

Masterthesis

| | |
|--|-------------------------|
| Name: | Vorname: |
| Fuchs | Ralf |
| Studiengang: | vorgelegt am: |
| Erneuerbare Energien | 14.02.2017 |
| Erstprüfer/in: | Zweitprüfer/in: |
| Prof. Gille | Dipl.Ing. Andreas Krieg |
| Thema: Prozesssteuerung für ein AF – PNA – Verfahren bei kommunalem Abwasser unter dem Aspekt der Energieeffizienz | |

THEMA MASTERTHESIS VON RALF K. FUCHS:

Prozesssteuerung für ein AF – PNA- Verfahren bei kommunalem Abwasser unter dem Aspekt der Energieeffizienz

SCHLÜSSELWÖRTER:

Anaerobfilter / Denitrifikation / Nitritation / Anammox / Energiebilanz / Prozesssteuerung / Treibhausgasbilanz

KURZFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Grundlagen des Energiehaushaltes auf kommunalen Kläranlagen, der anaeroben Abwasserbehandlung und der Stickstoffelimination, insbesondere des neuartigen Verfahrens, der Deammonifikation, beschrieben.

Danach werden Verfahrenskombinationen eines anaeroben Filters (AF) mit den klassischen Stickstoffeliminationsverfahren Nitrifikation und Denitrifikation, Nitritation und Denitrifikation sowie der Deammonifikation (= Partielle Nitritation Anammox =PNA) entwickelt.

Diese Verfahrenskombinationen werden in einer Versuchsanlage im Labormaßstab erprobt, wobei die Deammonifikation nur ansatzweise funktioniert hat. Mit Hilfe der Versuchsergebnisse werden die Verfahrenskombinationen weiterentwickelt und aus energetischer Sicht und bezüglich ihrer Treibhausgasemissionen bewertet.

Der Anaerobfilter ermöglicht eine größere Energieausbeute als aerobe Verfahren und durch die Deammonifikation aus den autotrophen Teilprozessen „partielle Nitritation“ und „Anammox“ sowie auch durch die Kombination mit der Nitritation / Denitrifikation wird der Energieverbrauch bei der Stickstoffelimination reduziert.

Eine energiepositive / energieautarke Kläranlage ist mit dieser Verfahrenskombination möglich.

Aufgrund der Erfahrungen in der Versuchsdurchführung wird ein Verfahrenskonzept bestehend aus den Teilprozessen anaerobe Abwasserbehandlung, Nitritation, Denitrifikation und Anammox empfohlen, das auf wechselnde CSB-Abbaugrade im Anaerobfilter durch entsprechende Prozesssteuerung reagieren kann.

Diese innovative Verfahrenskombination muss im Rahmen weiterer Forschungen geprüft sowie technisch und wirtschaftlich bewertet werden, insbesondere müssen weitere Untersuchungen der Lachgasemissionen zeigen, ob auch im Vergleich zu konventionellen Verfahren die Treibhausgasbilanz verbessert wird.

TITLE OF THE PAPER:

Process control of an AF – PNA- process in the communal wastewater treatment concerning the energy efficiency

KEYWORDS:

Anaerobic filters / denitrification / nitritation / anammox /energy balance / process control / greenhouse gas balance

ABSTRACT

In a first step the present study describes the main features of the energy budget in municipal sewage plants, of the anaerobic wastewater treatment and the nitrogen removal, especially the innovative procedure of the deammonification.

After this, new combinations of an anaerobic filter with the classical nitrogen removal, like nitrification + denitrification, nitritation + denitrification as well as deammonification (PNA = partial nitritation Anammox), are subsequently demonstrated.

These combinations were tested in an experimental station in laboratory scale, in which the deammonification worked rudimentary. Based on the test results, the combinations, described above, are further developed and valued from an energy perspective and their greenhouse gas emission.

By using an anaerobic filter it is possible to get a much higher profit of energy than in an aerobic process, and the deammonification with the two autotrophic steps of “partial nitritation” and “anammox” as well as a combination with nitritation + denitrification can even reduce the energy input for the nitrogen removal.

In these combinations the process is able to achieve a self-sufficient energy-balance of a wastewater treatment plant and even energy supplies.

Based on the experiences of the experimental results this study recommends a process concept, that consists of the sub-processes anaerobic wastewater treatment, nitritation, denitrification and Anammox, that can react fast on changing concentrations of CSB in the anaerobic filter by the aid of corresponding process control.

This innovative procedure has to be tested in scientific studies and assessed with regard on technical and economic aspects, especially further research on the emissions of nitrous oxid are necessary, as well as a comparison to conventional procedure in what concerns the reduction of greenhouse gas emissions.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG / ABSTRACT

| | |
|------------------------------------|------------|
| INHALTSVERZEICHNIS | I |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | III |
| TABELLENVERZEICHNIS | VI |
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS | VII |
| GLOSSAR | IX |

| | |
|--|-----------|
| 1. EINLEITUNG | 1 |
| 1.1. Ausgangssituation..... | 1 |
| 1.2. Zielsetzung..... | 1 |
| 1.3. Untersuchungsablauf | 3 |
| 2. GRUNDLAGEN | 4 |
| 2.1. Allgemeine Grundlagen..... | 4 |
| 2.1.1. Grundzüge der Abwasserreinigung..... | 4 |
| 2.1.2. Energiehaushalt auf Kläranlagen..... | 8 |
| 2.2. Anaerobtechnik..... | 13 |
| 2.2.1. Allgemeines..... | 13 |
| 2.2.2. Biochemische Grundlagen /Einflussfaktoren..... | 14 |
| 2.2.3. Einflussfaktoren / Prozessbedingungen..... | 15 |
| 2.2.4. Anaerobe Reaktortypen – Anaerobfilter..... | 18 |
| 2.2.5. Nachteile der Anaerobtechnik / Umweltaspekte..... | 23 |
| 2.3. Verfahren der Stickstoffelimination..... | 24 |
| 2.3.1. Nitrifikation / Denitrifikation..... | 25 |
| 2.3.2. Nitritation / Denitritation..... | 26 |
| 2.3.3. Deammonifikation / PNA..... | 26 |
| 2.3.4. Verfahrenstechnische Umsetzung..... | 30 |
| 2.3.5. Ökologische / Energetische Aspekte..... | 32 |
| 2.4. Entwicklung von Verfahrenskombinationen..... | 34 |
| 2.4.1. Einsatz bei kommunalem Abwasser..... | 34 |
| 2.4.2. Verfahrenskombinationen..... | 35 |
| 2.4.3. Mess- und Steuertechnik..... | 38 |
| 3. MATERIAL UND METHODEN | 41 |
| 3.1. Zielsetzung und Konzeption..... | 41 |
| 3.2. Versuchsanlage..... | 41 |
| 3.2.1. Anaerobfilter (AF)..... | 41 |
| 3.2.2. Belebtschlammanlage..... | 44 |
| 3.2.3. Gesamtanlage..... | 46 |
| 3.3. Grundlagen / Vorversuche..... | 47 |
| 3.3.1. Synthetisches Abwasser / Belebtschlamm..... | 47 |
| 3.3.2. Bemessungsansatz für Grundeinstellung..... | 48 |
| 3.3.3. Belüftungseinstellungen / Belüftungskonzept..... | 49 |

