60°C erwärmt werden muss. Ein wesentlicher Teil der benötigten thermischen Energie wird durch Wärmerückgewinnung über die Vorerwärmung des Prozesswassers mit dem Anlagenablauf gedeckt, so dass nur die durch Abstrahlung und z.B. Produktausschleusung (Ammoniakstarkwasser) entstehenden Verluste (rd. 5°C im bilanzierten Teillastbetrieb) im Nacherwärmer über zusätzliche Wärmeenergie kompensiert werden müssen.

Weitere die Energiebilanz beeinflussenden Wärmeverbraucher sind nicht zu berücksichtigen, der Heizenergiebedarf des neuen Schlammbehandlungsgebäudes wird vollständig über die Nutzung der Abwärme der dort aufgestellten Aggregate bereitgestellt.

Für die Intensivmessphase 2 ergibt sich folgende in Tabelle 47 dargestellte Wärmebilanz:

Tabelle 47: Wärmebilanz KlärWert

	Leistung (kW)	Anmerkung
Wärmeerzeugung		
Wärmeerzeugung Dampfkessel	249	Kessel (η_{th} : 94,0%)
Wärmeerzeugung BHKW	77	BHKW (η_{th} : 39,7%)
Summe Wärmeerzeugung	326	
Wärmeverbrauch		
Nacherwärmung Strippung	29	5,8 kWh/m ³ Prozesswasser
Frostschutz Gebäude	-	Bilanziell nicht relevant (Nutzung Abstrahlung)
Summe Wärmeverbrauch	29	
Gesamtbilanz		
Wärmeüberschuss	297	

Die Nutzung des durch die Thermodruckhydrolyse zusätzlich erzeugten Faulgases im Dampfkessel und der BHKW-Anlage führt zu einem deutlichen Mehrangebot an Wärme, dass nur zu einem geringen Teil (ca. 10 %) für die Nacherwärmung in der Strippung genutzt wird. Da der Wärmebedarf der Strippung von der behandelten Prozesswassermenge abhängt und während der Intensivmessphase 2 für die gesamte Nährstoffrückgewinnung aufgrund der begrenzten Filtratmengen im Mittel nur eine Auslastung von ca. 20 % der maximalen Behandlungskapazität erreicht wurde, wäre der Wärmeverbrauch bei theoretischer Vollaustattung höher. Skaliert man den ermittelten spezifischen Wärmebedarf der Nährstoffrückgewinnung auf den theoretischen Maximaldurchsatz hoch (unter Vernachlässigung der wahrscheinlichen Annahme, dass der spezifische Wärmeverbrauch mit zunehmender Auslastung sinkt), ist die Wärmebilanz der neuen Verfahrensstufen jedoch immer noch positiv, d.h. es würden weniger als 50 % der zusätzlich erzeugten Wärme durch die Verfahrensstufen genutzt.

Diese zusätzliche Wärme kann durch die Einbindung der Anlagen an das vorhandene Gas- und Wärmenetz der Kläranlage für andere Prozesse auf der Kläranlage genutzt werden. U.a. wurden in den vergangenen Jahren zur Deckung von Wärmebedarfsspitzen in den Wintermonaten Erdgas (bis zu 400 kW) bzw. Faulgas (bis zu 300 kW) direkt zu Heizzwecken eingesetzt. Dieser Anteil kann durch die erzeugte Mehrwärme reduziert werden, was je nach Betriebsweise entweder zur Einsparung von Erdgas führt oder eine zusätzliche Verstromung von Faulgas in der BHKW-Anlage ermöglicht.

Strombilanz

Für die Strombilanz der neuen Verfahrensstufen stehen auf der einen Seite die Stromgewinne aus der erhöhten Eigenstromerzeugung aus dem zusätzlich erzeugten Faulgas und die Einsparung von Belüftungsenergie in der Belebung durch die Reduzierung der Stickstoffrückbelastung durch die Nährstoffrückgewinnung.

Auf der anderen Seite ist der elektrische Verbrauch der neuen Verfahrensstufen zu berücksichtigen. Für die Intensivmessphase ergibt sich folgende in Tabelle 48 dargestellte Strombilanz:

Tabelle 48: Strombilanz KlärWert

	Leistung (kW)	Anmerkung
Stromgewinne		
Aus zusätzlichem Faulgas	75,7	BHKW (η_{el} : 39%)
Einsparung Belüftungsenergie	6,6	1,1 kWh/kg N, 1,2 kg NH ₄ -N/m ³
Summe Stromgewinn	82,3	
Stromverbrauch		
SVE	6,0	1 kWh/m ³ Faulschlamm
TDH inkl. Dampferzeugung	8,0	4 kWh/m ³ entw. Schlamm
Anteil Schlammbehandlungsgebäude	4,0	Licht, Gebäudetechnik
Strippung	7,5	1,5 kWh/m ³ Prozesswasser
MAP-Fällung	6,4	1,3 kWh/m ³ Prozesswasser
Summe Stromverbrauch	31,9	IMP 2 (ohne Zentratwasser)
Gesamtbilanz		
Stromüberschuss	50,4	

Für den betrachteten Bilanzierungszeitraum ergibt sich analog zur Wärmebilanz ein bilanzieller Stromgewinn, d.h. der Verbrauch der neuen Verfahrensstufen wird durch die Stromgewinne überkompensiert. Auch hier ist zu berücksichtigen, dass die Nährstoffrückgewinnungsstufen nur in Teillast betrieben werden konnten und der Strombedarf bei höheren Durchsätzen steigt. Auch hier allerdings ist anzunehmen, dass die elektrische Effizienz des Anlagenbetriebs mit zunehmendem Durchsatz steigt, d.h. dass der spezifische Strombedarf in kWh/m³ sinkt. Zudem steigen auch die Einsparungen im Bereich der Belebung mit zunehmender Reduzierung der Rückbelastung, d.h. bei Skalierung des elektrischen Energieverbrauchs auf eine – dauerhaft nur theoretisch – erreichbare 100%-Auslastung der Nährstoffrückgewinnungsstufe ergibt sich immer noch eine positive Energiebilanz, d.h. die Stromgewinne überwiegen die Stromverbräuche der neuen Stufen.

3.12 Umweltbilanz

Im Rahmen einer detaillierten Ökobilanz (Project CoDiGreen, WP2, LCA-Study, 2012) wurde im Vorfeld untersucht, wie sich der Einsatz der hier skizzierten Verfahren auf dem Klärwerk Braunschweig auf die Umwelt auswirken würde. Dabei hat sich gezeigt, dass die thermische Hydrolyse einen substantziellen Beitrag zur Verbesserung der energetischen Bilanz (62 % Verbesserung) und des CO₂-Fussabdrucks (52 % Verbesserung) bewirkt, ohne andere negative Umweltauswirkungen (Versäuerung, Humantoxizität u.a.) auszulösen. Die MAP-Fällung und die Strippung sind energetisch ausgeglichen, wobei letztere den CO₂-Fussabdruck um 38 % verringert.

Aus der industriellen Herstellung von Stickstoff resultiert ein CO₂-Ausstoss von rd. 2,3 kg CO₂/kg N, der durch die Rückgewinnung vermieden wird. Umgerechnet auf die in der sauren Wäsche der Ammoniak-Luftstrippung produzierte DAS-Lösung (38-%M) ergibt sich eine CO₂-Einsparung von rd. 185 kg CO₂/t DAS. In Abhängigkeit von Auslastung und Betriebsweise, der auf dem Klärwerk Steinhof installierten Anlage können so durch den Ersatz konventionellen Stickstoff-Düngers bis zu 374 t CO₂ jährlich eingespart werden.

Abschlussbericht

Für die Phosphorrückgewinnung ergibt sich im Vergleich zu der Produktion eines vergleichbaren Mineraldüngers eine Einsparung von rd. 890 kg CO₂/t Struvit (entspricht rd. 7 t CO₂/t P) durch die Rückgewinnung des MAP. Je nach Betriebsweise der Schlammbehandlung und dem Anteil des behandelten Prozesswassers können bis zu 288 t CO₂/a durch den Ersatz konventioneller P-Mineraldünger eingespart werden (102 t CO₂/a bei Hochrechnung des Bilanzierungszeitraums in der IMP 2 auf einen Ganzjahresbetrieb).

Somit werden mit den hier umgesetzten Verfahren die essenziellen Nährstoffe Stickstoff und Phosphor energieneutral gewonnen, da die Gewinnung wenig Energie erfordert und gleichzeitig der sonst notwendige Energieeinsatz zur Elimination der Stoffe aus dem Abwasser vermieden wird. Im Vergleich mit den etablierten Verfahren zur Stickstoffproduktion (Synthetisierung aus Luft) bzw. Phosphorproduktion (Verhüttung von Erz) werden somit erhebliche Energieeinsparungen erzielt.

Darüber hinaus werden durch die Steigerung der Eigenstromerzeugung und die bilanziellen Stromüberschüsse weitere CO₂-Emissionen eingespart. Bei Zugrundelegung der spezifischen CO₂-Emissionen für den deutschen Strommix im Jahr 2021 ergeben sich Einsparungen von 185 t CO₂/a.

Tabelle 49: CO₂-Einsparungen

	Einsparung CO₂-Äquivalente t CO₂/a	Erläuterung
Vermeidung Emissionen durch regenerative Stromgewinne	185	Bilanzieller Stromüberschuss (nach Abzug des Eigenverbrauchs der neuen Verfahrensstufen): 441.504 kWh/a, Bewertung Einsparpotenzial 0,42 kg CO ₂ -Äquivalente/kWh (Strommix Deutschland 2021)
Ersatz Stickstoffdünger durch DAS	56-374	185 kg CO ₂ /t DAS, 836 kg/d DAS bis zu 5.529 kg DAS/d, abhängig von betrieblichen Erfordernissen, CO ₂ -Einsparungen für Ganzjahresbetrieb
Ersatz Phosphordünger durch Struvit	102-280	890 kg CO ₂ /t Struvit. 248 kg Struvit/d (IMP2), bis zu 697 kg Struvit/d bei Behandlung aller verfügbaren Prozesswässer (mit o-PO ₄ von 84 mg/l (Zentrat) bzw. 432 mg/l (Filtrat) im Ganzjahresbetrieb
Gesamtbilanz		
Summe	343-839	

In Summe ergeben sich Einsparungen von 343 bis zu 839 t CO₂-Äquivalente jährlich durch den Ersatz von konventionellen Stickstoff- bzw. Phosphordüngern und durch die zusätzliche Erzeugung von regenerativem Strom.

Bereits im Rahmen der Vorplanung wurde geprüft, wie sich die im Prozess anfallenden zurückgewonnenen Nährstoffe im Verregnungsgebiet des Abwasserverbandes Braunschweig sinnvoll einsetzen ließen. Dabei wurde auch die Qualität der Düngemittel im Vergleich mit den aktuell eingesetzten Mineraldüngern bewertet. Die im Rahmen des Messprogramms durchgeführten

Abschlussbericht

Analysen der erzeugten Düngemittel belegen, dass diese die erwarteten typischen Nährstoffzusammensetzungen aufweisen und darüber hinaus keinerlei nennenswerte Schadstoffe beinhalten, vgl. auch Kap. 3.10.6 Tab. 43 und 44).

Die im Mittel bei Ganzjahresbetrieb der Nährstoffrückgewinnung produzierten Dünger DAS und Struvit könnten auf den Verbandsflächen des Abwasserverbandes vollständig als Ersatz von Ammoniumharnstofflösung (DAS zur Andüngung im Frühjahr) bzw. Diammoniumphosphat/DAP (Struvit als Unterfußdüngung von Mais) eingesetzt werden. Da derzeit vor allem in der MAP-Fällung noch kein stabiler Dauerbetrieb erreicht wurde, d. h. Struvit noch nicht kontinuierlich, in ausreichender Menge und vor allem in nicht ausreichender Korngröße ausgeschleust wird, ist der angestrebte Nährstoffkreislauf noch nicht erreicht. Die erzeugten Düngermengen werden derzeit von dem in direkter Nähe befindlichen Düngerhersteller Soepenbergl abgenommen und weiterverarbeitet. Zusammen mit der Landwirtschaftskammer wurden begleitend Feldversuche durchgeführt, vgl. „Struvit im Praxisversuch“ Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bericht verfügbar auf LWK-Website unter Webcode 01036417. Dabei wurde auf der einen Seite die zur Verfügung stehende Ausbringtechnik bei den landwirtschaftlichen Betrieben betrachtet und auf der anderen Seite die mit der Bewertung des Düngemittels in Zusammenhang stehenden Punkte wie u. a. Löslichkeit und Düngewirkung, beleuchtet. Im Ergebnis wird die Düngewirkung als mit konventionellen Wirtschaftsdüngern vergleichbar bewertet. Die Löslichkeit von Pellets wurde als weniger geeignet erkannt, so dass ein kornförmiges Produkt angestrebt wird. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Gesamtsystem zur Struvitproduktion v. a. nach der Installation der Belüftung des Vorlagebehälters zunächst erstmal wieder stabilisieren wird. Dann wird eine Verbesserung des ausgetragenen Granulates erwartet. Parallel werden auf landwirtschaftlicher Seite Lösungen gesucht, die von den konventionellen Austragssystemen abweichen und mit denen auch feineres Material störungsfrei gezielt auf bzw. in die Fläche gebracht werden kann.