VERZEICHNISSE

| | |
|--|------------|
| 3.4. Versuchsdurchführung..... | 53 |
| 3.4.1. Messprogramm / Analysemethoden | 53 |
| 3.4.2. Versuchseinstellungen..... | 54 |
| 3.4.3. Versuchsreihen / Versuchsplan..... | 56 |
| 4. AUSWERTUNG / ERGEBNISSE..... | 58 |
| 4.1. Allgemeines..... | 58 |
| 4.2. Einleitewerte / Ablaufwerte..... | 59 |
| 4.2.1. Abbau der organischen Abwasserbelastung (CSB) | 59 |
| 4.2.2. Abbau der Stickstoffverbindungen..... | 61 |
| 4.3. Anaerobfilter..... | 62 |
| 4.3.1. Funktions- und Leistungsparameter | 62 |
| 4.3.2. Ergebnisse Anaerobfilter (AF) | 64 |
| 4.4. Abbauvorgänge in Belebtschlammanlage..... | 69 |
| 4.4.1. Verläufe der Konzentrationen | 70 |
| 4.4.2. Verläufe der Frachten..... | 74 |
| 4.5. Zwischenfazit: Versuchsergebnisse /Prozesssteuerungsstrategien..... | 81 |
| 4.5.1. Anaerobfilter (AF) | 81 |
| 4.5.2. Belebtschlammanlage (PNA bzw. D + N) | 81 |
| 5. VERFAHRENSBEWERTUNG / PROZESSSTEUERUNG..... | 83 |
| 5.1. Ergebnisse Versuchsreihen..... | 84 |
| 5.2. Verfahrensvarianten | 84 |
| 5.3. Variantenvergleich..... | 86 |
| 5.3.1. Zieldefinition – Untersuchungsrahmen | 87 |
| 5.3.2. Sachbilanz | 88 |
| 5.3.3. Wirkungsabschätzung | 92 |
| 5.3.4. Interpretationen und Diskussion der Ergebnisse | 94 |
| 5.4. Steuer- und Regelkonzept | 98 |
| 6. RESUMEE / AUSBLICK | 101 |
| LITERATURVERZEICHNIS | 103 |

ANHANG

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildung 2.1.1: Fließbild Kläranlage mit Belebungsverfahren [Lackner / 2015].... | 6 |
| Abbildung 2.1.2: Natürliche Belüftung/ Rezirkulation Tropfkörperverfahren [LACKNER / 2015]..... | 8 |
| Abbildung 2.1.3: Tropfkörperfüllmaterial als Aufwuchsfläche für Biofilme [LACKNER / 2015]..... | 8 |
| Abbildung 2.1.4: Stromverbrauch einer Kläranlage [VOLLERTHUN / 2008]..... | 8 |
| Abbildung 2.1.5: Spez. Stromverbrauch der Verfahrensstufen..... | 9 |
| Abbildung 2.1.6: Varianten der Faulgasnutzung [HOBUS / 2010] | 11 |
| Abbildung 2.2.1: Energiebilanz aerober und anaerober Abbau [ROSENWINKEL / 2015] | 13 |
| Abbildung 2.2.2: Schema des 4-stufigen anaeroben Abbaus [SCHÖTTLE / 2012] | 14 |
| Abbildung 2.2.3: Übersicht anaerober Verfahren [ROSENWINKEL / 2015] | 18 |
| Abbildung 2.2.4: Anaerobreaktoren [KUNST et al./ 2010] | 19 |
| Abbildung 2.2.5: CSB-Zulaufkonzentrationen / -Abbaukapazitäten [KUNST et al./ 2010] | 21 |
| Abbildung 2.2.6: CSB-Elimination in Abhängigkeit zur Temperatur [ROSENWINKEL / 2015] | 22 |
| Abbildung 2.3.1: Stickstoffelimination [HOBUS / 2010] | 24 |
| Abbildung 2.3.2: „Stoffumsatz der Deammonifikation“ mit $\eta_{\text{Nitritation}} = 0,5$ [SANDER / 2013] | 27 |
| Abbildung 2.3.3: Nitrifikationshemmung durch Ammoniak und salpetrige Säure in Abhängigkeit des pH-Werts [SANDER / 2013] | 29 |
| Abbildung 2.3.4: Reduktionsschritte der Denitrifikation - Lachgas [SCHÄPERS et al. / 2016] | 32 |
| Abbildung 2.4.1: Konzept zur Umsetzung der Deammonifikation im Hauptstrom [ROSENWINKEL et al./ 2011] | 35 |
| Abbildung 2.4.2: Variante 1a /1b Anaerobfilter (AF) + Nitrifikation + Denitrifikation Bzw. Nitritation + Denitritation..... | 36 |
| Abbildung 2.4.3: Variante 2a: Anaerobfilter (AF) + Deammonifikation (PNA – Anammox nachgeschaltet)..... | 37 |

VERZEICHNISSE

| | |
|--|-----------|
| Abbildung 2.4.4: Variante 2b?: Anaerobfilter (AF) + Deammonifikation (PNA – Anammox vorgeschaltet) | 38 |
| Abbildung 3.2.1: Versuchsstand Anaerobfilter | 42 |
| Abbildung 3.2.2: Versuchsstand Belebtschlammanlage | 44 |
| Abbildung 3.3.1: O₂-Konzentrationen Belüftungskonzept 1 | 49 |
| Abbildung 3.3.2: Belüftungskonzept 2 – 09.03.2016 | 50 |
| Abbildung 3.3.3: Belüftungskonzept 2 – 18.03.2016 | 51 |
| Abbildung 3.3.4: O₂-Zehrung – 18.03.2016 | 51 |
| Abbildung 3.3.5: O₂-Tagesmittelwerte der Minutenmessungen | 52 |
| Abbildung 3.4.1: Verfahrensfließbild mit Messstellen | 53 |
| Abbildung 4.2.1: CSB-Konzentrationen im Untersuchungszeitraum | 59 |
| Abbildung 4.2.2: CSB- und N-Abbaugrade im Untersuchungszeitraum | 60 |
| Abbildung 4.3.1: Methanmenge im Anaerobfilter | 65 |
| Abbildung 4.3.2: CSB-Fracht und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter | 65 |
| Abbildung 4.3.3: Temperaturen und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter | 66 |
| Abbildung 4.3.4: Sauerstoffgehalt und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter | 67 |
| Abbildung 4.3.5: Wasserstoffkonzentration und CSB-Abbaugrad im AF | 67 |
| Abbildung 4.3.6: CSB-Raubelastung und CSB-Abbaugrad im AF | 68 |
| Abbildung 4.3.7: Hydraulische Verweilzeit und CSB-Abbaugrad im AF | 68 |
| Abbildung 4.4.1: Verfahrensfließbild mit Messstellen und Abbauverlauf | 69 |
| Abbildung 4.4.2: Mittelwerte CSB- und N-Konzentrationen als Verlauf in den Anlagenteilen | 70 |
| Abbildung 4.4.3: „Bestwerte“ CSB- und N-Konzentrationen als Verlauf in den Anlagenteilen (25.05.2016) | 71 |
| Abbildung 4.4.4: CSB- und N- Konzentrationen als Verlauf in den Anlagenteilen (27.04.2016)..... | 73 |
| Abbildung 4.4.5: CSB- und N-Konzentrationen als Verlauf in den Anlagenteilen (22.06.2016) | 73 |
| Abbildung 4.4.6: CSB- und N-Frachten als Verlauf in den Anlagenteilen (25.05.2016) | 75 |

VERZEICHNISSE

| | |
|--|-----------|
| Abbildung 4.4.7: CSB- und N-Frachten als Verlauf in den Anlageteilen (11.05.2016) | 78 |
| Abbildung 4.4.8: CSB- und N-Frachten als Verlauf in den Anlageteilen (08.06.2016) | 80 |
| Abbildung 5.1.1: Grundvariante „Konventionelle Kläranlage“ – Belebtschlammverfahren (Variante V0) | 83 |
| Abbildung 5.2.1: Variante 3: Anaerobfilter (AF) + Denitrifikation + Nitrifikation + Anammox | 86 |
| Abbildung 5.3.1: Systemgrenze – Untersuchungsraum | 88 |
| Abbildung 5.3.2: Energiebedarf/ Energieüberschuss der Varianten - Optimierte Betriebsweise - | 92 |
| Abbildung 5.3.3: Eigenversorgungsgrad der Varianten - Optimierte Betriebsweise - | 92 |
| Abbildung 5.3.4: Treibhausgaspotential der Varianten - Optimierte Betriebsweise - | 94 |
| Abbildung 5.3.5: Energieausbeute und Energieverbrauch der Varianten - Optimierte Betriebsweise - | 95 |
| Abbildung 5.4.1: Steuer- /Regelkonzept Variante 3: Anaerobfilter + Denitrifikation + Nitrifikation + Anammox (PNA)..... | 99 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Tabelle 2.1: Mindestanforderungen deutsches Recht [DWA-Themen/ 2016]..... | 4 |
| Tabelle 3.2.1: Kenndaten und Abmessungen Anaerobfilter (Reaktor 1)..... | 42 |
| Tabelle 3.2.2: Pumpenkenndaten Anaerobfilter AF | 43 |
| Tabelle 3.4.1: Zusammenstellung der Versuchsreihen | 57 |
| Tabelle 4.2.1: Statistische Werte aller Messungen CSB- und N-Konzentrationen 23.02.-17.08.2016..... | 60 |
| Tabelle 4.4.1: Versuchseinstellungen und Substratverhältnisse aus- gewählter Probenahmetage | 75 |
| Tabelle 4.4.2: Stickstoffbilanz Behälter B1 und B2 | 79 |

VERZEICHNISSE

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------------------------------|---|
| Anammox | <u>A</u> naerobe <u>A</u> mmonium <u>O</u> xidation |
| AnAOB | <u>A</u> naerobe <u>A</u> mmonium <u>O</u> xidierende <u>B</u> akterien |
| AOB | <u>A</u> mmonium <u>o</u> xidierende <u>B</u> akterien |
| BSB ₅ | Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen |
| CH ₄ | Methan |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| CSB | chemischer Sauerstoffbedarf |
| EW | Einwohnerwert |
| H ₂ S | Schwefelwasserstoff |
| kW | Kilowatt |
| mol | Stoffmenge |
| N ₂ | Elementarer Stickstoff |
| NaOH | Natriumhydroxid |
| N ₂ H ₄ | Diimin |
| NH ₂ OH | Hydroxylamin |
| NH ₄ ⁺ | Ammonium |
| NH ₄ ⁺ -N | Ammonium-Stickstoff |
| NO | Stickstoffmonoxid |
| N ₂ O | Lachgas/ Distickstoffmonoxid |
| NOB | <u>N</u> itrit <u>o</u> xidierende <u>B</u> akterien |
| NO ₂ ⁻ | Nitrit |
| NO ₂ -N | Nitrit-Stickstoff |
| NO ₃ ⁻ | Nitrat |
| NO ₃ -N | Nitrat-Stickstoff |