3.13 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zielt darauf ab, die Kosten und Gewinne der Erweiterungsmaßnahme KlärWert als Jahreswerte abzubilden und zu bilanzieren. Thermodruckhydrolyse und Nährstoffrückgewinnung werden dabei differenziert betrachtet. Durch die getrennte Betrachtung kann beurteilt werden, ob der Betrieb der TDH als wirtschaftlich einzustufen ist. Die Kosten für die Schlammvorentwässerung fließen in die Kalkulation der Thermodruckhydrolyse ein, da die SVE eine sowohl energetisch als auch wirtschaftlich notwendige Schlammvorbehandlungsstufe der TDH ist. Die separate Kostenberechnung der Nährstoffrückgewinnung liefert einen Wert der Jahreskosten, der im Rahmen anderer Projekte als Vergleichswert herangezogen werden kann. Die ebenfalls im neu errichteten Schlammbehandlungsgebäude errichtete maschinelle Überschussschlammverdickung (ÜSE) stellt ein eigenständiges Projekt dar und ist nicht Bestandteil der Kostenanalyse für das Projekt KlärWert.

Folgende Kriterien werden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse untersucht:

- Kapitalkosten,
- Betriebskosten,
- Einsparungen und Erlöse.

Abschlussbericht

Bei der Zusammenstellung der Betriebskosten wird von einem Ganzjahresbetrieb der beiden Verfahrensstufen Thermodruckhydrolyse und Nährstoffrückgewinnung ausgegangen. Für die Stufe der Thermodruckhydrolyse entspricht dies auch dem angestrebten Normalbetriebszustand. Die beiden Stufen der Nährstoffrückgewinnung hingegen sind für einen auch an den betrieblichen Erfordernissen orientierten flexiblen (Teillast-)Betrieb konzipiert, die tatsächlich entstehenden jährlichen Betriebskosten hängen somit vom Anlagendurchsatz und den Jahresbetriebsstunden ab. Dies gilt analog auch für die mit dem Betrieb der Nährstoffrückgewinnung verbundenen Einsparungen. Die in diesem Bericht dargestellten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen basieren dabei maßgeblich auf den auf einen Ganzjahresbetrieb hochgerechneten Ergebnissen des durch die TU Braunschweig durchgeführten Messprogramms. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass während der Intensivmessphase 2 (Betrieb aller neuen Verfahrensstufen) die Nährstoffrückgewinnungsstufen nur einen Teil der theoretisch zur Verfügung stehenden Prozesswasser behandeln konnten, was bei der Angabe der ermittelten Betriebskosten aber auch den positiven Effekten der Nährstoffrückgewinnung (Einsparungen und Erlöse) zu bedenken ist.

3.13.1 Kapitalkosten

Auf Grundlage der KVR-Leitlinien aus 2012 werden einmalige Investitionskosten über einen definierten Abschreibungszeitraum n und einen festgelegten Zinssatz i in gleichbleibende Jahreskosten umgerechnet. Die Investitionskosten umfassen Herstellungskosten und Honorare.

Da das neue Schlammbehandlungsgebäude inklusive übergeordneter VMA und EMSR-Technik auch für die maschinelle Überschussschlammeindickung konzipiert und errichtet wurde, werden die auf beide Bereiche entfallenden Kosten nach einem pauschalen Schlüssel aufgeteilt, der sowohl den Raum- als auch den EMSR-/VMA-Technikanteil der verschiedenen Verfahrensbereiche berücksichtigt. Für die Bereiche Ingenieurbauwerke und übergeordnete VMA wurde für KlärWert ein Kostenanteil von 80 % definiert, für den hauptsächlich auf die Energietechnik entfallenden übergeordneten EMSR-Anteil wurde als Verteilschlüssel die der Anteil an der gesamten elektrischen Anschlussleistung gewählt, womit 64 % dieser Kosten auf die KlärWert-Verfahrensstufen entfallen. Die Investitionskosten der zentralen KlärWert-Bereiche sind in der nachfolgenden Tabelle 50 dargestellt. Die Investitionskosten der vier Verfahrensbereiche SVE, TDH, MAP-Fällung und Ammoniak-Strippung beinhalten neben der eigentlichen Verfahrenstechnik auch die gesamte für den automatisierten Betrieb erforderliche EMSR-Technik.

Tabelle 50: Investitionskosten KlärWert in € (netto, gerundet)

Bereich	Investitionskosten inkl. Planung
Schlammvorentwässerung	770.000
Thermodruckhydrolyse und Dampferzeugung	1.590.000
MAP-Fällung	1.060.000
Ammoniak-Strippung	1.380.000
Ingenieurbauwerke (Gebäude, Behälter, Straßenbau)	3.350.000
Übergeordnete VMA und EMSR-Technik	1.430.000
Summe	9.580.000

Abschlussbericht

Um die beiden zentralen Verfahrensbereiche Thermodruckhydrolyse und Nährstoffrückgewinnung separat monetär bewerten zu können, wurden die auf KlärWert entfallenden übergeordneten Kosten für Bau-, VMA- und EMSR-Technik noch einmal auf TDH und Nährstoffrückgewinnung aufgeteilt. Als Ergebnis dieser Abschätzung entfallen 40 % dieser übergeordneten Investitionskosten auf die Thermodruckhydrolyse mit Dampferzeugung, 60 % auf die beiden Stufen der Nährstoffrückgewinnung.

Die Umrechnung der Investitionskosten in Jahreskosten erfolgte anhand des Kapitalwiedergewinnungsfaktors KFAKR. Dies ist das nach LAWA/DWA für langfristige Maßnahmen befürwortete Vorgehen. Zur Ermittlung des Faktors werden ein empfohlener Zinssatz von 3 %, eine durchschnittliche Nutzungsdauer für die VMA- und EMSR-Technik von je 12 Jahren und für die Bau-technik von 25 Jahren angesetzt. Es ergibt sich damit ein KFAKR für die VMA- und EMSR-Ausrüstung von 0,1005 und für die Ingenieurbauwerke von 0,0574.

Tabelle 51: Kapitalkosten Verfahrensstufen KlärWert (netto)

Verfahrensstufe	
Schlammvorentwässerung (SVE)	77.460 €/a
Thermodruckhydrolyse und Dampferzeugung	230.450 €/a
Summe TDH, SVE und Dampferzeugung	307.910 €/a
MAP-Fällung	207.460 €/a
Ammoniak-Strippung	239.040 €/a
Summe Nährstoffrückgewinnung	446.500 €/a

3.13.2 Betriebskosten

Den Betriebskosten werden alle Aufwendungen zugerechnet, die den Betrieb der Verfahrenskomponenten aufrechterhalten. Dazu gehören neben dem Bedarf an Strom und Primärenergie auch Kosten für Wartung und Instandhaltung, Personalkosten sowie Betriebsmittelkosten.

Die eingesetzten Chemikalien und spezifischen Kosten wurden beim AVBS und der SEBS angefragt. Auf Basis des in Abschnitt 3.11 ermittelten Bedarfs an elektrischer Energie werden die Energiekosten der Verfahrensstufen abgeleitet.