VERZEICHNISSE

| | |
|---|--|
| Nm^3 | Normkubikmeter unter Normbedingungen |
| O_2 | Sauerstoff |
| org. N | Organischer Stickstoff |
| $\text{OV}_{\text{d,C}}$ | Täglicher Sauerstoffbedarf für C-Elimination |
| $\text{OV}_{\text{d,D}}$ | Sauerstoffrückgewinnung für Denitrifikation |
| $\text{OV}_{\text{d,N}}$ | Täglicher Sauerstoffbedarf für Nitrifikation |
| $\text{OV}_{\text{d,NH}_4,\text{NO}_2}$ | Sauerstoffbedarf der partiellen Nitritation |
| PNA | partielle Nitritation und Anammox |
| SBR | sequenzieller Batch Reaktor |
| THG | Treibhausgas |
| TKN | Gesamter Kjeldahl Stickstoff (engl. Total Kjeldahl Nitrogen) |
| TOC | Total Organic Carbon |
| TS | Trockensubstanz |
| ÜS | Überschussschlamm |
| η_{el} | Elektrischer Wirkungsgrad |
| η_{th} | Thermischer Wirkungsgrad |

VERZEICHNISSE

Glossar

| | |
|----------------|--|
| Anammox | vgl. Abkürzungsverzeichnis |
| anoxisch | kein gelöst vorliegender Sauerstoff [ROSENWINKEL et al./ 2015], Sauerstoff liegt nur in gebundener Form vor |
| aerob | elementarer gelöster Sauerstoff (O ₂), wird für oxidative Stoffumsetzungen im Energiestoffwechsel von Organismen benötigt |
| anaerob | beim Stoffwechsel von Organismen wird kein Sauerstoff verwendet |
| autotroph | Bakterien, die sich von anorganischen Stoffen ernähren [KUBIN / 2004][MADIGAN et al./ 2012] |
| heterotroph | Bakterien, die zur Zellsynthese auf organische Stoffe angewiesen sind [KUBIN / 2004][MADIGAN et al./ 2012] |
| mesophil | Eigenschaft von Lebewesen mittlere, nicht extreme Umweltbedingungen zu bevorzugen, insb. bei Temperaturen Temperaturbereich 20 - 45°C [WIKIPEDIA / 2015] |
| psychrophil | Eigenschaft von Lebewesen niedrige Temperaturen zu bevorzugen (kälteliebend) Temperaturbereich -5 - 20°C [WIKIPEDIA / 2015] |
| Planktomyceten | gut abgrenzbare Abteilung innerhalb der Domäne Bakterien, 1970 entdeckt; Vorkommen in Salz- u. Süßgewässern, Boden und Gewässern [WIKIPEDIA / 2015], verschiedene membran- umhüllte Zellkompartimente, in denen die Reaktionen ablaufen (z.B. Anammoxosom, vgl. Anlage A8, Anhang) |

1. EINLEITUNG

1.1 Ausgangssituation

Durch die Energiewende soll eine sichere, bezahlbare und umweltfreundliche Neuausrichtung unserer Energieversorgung erreicht werden, dies vor dem Hintergrund einer weiter wachsenden Weltbevölkerung und des steigenden Energiebedarfs. Zur erfolgreichen Gestaltung der Energiewende ist eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen in der gesamten Wertschöpfungskette und allen energetisch relevanten Bereichen erforderlich. Dazu zählen auch die abwassertechnischen Infrastruktureinrichtungen der Abwasserableitung, der Abwasserreinigung und der Schlammbehandlung.

Deutschlands Kläranlagen sind die größten Energieverbraucher im kommunalen Bereich, wobei auch ein erheblicher Anteil des Energiebedarfs durch Indirekteinleitungen aus der Industrie verursacht wird.

Darüber hinaus ist der Energiebedarf auf den industriellen Kläranlagen selbst bei der Abwasservorbehandlung erheblich.

In den Kläranlagen schlummern allerdings, auch global gesehen, erhebliche Einsparpotenziale und sogar bislang ungenutzte Energieressourcen, die noch erschlossen werden können. Energie kann auf Kläranlagen sowohl produziert als auch gespeichert werden.

1.2 Zielsetzung

In der bisherigen Abwasserbehandlung werden die im Abwasser vorhandenen Wert- und Schmutzstoffe mithilfe von Energie mineralisiert bzw. transformiert und in andere Umweltbereiche verschoben.

In der zukünftigen Abwasserbehandlung wird der Fokus auf die weitergehende Nutzung der Wertstoffe und die Vermeidung bzw. umweltfreundlichere Umwandlung von Schadstoffen bei minimalem Energieeinsatz gerichtet.

Folgende Ziele werden verfolgt:

- (1) Optimierung der Abwasserreinigung
- (2) Optimierte Ausnutzung der im Abwasser und im Schlamm vorhandenen Energie und Ressourcen
- (3) Reduzierung des Energieverbrauchs durch Energieeinsparung und Energieeffizienz

(zu 1)

Bei der Optimierung der Abwasserreinigung geht es neben der Elimination der organischen Inhaltsstoffe, ausgedrückt durch die Summenparameter BSB_5 und CSB , um die Erfüllung der Anforderungen an die Nährstoffelimination (N, P) und um die weitergehende Aufbereitung zur Elimination von Mikroverunreinigungen bzw. Krankheitserregern zur Gewährleistung eines uneingeschränkten Gewässerschutzes.

Die primäre Aufgabe einer Kläranlage bleibt die Abwasserreinigung nach dem Stand der Technik und die zuverlässige und sichere Einhaltung der wasserrechtlichen Anforderungen an die Einleitung.

(zu 2)

Die organischen Stoffe im Rohabwasser, die im Rahmen der anaeroben Abwasserbehandlung in Biogas (Klärgas) umgewandelt werden, enthalten chemische Energie. Das Biogas kann zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden mit der Zielsetzung, die in den Reinigungsprozessen benötigte Energiemenge vollständig abzudecken und sogar Energieüberschüsse in das Stromnetz einzuspeisen bzw. anderweitig zu nutzen.