Für die Wartung der VMA und EMSR-Ausrüstung von SVE, TDH, MAP-Fällung und Ammoniak-Luft-Strippung wurden Verträge mit den Ausrüstern abgeschlossen. Die geregelten Kosten in den Verträgen beziehen sich auf vier Jahre und wurden in jährliche Kosten umgerechnet. Instandhaltungskosten des SBGs sind in den Wartungskosten nicht enthalten und werden mit 0,5 % der Investitionskosten des Ingenieurbauwerks angesetzt.

Für den Personalbedarf der neuen Verfahrensstufen wurden zwei zusätzliche Personen kalkuliert und eingestellt. Pro Person wird ein mittleres Jahresgehalt (zusammengesetzt aus einem Arbeiter, 1/3 Ingenieur und 1/6 Verwaltung) von netto 56.500 € angesetzt. In Summe ergeben sich damit Personalkosten von 113.000 €/a.

Für die separate Betrachtung von TDH und Nährstoffrückgewinnung werden die ermittelten Personalkosten der Gesamtanlage anhand des Anteils der Kapitalkosten der Verfahrensstufe an den Gesamtkapitalkosten der KlärWert-Anlage berechnet.

Abschlussbericht

Die eingesetzten Betriebsmittel werden anhand der separat erfassten Verbräuche und den spezifischen Kosten der jeweiligen Verfahrensstufe zugeordnet.

Tabelle 52: Betriebskosten Vorentwässerung, TDH und Dampferzeugung

	SVE		TDH+Dampf		Anmerkungen
Betriebskosten					
Personal	10.690	€/a	40.670	€/a	Anteilig Kapitalkosten
Wartung und Instandhaltung	4.720	€/a	58.620	€/a	Wartungsverträge, zuzüglich 0,5%/a des Investes IB, übergeordnete VMA+EMSR
Strom	8.409	€/a	11.212	€/a	8.760h/a, 0,16 €/kWh
Speisewasser	-		2.847	€/a	6,5 m³/d, 1,2 €/m³
Belüftungsenergie Belebung	-		-		Erhöhte Rücklösung N in IMP2 bilanziell nicht nachweisbar
Polymer SVE	118.605	€/a			15 kg WS/ t TR 4, 18 €/kg, 0,214 t TR/h
Summe Betriebskosten SVE+TDH	255.773 €/a				Ganzjahresbetrieb (365d/a)

Die in Tabelle 52 dargestellten Betriebskosten der Thermodruckhydrolyse und der hierfür erforderlichen Vorentwässerung belaufen sich auf rd. 256.000 €/a. Nahezu die Hälfte (46 %) der Betriebskosten entfallen hier auf den Polymerbedarf für die Vorentwässerung, die einerseits durch den relativ hohen spezifischen Konditionierungsbedarf und andererseits durch die stark gestiegenen Polymerkosten bestimmt sind. Ein weiterer signifikanter Posten sind mit 58.620 €/a die Wartungskosten für die Thermodruckhydrolyse, die zum größten Teil auf den mit dem Anlagenlieferanten abgeschlossenen Vollwartungsvertrag zurückgehen.

Tabelle 53: Betriebskosten Nährstoffrückgewinnung

	MAP-Fällung		Strippung		Anmerkungen
Betriebskosten					
Personal	28.640	€/a	33.000	€/a	Anteilig Kapitalkosten
Wartung und Instandhaltung	10.130	€/a	22.120	€/a	Wartungsverträge, zuzüglich 0,5%/a des Investes IB, übergeordnete VMA+EMSR
Strom	8.970	€/a	10.512	€/a	0,16 €/kWh
NaOH (50%)	8.056	€/a	79.642	€/a	MAP: 0,44 l/m³, Strippung: 2,9 l/m³, 418 €/t
H ₂ SO ₄ (96%)	-		15.945	€/a	1,66 l/m³, 120,5 €/t
MgCl ₂ -Lösung (25%)	8.463	€/a	-		1,8 l/m³ (25%), 88 €/t
Salzsäure	8.928	€/a	-		0,26 l/m³, 600 €/t, HCl(25%)
Entschäumer	680	€/a	-		2,66 l/l, 0,7 l/d
Summe Betriebskosten MAP-Fällung und Strippung	235.086 €/a				

Abschlussbericht

Bei den Betriebskosten der Nährstoffrückgewinnung (235.086 €/a) dominieren die Kosten für die Betriebschemikalien der Luftstrippung (Natronlauge und Schwefelsäure); speziell die kürzlich stark gestiegenen Preise für Natronlauge machen sich hier deutlich bemerkbar. Etwa ein Drittel (37 %) der Betriebskosten entfallen auf die eingesetzte Natronlauge, wie Tabelle 53 entnommen werden kann. Wie schon zuvor ausgeführt, skaliert der Verbrauch an Betriebschemikalien (Natronlauge, Schwefelsäure) nahezu linear mit der behandelten Nährstofffracht bzw. Prozesswassermenge, so dass davon auszugehen ist, dass bei der zukünftigen Mitbehandlung von Faulschlammzentrat diese Anteile steigen werden.

3.13.3 Einsparungen und Erlöse

Neben den Betriebskosten der neuen Verfahrenskomponenten gibt es auch Effekte, die zu monetären Einsparungen bzw. Erlösen führen. Durch die Thermodruckhydrolyse wird der anaerobe Abbau verbessert, wodurch mehr Faulgas produziert wird, das durch die anschließende Umwandlung in Strom und Wärme eine Erhöhung des Eigenversorgungsgrades auf der Kläranlage zur Folge hat. Weitere energetische Vorteile ergeben sich aus der Reduktion der Stickstoffrückbelastung im Bereich der Belebung. Der erweiterte Abbau und die Veränderung der Entwässerungseigenschaften des Schlammes führt zudem v. a. durch die Reduzierung der Klärschlammmenge zu Reduktionen bei den Schlammentsorgungskosten.

Ursprünglich wurden für die erzeugten Düngerprodukte Ammoniumsulfat und Struvit weitere potenzielle Erlöse angesetzt. Derzeit werden sie kostenfrei abgegeben. Sie finden im Rahmen dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen keine Berücksichtigung. Grundsätzlich ist das Inverkehrbringen von Düngemitteln ein aufwendiger genehmigungsrechtlicher Prozess. Dies wäre die Voraussetzung für eine offene Vermarktung, die vor diesem Hintergrund verworfen wurde. Vielmehr wird angestrebt die anfallenden Düngeprodukte direkt für die Mitgliedslandwirte des Abwasserverbandes zur Verfügung zu stellen. Damit kann ein Teil des Düngebedarfs auf den Flächen (Stickstoff: 142 kg/ha, Phosphor: 71 kg/ha und Kalium: 130 kg/ha) abgedeckt werden. Die Anwendung ist hier rechtlich unkomplizierter, weil die Düngeprodukte ausschließlich an die Mitgliedslandwirte abgegeben werden und die Anwendung im Verbandsgebiet erfolgt. Die Einhaltung der Düngemittelgesetzgebung ist dabei Voraussetzung und selbstverständlich. An den erforderlichen logistischen Schritten wird gearbeitet. Voraussetzung ist ein dauerhafter Anfall der Produkte.