Neben der Energiegewinnung muss auch der Ressourceneinsatz (Hilfsmittel wie Methanol etc., Beckenvolumina) minimiert und die Rückgewinnung von Nährstoffen (N, P) optimiert werden.

(zu 3)

Konventionelle Kläranlagen verbrauchen, insbesondere die elektrischen Antriebe von Belüftungseinrichtungen, große Energiemengen. Durch die Senkung des Energieverbrauchs im Zusammenhang mit einer optimierten Biogasausbeute (vgl. (2)) muss eine „energiepositive“ bzw. zumindest „energie neutrale“ Abwasserreinigung erreicht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden innovative Verfahrenstechniken bzw. –kombinationen vorgestellt, die in einer Versuchsanlage im Labormaßstab nachgebildet werden sollen. Möglichkeiten der Prozesssteuerung werden im Rahmen der Versuche, soweit realisierbar, und im Rahmen der Ergebnisbewertung vertieft.

Die **Anaerobtechnik** mit der genaueren Betrachtung von **Anaerobfiltern (AF)** und die **Stickstoffelimination durch Nitrifikation / Denitrifikation, bzw. Nitritation / Denitrifikation sowie Deammonifikation (= Partielle Nitritation Anammox = PNA)** stellen die wesentlichen Bausteine der untersuchten Verfahrenstechniken, -kombinationen dar.

Bei anaeroben Verfahren werden von verschiedenen Mikroorganismen, die in einer Nahrungskette agieren, in Abwesenheit von Sauerstoff energiereiche organische Substanzen bei vollständigem Umsatz zu Biogas (CH₄, CO₂) vergoren (reduziert). [KALTSCHMITT et al./ 2009] Dies bedeutet die Nutzung der organischen Substanzen als Energiequelle im Gegensatz zu herkömmlichen Abwasserreinigungsverfahren, bei denen Teile des Kohlenstoffes zu Kohlendioxid veratmet werden und dadurch einer energetischen Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen.

Bei der Stickstoffelimination ist bisher der Einsatz energieintensiver Technologien wie die der Nitrifikation / Denitrifikation erforderlich, um eine gute Reinigungsleistung zu erzielen. Einen **neuen Weg zur biologischen Stickstoffelimination** stellt das **Anammox-Verfahren** dar.

Das Akronym „Anammox“ setzt sich aus den Begriffen „**Anaerobe**“ und „**Ammonium-Oxidation**“ zusammen. Bei diesem Prozess wird Ammonium (NH₄⁺) mit Nitrit (NO₂⁻) unter anaeroben Bedingungen von Mikroorganismen zu molekularem Stickstoff (N₂) umgesetzt.

Zur technischen Umsetzung muss das Anammox-Verfahren mit der Nitritation, - der Oxidation von Ammonium zu Nitrit -, kombiniert werden, da es Nitrit benötigt. Das gesamte Verfahren wird als Deammonifikation oder Partielle Nitritation Anammox (= PNA) bezeichnet.

Dabei kann im Gegensatz zu dem herkömmlichen Verfahren (Stand der Technik) der Stickstoffelimination, bestehend aus Nitrifikation und Denitrifikation, zum einen die erforderliche Belüftungsenergie verringert und zum anderen auf den Einsatz einer zusätzlichen Kohlenstoffquelle (meist Methanol) verzichtet werden.

1.3 Untersuchungsablauf

Im *Kapitel 2* („Grundlagen“) werden zunächst als **allgemeine Grundlagen** in Kapitel 2.1 die Grundzüge der Abwasserbehandlung / -reinigung mit den rechtlichen Anforderungen vorgestellt und auf den Energiehaushalt auf Kläranlagen eingegangen.

Danach werden im Kapitel 2.2 die theoretischen **Grundlagen der Anaerobtechnik** und im Kapitel 2.3 die der **Stickstoffelimination** beschrieben.

Es werden die biochemischen Grundlagen, die Reaktortypen, Einflussfaktoren auf die Verfahrenstechnik sowie Auswirkungen / Potentiale bzgl. des Energiehaushalts für die Anaerobtechnik und die Stickstoffelimination, insbesondere die Deammonifikation erläutert.

In *Kapitel 3* werden die **Versuchsanlage**, ergänzende Versuche, die Grundlagen zur Versuchsdurchführung, das Messprogramm, Versuchseinstellungen und Versuchsreihen erörtert.

Die **Auswertung und Interpretation der Ergebnisse** erfolgt in *Kapitel 4* für die beiden Anlagenkomponenten Anaerobfilter (AF) und Belebtschlammanlage (PNA bzw. D + N) mit einem **Zwischenfazit**.

In *Kapitel 5* wird eine Bewertung der Verfahrenskombinationen in energetischer und ökologischer Hinsicht durchgeführt und ein Vorschlag für die Prozesssteuerung beschrieben.

Kapitel 6 befasst sich mit einem Ausblick auf das Anwendungspotential in kommunalen Kläranlagen. Darin werden aufgrund der Erfahrungen im Rahmen vorliegender Arbeit Vorschläge zur weiteren Etablierung/Untersuchung der favorisierten Verfahrenskombinationen in der Praxis unterbreitet.

2. GRUNDLAGEN

2.1. Allgemeine Grundlagen

2.1.1. Grundzüge der Abwasserreinigung

Es wird zwischen kommunalen, industriellen und speziellen Abwässern (z.B. Deponiesickerwasser, Krankenhausabwasser, etc.) unterschieden.

Die im Abwasser in ungelöster und gelöster Form enthaltenen Stoffe, die sich negativ auf das Ökosystem von Gewässern (stehende / fließende Gewässer, Küstengewässer) auswirken können, sind **sauerstoffzehrende Stoffe** (z.B. Ammoniumverbindungen, Glucose), **Nährstoffe**, **toxische Stoffe** (Schwermetalle, Ammoniak, Nitrit), **endokrin wirkende Stoffe** (z.B. synthetische Hormone) und **Störstoffe** (Sand, Öl, Fett, Salz). [KUNST et al./ 2010]

Mithilfe der Abwasserreinigungsverfahren sollen die Schäden infolge der Einleitung dieser Abwasserinhaltsstoffe mit dem Abwasser durch dessen Beseitigung vermieden bzw. vermindert werden. Dadurch kann die natürliche Wasserqualität wiederhergestellt werden.

■ Anforderungen an die Abwasserreinigung

Die Anforderungen für das Einleiten von gereinigtem Abwasser in ein Gewässer ergeben sich für kommunale Abwasserbehandlungsanlagen aus dem deutschen Recht (Wasserhaushaltsgesetz WHG und Abwasserverordnung AbwV) sowie dem europäischen Recht (EU-„Richtlinie über die Behandlung von kommunalen Abwässern“).

Die AbwV und die EU-Richtlinie beinhalten dabei maximale Abflußwerte für die Parameter CSB, BSB₅ (organische Belastung) und Stickstoff / Phosphor (Nährstoffe), unterschieden in verschiedene Größenklassen der Kläranlagen.

| Größenklasse | entspr. $EGW_{BSB,60}$ (E) | CSB (mg/l) | BSB ₅ (mg/l) | NH ₄ -N*) (mg/l) | N _{anorg} *) (mg/l) | P (mg/l) |
|--|----------------------------|------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------|
| 1: < 60 kg/d BSB ₅ | < 1.000 | 150 | 40 | - | - | - |
| 2: 60 – 300 kg/d BSB ₅ | 1.000 – 5.000 | 110 | 25 | - | - | - |
| 3: > 300 – 600 kg/d BSB ₅ | > 5.000 – 10.000 | 90 | 20 | 10 | - | - |
| 4: > 600 – 6.000 kg/d BSB ₅ | > 10.000 – 100.000 | 90 | 20 | 10 | 18**) | 2 |
| 5: > 6.000 kg/d BSB ₅ | > 100.000 | 75 | 15 | 10 | 13**) | 1 |

ANMERKUNGEN

*) Anforderungen für NH₄-N und N_{anorg} gelten bei Abwassertemperaturen von ≥ 12 °C. An Stelle von 12 °C kann auch eine zeitliche Begrenzung vom 1. Mai bis 31. Oktober treten.

***) In der wasserrechtlichen Zulassung kann für N_{anorg} (= NH₄-N + NO₃-N + NO₂-N) eine höhere Konzentration bis zu 25 mg/l zugelassen werden, wenn die Verminderung der Gesamtstickstofffracht ≥ 70 % beträgt.

Tabelle 2.1: Mindestanforderungen deutsches Recht [DWA-Themen / 2016]

In den einzelnen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union können eigene Regelungen, wie in Deutschland der Fall, angewendet werden, wenn sie den Anforderungen der EU –Richtlinie entsprechen.

■ Technik der Abwasserreinigung

Es werden mechanisch/physikalische, biologische und chemische Verfahren der Abwasserreinigung unterschieden.

● **Mechanisch/physikalische Verfahren**

Mechanisch/physikalische Verfahren sind die Sedimentation, die Siebung, die Abscheidung, die Flotation, die Filtration und die Adsorption.

● **Biologische Verfahren**

Es wird unterschieden zwischen aeroben und anaeroben Abwasser- und Schlammbehandlungsverfahren.

❖ Aerobe Reinigungsverfahren

Bei aeroben Verfahren werden organische Bestandteile mithilfe von Mikroorganismen in **Anwesenheit von Sauerstoff** zu organischen Endprodukten (Wasser, Kohlendioxid, etc.) abgebaut. Dies geschieht durch „Belebtschlämme“ beim Belebtschlamm- oder **Belebungsverfahren** im Belebungsbecken beziehungsweise durch „Bakterienrasen“ (Biofilter) beim **Festbettverfahren** in Tropfkörpern bzw. Tauchkörpern.

Das aerobe biologische Abwasserreinigungsverfahren stellt die Umsetzung des natürlichen Selbstreinigungsprozesses der Gewässer in einem technischen Verfahren dar (vgl. Abb. 2.1), mit dessen Hilfe alle O₂ zehrenden Stoffe aus dem Abwasser vor Einleitung in ein Gewässer eliminiert werden können. [KUNST et al./2010]

Beim aeroben Abbau werden die zu entfernenden Abwasserinhaltsstoffe durch biologische Prozesse („Veratmung“, Biomasseanreicherung) in Formen überführt, die durch Sedimentation oder Strippung (gasförmiges Austreiben) aus dem Abwasser entfernt werden können.

Eine Sonderform des Belebungsverfahrens stellt das **Aufstauverfahren** („Sequenz-Batch-Reactor“- SBR) dar, bei dem Abwasser in einen Behälter diskontinuierlich zugegeben wird und alle Abbauvorgänge in einem Behälter stattfinden. Dieser Behälter wird in einem sich wiederholenden Zyklus betrieben, der z.B. aus einer Füllungs-, Mischungs-, Belüftungs-, Absetz-, und Abzugsphase besteht.

❖ Anaerobe Reinigungsverfahren

Beim anaeroben Abbau werden organische Bestandteile unter **Abwesenheit von Sauerstoff** zu den anorganischen Endprodukten Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Ammoniak (NH₃), Schwefelwasserstoff (H₂S) und eine geringe Menge Alkohol verwandelt, vgl. Kapitel 2.2.

● Weitergehende biologische Abwasserreinigung

Unter der weitergehenden biologischen Abwasserreinigung wird die **Stickstoffelimination** und die biologische Phosphorelimination, die im Folgenden nicht weiter behandelt wird, verstanden.

Eine Stickstoffelimination ist aus folgenden Gründen besonders wichtig:

Stickstoff ist als organisch gebundener Stickstoff oder als Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) in Gewässern ein **sauerstoffzehrender Stoff**, was bei Unterschreitung einer kritischen Konzentration an gelöstem Sauerstoff zu Fischsterben führen kann.

Nitrit und Ammoniak, dessen Anteil bei Erhöhung des pH-Wertes über 7 stark ansteigt, sind stark **fischgiftig**. Stickstoff und Phosphor sind **eutrophierende Stoffe**. [BEVER et al./ 1990].