Strom und Wärme

Die Erhöhung der Eigenstromerzeugung übersteigt den Zusatzstrombedarf der neuen KlärWert-Verfahrensstufen. Die darüber hinaus gehenden Überschüsse werden entweder zur Deckung des Reststrombedarfs des Klärwerks genutzt oder als Überschuss in das Versorgungsnetz eingespeist. Da das Klärwerk Steinhof im Moment zumindest bilanziell seinen Strombedarf durch Eigenstromerzeugung decken kann (was u.a. an der Mitverstromung externer Biogasquellen liegt) wird für den verbrauchten bzw. zusätzlich erzeugten Strom ein aus Einspeisung und Bezug errechneter Mischpreis (16 ct/kWh) angesetzt. Die zusätzliche Eigenstromerzeugung wird im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse als Erlös der Verfahrensstufe der Thermodruckhydrolyse angerechnet. In Summe ergibt sich eine Steigerung der Eigenstromerzeugung um 705.180 kWh/a.

Abschlussbericht

Die mit der Inbetriebnahme der neuen Verfahrensstufen verbundene Veränderung der Wärmebilanz ermöglicht eine Reduzierung der bisher in den Wintermonaten zur Deckung von Bedarfsspitzen direkt für Heizzwecke eingesetzten Erdgasmengen. Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird vereinfachend nur die Reduktion der Faulgasmengen für Heizzwecke berücksichtigt. Hierfür wird angenommen, dass die nicht mehr direkt für Heizzwecke benötigte Faulgasmenge stattdessen für die gekoppelte Stromerzeugung im BHKW eingesetzt wird. Hiermit ergibt sich eine zusätzliche Eigenstromerzeugung von rd. 160.000 kWh/a.

Des Weiteren führt die Reduktion der Stickstoffrückbelastung durch die Nährstoffelimination zu einer Einsparung von Belüftungsenergie in der Belebung. Diese wird pauschal mit 1,1 kWh/kg N, 1,2 kg NH₄-N /m³ angesetzt. Theoretisch müsste die Thermodruckhydrolyse in Summe zu einer verstärkten Freisetzung von (Ammonium-)Stickstoff führen. Dies konnte im Rahmen des Messprogramms in der IMP2 bilanziell aber nicht nachgewiesen werden. Bei Annahme eines ganzjährigen Betriebs der Nährstoffrückgewinnungsstufen ergibt sich für die Hochrechnung des Bilanzierungszeitraums der Intensivmessphase 2 für die Stickstoffelimination in den Nährstoffrückgewinnungsstufen eine Einsparung von 57.816 kWh/a, die in der Biologie an Belüftungsenergie entfällt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bisher nur ein Teil des Prozesswassers behandelt werden konnte. Für die zukünftige Mitbehandlung des Faulschlammzentrats fallen die Einsparungen (und natürlich auch die Betriebskosten) entsprechend höher aus. In Summe ergeben sich monetäre energetische Einsparungen von 138.428 €/a (vgl. Tabelle 54 und Tabelle 55).

Schlamm Entsorgung

Weitere wesentliche monetäre Einsparungen ergeben sich im Bereich der Schlamm Entsorgung. Zum einen wird durch den verstärkten Abbau die zu entsorgende organische Schlammfracht als Ganzes verringert, zum anderen führt die Integration der TDH zu einer Verbesserung der Schlammwässerbarkeit, wodurch die zu entsorgende Schlammfracht weiter reduziert wird.

Derzeit werden auf dem Klärwerk Braunschweig ca. 1/3 der Schlammmenge nach Entwässerung thermisch verwertet. Diese Teilmenge des Klärschlammes wird derzeit in einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage in Helmstedt verwertet. Ein weiteres Drittel wird als Dünnschlamm auf den landwirtschaftlichen Anbauflächen des Abwasserverbandes verregnet und das letzte Drittel wird nach Entwässerung ebenfalls der landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird bei der Ermittlung der Einsparungen von Polymer und Schlamm Entsorgungskosten eine Entwässerungsdauer von 274 d/a angesetzt. Im Hinblick auf den bis zum Jahr 2029 für das Klärwerk Steinhof umzusetzenden vollständigen Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ist davon auszugehen, dass die Einsparungen bei ganzjährigem Entwässerungsbetrieb entsprechend proportional höher ausfallen.

In Summe ergeben sich für einen Entwässerungsbetrieb von 274 d/a und den aktuellen spezifischen Kosten für die thermische Klärschlammverwertung durch die Thermodruckhydrolyse Einsparungen bei den Schlamm Entsorgungskosten von 361.872 €/a. Diese gehen etwa zur Hälfte auf die von 22,1 auf rd. 24 % TR verbesserte Entwässerbarkeit des Schlammes und zum anderen Teil auf den erhöhten Abbaugrad zurück.

Des Weiteren wurde der spezifische Polymerbedarf für die Faulschlammwässerung reduziert (von 24,4 auf 20 kg WS/t TR), so dass sich zusammen mit der Reduktion der Schlammfracht bei

Abschlussbericht

Annahme einer Schlammmentwässerung an 274 d/a signifikante Einsparungen von 100.459 €/a bei den Polymerkosten ergeben.

Die ermittelten Einsparungen im Bereich der Schlammbehandlung- und Entsorgung sind in der nachfolgenden

Tabelle 54 zusammengefasst und summieren sich auf 594.032 €/a.

Tabelle 54: Einsparungen und Erlöse Thermodruckhydrolyse

	SVE	TDH+Dampf	Anmerkungen
Einsparungen und Erlöse			
Strom	-	-131.701 €/a	8.760h/a, 0,16 €/kWh, Teil der Wärmeeinsparungen als zusätzliche Stromerzeugung (160.000 kWh/a) im BHKW berücksichtigt
Erdgas	-	-	Nicht berücksichtigt
Polymer SEW	-	-100.459 €/a	Erhöhung oTR-Abbau von 58,1 auf 63,7%: -1,33 t TR/d. Zusätzlich Reduktion spez. Polymer von 24,4 auf 20 kg WS/ t TR, 4,2 €/kg WS, Annahme: Entwässerung an 274 d/a
Schlamm Entsorgung	-	-361.872 €/a	Ohne TDH: 22,1% TR und 24,4 kg WS/t TR Polymer, mit TDH: 24% TR, 20 kg WS/t TR, 126 €/t, Schlamm Entsorgung an 274 d/a, Reduktion Schlammmenge von 5.037 t TR/a auf 4.552 t TR/a mit 24,0% TR=-3.826 t FS/a, d.h. für 274 d/a: -2.872 t FS zu 126 €/t = -361.872 €/a
Summe Einsparungen/Erlöse SVE+TDH	-594.032 €/a		

Stickstoffrückbelastung und Düngerprodukte

Zu den weiteren potenziellen Einsparungen bzw. Erlösen zählt die Reduktion der Stickstoffrückbelastung in der biologischen Stufe, die zu einer Verringerung des Belüftungsbedarfs und damit des Strombedarfs führt (vgl. vorangegangener Abschnitt 3.13.3).