Zurzeit wird in konventionellen Anlagen überwiegend das Verfahren der Nitrifikation / Denitrifikation zum Stickstoffabbau angewandt. Dabei wird in einem ersten Schritt Ammonium mithilfe **autotropher Nitrifikanten** unter aeroben Bedingungen zu Nitrat umgewandelt, mit Nitrit als Zwischenprodukt (Nitrifikation). Die anschließende Denitrifikation, in der das Nitrat durch **heterotrophe Denitrifikanten** unter **anaeroben / anoxischen** Bedingungen zu elementarem Stickstoff umgewandelt wird, stellt den zweiten Verfahrensschritt der Stickstoffelimination dar.

Bei der Nitrifikation wird ein hoher Anteil Sauerstoff verbraucht mit hohen Energiekosten und bei der Denitrifikation ist oftmals eine zusätzliche Kohlenstoffquelle erforderlich, was mit zusätzlichen Kosten für z.B. Methanol verbunden ist. Deshalb wurde in den letzten Jahren nach **energieeffizienteren und ressourcenschonenderen Verfahren zur Stickstoff-elimination** geforscht, vgl. Kapitel 2.3.

■ Konventionelle Verfahrenskonzepte

● Belebungsverfahren

Abbildung 2.1.1 zeigt das Fließbild einer konventionellen Kläranlage mit dem Belebungsverfahren.

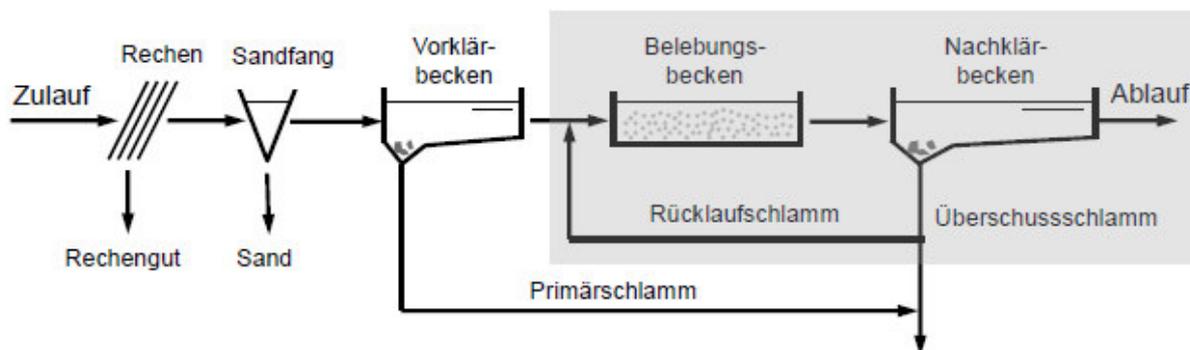


Abbildung 2.1.1: Fließbild Kläranlage mit Belebungsverfahren [LACKNER / 2015]

Der mechanischen Reinigung in Rechen und Sandfang folgt zunächst die Abscheidung der absetzbaren Stoffe in der **Vorklärung (VK)**. Diese werden als Primärschlamm abgezogen und in den Faulturm gefördert.

Das in der Vorklärung mechanisch gereinigte Abwasser fließt in die **biologische Stufe**, in der die Kohlenstoffelimination und die Nitrifikation als erster Schritt der Stickstoffelimination unter aeroben Bedingungen sowie der zweite Schritt der Stickstoffelimination, die Denitrifikation unter anaeroben / anoxischen Bedingungen stattfinden.

Die Biomasse („belebter Schlamm“) wird im **Nachklärbecken (NK)** durch Absetzen vor dem Kläranlagenablauf vom gereinigten Abwasser getrennt und in den Zulauf der biologischen Stufe als Rücklaufschlamm zur Biomassenanreicherung zurückgeführt. Der überschüssige belebte Schlamm wird als Überschussschlamm in den Faulturm gepumpt.

Im **Faulturm** bildet sich unter anaeroben Bedingungen Biogas, das z.B. in einem Blockheizkraftwerk energetisch genutzt werden kann. Außerdem entsteht Prozesswasser, das direkt aus dem Faulturm oder aus der weitergehenden Schlammentwässerung wieder zurück in die biologische Stufe gelangt, wodurch es zu einer Rückbelastung von Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) kommt.

Die Denitrifikation kann im separaten Becken zur Nitrifikation vorgeschaltet oder nachgeschaltet sowie simultan / intermittierend betrieben werden. Die Nachschaltung bietet sich bei Abwässern mit hohem Kohlenstoffgehalt (großes CSB / $\text{NO}_3\text{-N}$) an.

Bei der vorgeschalteten Denitrifikation fließt der Zulauf mit dem Rücklaufschlamm vermischt in das unbelüftete Denitrifikationsbecken. Aus dem Ablauf des Nitrifikationsbeckens wird zusätzlich eine Rezirkulationsabwassermenge in das Denitrifikationsbecken gepumpt, um die hier erforderliche ausreichende CSB-Fracht zu gewährleisten. Falls die CSB-Fracht nicht ausreicht, muss z.B. Methanol in das Denitrifikationsbecken zugegeben werden.

● **Tropfkörperverfahren**

Beim Tropfkörperverfahren verläuft die mechanische Reinigung analog zum Belebungsverfahren.

Danach wird das mechanisch vorgereinigte Abwasser mittels Pumpe und Drehsprenger gleichmäßig auf der Oberfläche der Tropfkörperfüllung verteilt. Während des Durchtropfens werden die Abwasserschmutzstoffe von den Mikroorganismen, die auf den Oberflächen des Tropfkörperfüllmaterials (vgl. Abb. 2.1.3) als Biofilm oder „Tropfkörperrasen“ herangewachsen sind und dort haften, eliminiert. [KUNST et al./2010]

Der Biofilm wird z.T. kontinuierlich abgespült, damit es nicht zu Verstopfungen im Tropfkörper kommt und dann durch Sedimentation im Nachklärbecken abgetrennt.

Im Vergleich zum Belebungsverfahren erfolgt die Erhöhung der Biomassenkonzentration durch die Bereitstellung der Aufwuchsflächen und nicht durch die Schlammrückführung (Rücklaufschlamm).

Der Tropfkörper kann, was die Belüftung angeht, weitestgehend mit natürlicher Energie (Luftstrom durch das Füllmaterial → Kamineffekt) arbeiten, jedoch sind höhere Pumpenleistungen durch Rezirkulationen und mehrfaches Fördern auf den Tropfkörper erforderlich (vgl. Abb.2.1.2).