Die in den Vorplanungen angenommenen (moderaten) Erlöse für den Verkauf von Struvit (65 €/t) und DAS (25 €/t) wurden bisher, wie bereits oben beschrieben, nicht realisiert. Dies hängt zum einen damit zusammen, dass für eine entsprechende vertragliche Vereinbarung mit einem externen Abnehmer noch nicht ausreichend Produkt einer definierten Qualität (im Falle Struvit) produziert wurde und zum anderen für die saisonale Lagerung der DAS-Lösung bis zur Ausbringung externe Speichervolumina genutzt werden. Da mittelfristig die Verwertung der Produkte in eigener Zuständigkeit vorgesehen ist, muss ein entsprechendes Mengen- und Lagermanagement und die vertragliche Bindung der Abnehmer noch entwickelt werden. Über diesen Ansatz sollen die Nährstoffe auch nach Beendigung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung den Mitglieds-

Abschlussbericht

landwirten des Verbandes zur Verfügung gestellt werden können. Konkrete finanzielle Auswirkungen können dazu aktuell nicht beziffert werden. Angesichts der allgemein deutlich gestiegenen Düngerpreise und wachsender Akzeptanz von DAS-Lösung als alternativer Dünger, sollten zukünftig entsprechende Erlöse erzielt werden können.

Tabelle 55: Einsparungen und Erlöse Nährstoffrückgewinnung

	MAP-Fällung	Strippung	Anmerkungen
Einsparungen und Erlöse			
MAP	0 €/a	-	Bisher kein bilanzierbarer Produktaustrag, 312 kg/d Struvit (inkl. Kristallwasser) aus P-Elimination in IMP2 (70% Elimination) hochgerechnet 114 t/a, kein Erlös angenommen, Potential bei Mitbehandlung Zentrat abhängig von MAP-Fällung im Schlamm höher
DAS	-	0 €/a	Auf das Jahr hochgerechnet 305 t/a (IMP 2), Kein Erlös angenommen/externe Lagerung, Bei Mitbehandlung von Zentrat und ganzjähriger Elimination bis zu 2.019 t/a
Belüftungsenergie	-9.187 €/a		1,2 kg N/m ³ , 1,1 kWh/kg N
Summe Einsparungen/Erlöse SVE+TDH	-9.187 €/a		

3.13.4 Gesamtwirtschaftlichkeit

In der nachfolgenden Tabelle 56 wurde aus den ermittelten Jahreskosten bzw. Einsparungen eine Gesamtwirtschaftlichkeit, aufgeteilt nach den Verfahrensstufen Thermodruckhydrolyse und Nährstoffrückgewinnung, berechnet.

Für den Bereich der Schlammbehandlung (Thermodruckhydrolyse) ergibt sich eine positive Wirtschaftlichkeit, d.h. die Einsparungen (Erhöhung der Eigenenergieerzeugung und Verringerung der Schlammentsorgungskosten) übersteigen die Kapitalkosten der zusätzlichen Verfahrensstufen (siehe Tab. 51) um knapp 50.000 €/a. Dies geht maßgeblich auf die verbesserte Entwässerbarkeit (22,1→24,0 % TR), die Reduktion der nach Abbau verbleibenden Feststofffracht und die Verringerung des spezifischen Polymerbedarfs (24,4→20,0 kg WS/t TR) zurück. Durch weitere Optimierungen im Bereich der Schlammbehandlung (Vakuumentgasung mit Mg-Dosierung, Erneuerung der FS-Entwässerungszentrifugen) sind zusätzlich deutliche Verbesserungen zu erwarten, wie neueste Untersuchungen hierzu belegen. Wird zukünftig – wie absehbar – die gesamte Schlammmenge entwässert und thermisch entsorgt werden müssen, werden die wirtschaftlichen Vorteile der Thermodruckhydrolyse weiter steigen.

Für die Nährstoffelimination bzw. Rückgewinnung entstehen – wie für die gesamte Abwasserreinigung – in erster Linie Kosten. Die potenziellen Einsparungen, z.B. durch Erlöse aus der Veräußerung der entstehenden Düngerprodukte, können die Gesamtkosten von rd. 800.000 €/a etwas reduzieren. Ein wirtschaftlicher Betrieb der Prozesswasserbehandlung für sich genommen – nur

Abschlussbericht

getragen von Verkaufserlösen der erzeugten Nährstoffrecyclate – wird auch zukünftig voraussichtlich nicht wirtschaftlich im Sinne von „rentabel“ realisiert werden können.

Tabelle 56: Gesamtjahreskosten Thermodruckhydrolyse und Nährstoffrückgewinnung

	Thermodruckhydrolyse		Nährstoffrückgewinnung	
Kapitalkosten				
Summe Kapitalkosten netto	307.910	€/a	446.500	€/a
Summe brutto (19%)	366.412	€/a	531.335	€/a
Betriebskosten				
Personal	51.360	€/a	61.640	€/a
Wartung und Instandhaltung	63.340	€/a	32.250	€/a
Strom	15.932	€/a	19.482	€/a
Speisewasser	2.847	€/a	-	
Polymer SVE	118.605	€/a	-	
Natronlauge	-		87.698	€/a
H ₂ SO ₄	-		15.945	€/a
MgCl ₂ -Lösung	-		8.463	€/a
Salzsäure	-		8.928	€/a
Entschäumer	-		680	€/a
Summe Betriebskosten netto	255.773	€/a	235.086	€/a
Summe brutto (19%)	304.369	€/a	279.752	€/a
Einsparungen				
Strom	-131.701	€/a		
Erdgas	-		-	
Polymer SEW	-100.459	€/a		
Schlamm Entsorgung	-364.744	€/a		
Belüftungsenergie	-		-9.187	€/a
Struvit	-		-	
DAS	-		-	
Summe Einsparungen netto	-596.904	€/a	-9.187	€/a
Summe brutto (19%)	-710.316	€/a	-10.932	€/a
Gesamtbilanz (Kosten-Erlöse)				
Gesamtbilanz netto	-33.221	€/a	672.399	€/a
Gesamtbilanz brutto (19%)	-39.533	€/a	800.154	€/a

3.14 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Die Erweiterung der Schlammbehandlung der Kläranlage Braunschweig erfolgte, um die bestehende Belastung der Kläranlage zu reduzieren und zugleich die Eigenenergieerzeugung zu erhöhen und Schlamm Entsorgungskosten zu verringern. Eine Alternative wäre der konventionelle Ausbau der Belebungsstufe im Bereich Belebungs- und Nachklärbecken gewesen, die zu zusätzlichem Belüftungsenergiebedarf und einer nutzfürigen Elimination der Ammoniumstickstofffrachten (zu elementarem Luftstickstoff in der Nitrifikation/Denitrifikation) geführt hätte. Durch die hier umgesetzte Verfahrenserweiterung werden nun stattdessen Teile der Nährstofffrachten als nutzbare Dünger zurückgewonnen. Wie in vorgehenden Abschnitt 3.13.4 dargelegt wurde, ist die Umstellung der Schlammbehandlung und die Integration einer Thermodruckhydrolyse unter den aktuellen Bedingungen wirtschaftlich. Die Nährstoffrückgewinnung für sich genommen ist wie die ge-

Abschlussbericht

samte Abwasserreinigung a priori nicht wirtschaftlich, sondern mit zusätzlichen Kosten verbunden. In Kombination mit den vermiedenen Investitionen für einen konventionellen Ausbau der Kläranlage (zusätzliches Belebungs- und Nachklärbeckenvolumen) ergibt sich damit ein bei weitem wirtschaftlicherer Betrieb der Nährstoffrückgewinnung auf Kläranlagen als mit allen derzeit bekannten Verfahren erreichbar wäre.

4 Empfehlungen

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Von der Planung bis zur Installation der Anlagenkomponenten war eine enge Abstimmung zwischen Auftraggeber, Betreiber, Planungsbüro und ausführenden Firmen entscheidend, um bei einem derart komplexen Projekt zwangsläufig auftretenden Interessenkonflikten und unterschiedlichen technischen Detailanforderungen entgegen zu wirken und von allen Projektpartnern mitgetragene Lösungen zu entwickeln.

Auch im Bereich der Anlagenautomatisierung ergaben sich besondere Herausforderungen an die Integration der Prozesssteuerungen der einzelnen maschinengebundenen Steuerungen (Hydrolyse, Dampferzeugung, Strippung, MAP-Fällung) in die übergeordnete Anlagensteuerung. Durch die funktionale Ausschreibung der Hauptverfahrensstufen konnte die EMSR-Technik nicht in dem Maße vorgegeben werden, wie es bei Bauprojekten dieser Art normalerweise sonst möglich ist. Um trotzdem eine Vereinheitlichung zu erwirken, wurden allgemeine EMSR-Ausführungsstandards definiert, die in Teilen von den Anlagenlieferanten zwingend einzuhalten waren und zum Teil im Rahmen der Ausschreibung im Rahmen der Zuschlagsbewertung positiv bewertet wurden.

Aufgrund der vorliegenden Abhängigkeiten der verschiedenen Verfahrensstufen (Prozesswasser aus Vorentwässerung für MAP-Fällung und Strippung) war schon bei der Planung/Konzeption viel Wert auf hydraulische Entkopplung (Speicher), Aggregatredundanzen (z.B. Pumpen, Wärmetauscher) und Umgehungsmöglichkeiten (z.B. jeweils separater Betrieb der beiden Nährstoffrückgewinnungsstufen möglich) gelegt worden. Die ursprünglich vorgesehene, aber aus Kostengründen nicht umgesetzte Redundanz im Bereich der Vorentwässerung wäre im Hinblick auf das Erreichen eines stabilen Dauerbetriebs wünschenswert gewesen.

Für alle hier betrachteten Verfahrensstufen gilt, dass diese möglichst mit einer kontinuierlichen Prozesswasser-, bzw. Schlammmenge - idealerweise nahe des Auslegungs- bzw. Betriebspunktes - betrieben werden sollten, um optimal eingestellt und betrieben werden zu können. Ebenso gilt, dass die Anforderungen der Realität in der Abwasser- und Schlammbehandlung dies selten erfüllen können, da sich sowohl Mengen als auch Zusammensetzungen dynamisch ändern.

Vor allem für die MAP-Fällung zeigt sich, dass, um den Einfluss von Änderungen der Betriebsparameter zu sehen, ein entsprechend großer und möglichst nicht unterbrochener Prozesswasserdurchsatz erforderlich ist. Zum Zeitpunkt der Auswertungen im Zuge dieses Berichtes ist die inzwischen installierte Flotation für das Faulschlammzentrat noch nicht berücksichtigt worden.

4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit

Durch die Implementierung der neuen Verfahrensstufen auf der Kläranlage Steinhof in Braunschweig konnte ein Konzept bezüglich einer nachhaltigen und kreislauforientierten Ressourcengewirtschaftung auf gleich zwei Wegen realisiert werden.

Abschlussbericht

Zum einen wird durch die Erzeugung zweier regionaler Pflanzendünger ein Teil des regionalen Nährstoffbedarfs gedeckt. Somit erfolgt eine Entkopplung von Preisbewegungen an internationalen Märkten ein Stück mehr Unabhängigkeit von Rohstoffimporten erlangt. Insbesondere bezüglich der Rückgewinnung des Phosphors aus dem Abwasserpfad ist hierin ein großer Vorteil für die lokalen Landwirte im Speziellen und für die gesamte Gesellschaft im Allgemeinen zu sehen.

Der zweite Vorteil, der sich aus dem kombinierten Betrieb der beiden Anlagen zur Nährstoffrückgewinnung (MAP-Fällung und Stickstoffstrippung) ergibt, ist, neben der Reduktion der Rückbelastung der Anlage mit Stickstoff, eine doppelte Energiekosteneinsparung. Das erste Einsparpotential besteht auf der Kläranlage, wo die zusätzlich benötigte Belüftungsenergie zur Nitrifikation des Stickstoffs aus der Rückbelastung eingespart werden kann. Gleichzeitig muss an anderer Stelle (Düngemittelproduktion) für den in der DAS-Lösung gebundenen Stickstoff keine energieaufwendige Stickstofffixierung nach dem Haber-Bosch-Verfahren durchgeführt werden. Somit kann auf der Kläranlage die Überführung des Stickstoffs in die Luft mittels Denitrifikation und die spätere Refixierung aus der Luft in Form von Ammoniak umgangen und dadurch der Düngemittelherstellungsprozess smart und kostenpositiv optimiert werden.

Die auf dem Klärwerk Braunschweig realisierte Verfahrenskombination eignet sich besonders für Kläranlagen, die aufgrund einer hohen Auslastung eine Reduktion der Nährstoffbelastung erreichen müssen und so auf einen Ausbau der biologischen Stufe verzichten können.

Da die komplexe Anlagentechnik neben der entsprechenden Fachkompetenz (u.a. im Bereich Dampferzeugung und Chemikalienhandling) Personalausstattung erfordert, kommen für eine Anwendung der realisierten Verfahrenskombination vor allem Kläranlagen der GK 5 in Frage.

Im Sinne einer kreislauforientierten Gesellschaft sowie vor dem Hintergrund steigender Ressourcenpreise und Energiekosten sowie dem „Green Deal“ der Europäischen Union bietet das vorgestellte innovative Projekt „KlärWert“ großes Potential Modell zu stehen für andere Kläranlagen in Deutschland, Europa und der Welt.

Zukünftig soll die MAP-Fällung als zentraler Schritt dienen, um den Vorgaben der Klärschlammverordnung ab 2029 hinsichtlich des P-Recyclings auf dem Klärwerk Steinhof gerecht zu werden. In Kombination mit einer intensivierten Freisetzung von Phosphat aus dem Klärschlamm soll die MAP-Fällung zur deutlichen Reduzierung des Phosphorgehalts im entwässerten Klärschlamm führen, sodass Phosphorgehalte < 20 g/kg TM erzielt werden. Die Dosierung einer organischen Säure vor der Klärschlammmentwässerung soll als Polizeistufe für die zuverlässige Unterschreitung des Grenzwertes sorgen.

5 Zusammenfassung / Summary

Beschreibung, Anwendbarkeit der Technik / Description, Applicability

Mit der auf dem Klärwerk Steinhof in Braunschweig erstmals umgesetzten Verfahrenskombination von Thermodruckhydrolyse, MAP-Fällung und Ammoniak-Luft-Strippung wurde parallel eine Verbesserung der Reinigungsleistung der Kläranlage, eine Erhöhung der Energieproduktion sowie die Rückgewinnung von Nährstoffen erreicht.

Es wurde eine Anlage errichtet, welche die Schlammbehandlung und Eigenenergieerzeugung verbessert und zugleich eine flexibel an die Erfordernisse der Kläranlage angepasste Nährstoffentfrachtung ermöglicht, so dass ganzjährig hochwertige Phosphor- und Stickstoffdünger zurückgewonnen werden können. Die erzielte Entfrachtung des Prozesswassers (N: rd. 30 %, P: rd. 6 %) trägt zur Betriebsstabilität des Klärwerkes bei.

Verbunden mit der Vorgabe, die oben genannten Ziele parallel zu erreichen, war die Errichtung einer Anlage mit hochgradig vernetzten Stoffströmen. Optimale Ergebnisse erfordern eine detaillierte Abstimmung der Einzelprozesse aufeinander. Im Rahmen eines wissenschaftlich begleiteten Inbetriebnahme-Prozesses ist es gelungen, trotz technischer Herausforderungen einen Großteil der prognostizierten Ergebnisse zu erreichen. Eine Ausnahme stellt die MAP-Fällungsstufe dar, die in erheblich stärkerem Maße als vorhersehbar durch die vorgelagerten Prozessstufen (negativ) beeinflusst wurde. Nach umfangreichen Prozessanpassungen und -optimierungen konnte hier mittlerweile ein stabiler Betrieb erreicht werden, aufgrund des sehr feinkristallinen Fällproduktes ist die erhoffte quantitative Ausschleusung und die damit verbundene Rückgewinnungsquote innerhalb der Projektlaufzeit aber noch nicht erreicht worden. Deshalb waren weitere Maßnahmen zur Prozessoptimierung, auch nach Abschluss des eigentlichen UIP-Vorhabens, notwendig. Zunächst wird hier nun der Einfluss des belüfteten Vorlagebehälters abgewartet. Ggf. würden zukünftig noch weitere Anstrengungen unternommen werden, um ein optimales Ausschleusungsprodukt bei der MAP-Fällung zu erhalten.

The process combination of thermal pressure hydrolysis, MAP precipitation, and ammonia-air stripping, implemented for the first time at the Steinhof wastewater treatment plant in Braunschweig, simultaneously improved the treatment performance of the wastewater treatment plant, increased energy production, and facilitated nutrient recovery. A plant was constructed that improves sludge treatment and self-generated energy while simultaneously enabling nutrient removal that is flexibly adapted to the requirements of the wastewater treatment plant, allowing the recovery of high-quality phosphorus and nitrogen fertilizers year-round. The achieved removal of nutrient from the process water (N: approx. 30%, P: approx. 6%) contributes to the operational stability of the wastewater treatment plant. The requirement to achieve the above-mentioned goals in parallel required the construction of a plant with highly interconnected material flows. Optimal results require detailed coordination of the individual processes. As part of a scientifically supported commissioning process, it was possible to achieve a large portion of the predicted results despite technical challenges. One exception is the MAP precipitation stage, which was (negatively) influenced by the upstream process stages to a considerably greater extent than anticipated. After extensive process adjustments and optimizations, stable operation has now

Abschlussbericht

been achieved. However, due to the very fine-crystalline precipitate, the desired quantitative discharge and the associated recovery rate have not yet been achieved within the project duration. Therefore, further process optimization measures were necessary, even after completion of the actual UIP project. For now, the impact of the aerated feed tank will be awaited. Further efforts may be made in the future to achieve an optimal discharge product in the MAP precipitation.

Wesentliche Vorteile für die Umwelt, medienübergreifende Aspekte / Main environmental benefits, Cross-media aspects

Durch die direkte lokale Verwendung der erzeugten Düngemittel wurde hinsichtlich der Verwendung der Nährstoffe ein Modellfall geschaffen, der für viele andere Anlagen Vorbildcharakter haben kann. Die Produktqualität übertrifft für beide Fälle die von vielen vergleichbaren mineralischen Düngemitteln. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass das Inverkehrbringen eines Düngemittels ggf. eine komplexe rechtliche Würdigung erfordert. Hier ist es sinnvoll das sich handelnden Akteure rechtzeitig austauschen und insbesondere die Nutzer der Düngemittel rechtzeitig eingebunden werden. Dies bezieht sich auf alle Belange, die im Zusammenhang mit dem Düngemittleinsatz eine Rolle spielen können (Nährstoffgehalt, ggf. Gehalt an Schadstoffen, Konsistenz, anfallende Menge, Zeitraum in dem das Düngemittel anfällt). Durch die Einbeziehung der Nutzer können Produktion und Nutzung optimal aufeinander abgestimmt werden, z. B. wenn dadurch die Erforderlichkeit einer Speicherung offensichtlich wird oder auf Nutzerseite maschinentechnische Anpassungen vorgenommen werden müssen.

Through the direct local use of the produced fertilizers, a model case was created with regard to the use of nutrients, which can serve as a model for many other plants. In both cases, the product quality exceeds that of comparable mineral fertilizers. It should be taken into account that placing a fertilizer on the market may require complex legal assessment. In this case, it is advisable for the parties involved to communicate with each other in a timely manner and, in particular, to involve the users of the fertilizers in a timely manner. This refers to all aspects that may play a role in connection with the use of fertilizers (nutrient content, possible pollutant content, consistency, amount produced, period in which the fertilizer is produced). By involving the users, production and use can be optimally coordinated, e.g. if the need for storage becomes apparent or if technical adjustments to the user's machinery need to be made.