In dem Tropfkörper erfolgt Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation. In einem Tropfkörper ist zwar auch eine Denitrifikation möglich, jedoch wird i.d.R. eine Denitrifikationsstufe vorgeschaltet, in der der zweite Schritt der Stickstoffelimination und auch ein Kohlenstoffabbau stattfindet. Hier ist eine Zwischenklärung nach dem Denitrifikationsbecken erforderlich.

Bezüglich der Schlammbehandlung (Biogas / Prozesswasser) ist das Verfahren mit dem Belebungsverfahren vergleichbar, wobei die Schlammproduktion beim Tropfkörperverfahren geringer ist.

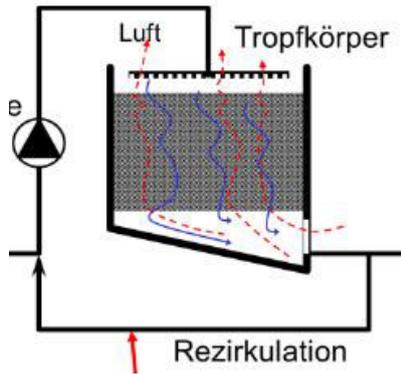


Abbildung 2.1.2:
Natürliche Belüftung/Rezirkulation
Tropfkörperverfahren [LACKNER / 2015]



- Steine oder Plastikmaterial
- Spezifische Oberfläche ca.
 - 60 m²/m³ (Stein) und
 - bis zu 150 m²/m³ (Plastik)



Abbildung 2.1.3:
Tropfkörperfüllmaterial als Aufwuchs-
fläche für Biofilme [LACKNER / 2015]

2.1.2 Energiehaushalt auf Kläranlagen

Für die Abwasserbehandlung insbesondere in konventionellen kommunalen Kläranlagen ist ein erheblicher Einsatz von Energie erforderlich. Neben Rücklaufschlamm- /Rezirkulationspumpen und Umwälzeinrichtungen (Rührwerke) verbrauchen hauptsächlich die elektrischen Antriebe von Belüftungsaggregaten zur Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen erhebliche Strommengen.

Innerhalb einer Kommune stellen Kläranlagen den größten Einzelverbraucher mit über 20 bis 30% des Gesamtverbrauchs dar.

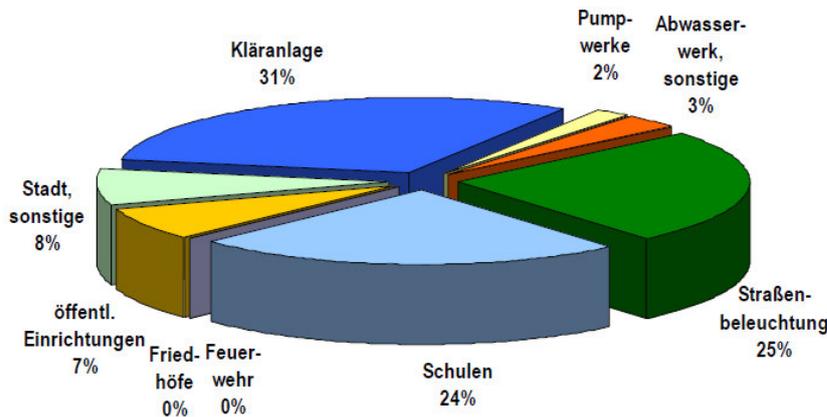


Abbildung 2.1.4 : Stromverbrauch einer Kommune [VOLLERTHUN / 2008]

Gleichzeitig enthält Abwasser jedoch auch Energie in Form von Wärme und chemisch gebundener Energie, die im Rahmen der Abwasserbehandlung genutzt werden kann. Sowohl bei der anaeroben Schlammstabilisierung als auch bei der anaeroben Abwasserbehandlung fällt Klär- bzw. Faulgas (Biogas) als Nebenprodukt an, das für die Eigenproduktion von Strom und Wärme in Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden kann. [MERGELMEYER et al./ 2014]

Der chemische Energiegehalt der organischen Stoffe im Rohabwasser ist so groß, dass die bisher im Reinigungsprozess benötigte Energiemenge komplett kompensiert und sogar ein Energieüberschuss zur weiteren Nutzung erzeugt werden könnte.

Somit gilt es in der Abwasserbehandlung zum Einen den Energieverbrauch zu reduzieren, was durch maschinentechnische und verfahrenstechnische Effizienz-/ Optimierungsmaßnahmen erfolgen kann.

Zum Anderen wird als Ziel verfolgt, die Energieerzeugung und dadurch die Energieausbeute bei der Abwasser- / Schlammbehandlung zu steigern, um insgesamt mindestens eine „energie neutrale“, besser noch eine „energie positive“ Kläranlage zu erhalten, die sogar Energie an das Öffentliche Energienetz oder andere externe Nutzer abgeben könnte.

Korrespondierend zur Reduktion des Energieverbrauchs ist neben diesen wirtschaftlichen Vorteilen auch eine Senkung des CO₂- Ausstoßes von großer Bedeutung.

■ Energieverbraucher

Der durchschnittliche Stromverbrauch von größeren Kläranlagen liegt zwischen 33 – 35 kWh pro Einwohnerwert (EW) im Jahr. [REMY et al./ 2015]

Insgesamt liegt der Schwankungsbereich zwischen 20 und 90 kWh / EW * a, wobei eine energetisch optimierte Kläranlage ca. 25 kWh / EW * a verbraucht. [HORN et al./ 2009]

Aus nachfolgender Abbildung (vgl. Abbildung 2.1.5) ist die Verteilung des spezifischen Stromverbrauchs beim Belebungsverfahren ersichtlich:

- Belüftung ca. 50 %,
- Abwasser- / Schlammförderung und Rezirkulationen ca. 10 %,
- Umwälzungen (Faulbehälter, Denitrifikation) ca. 10 %,
- Schlammbehandlung ca. 10 - 15 %
- und weitere Verbraucher (Sandfang, Rechen, Filtration) ca. 10 – 20 %

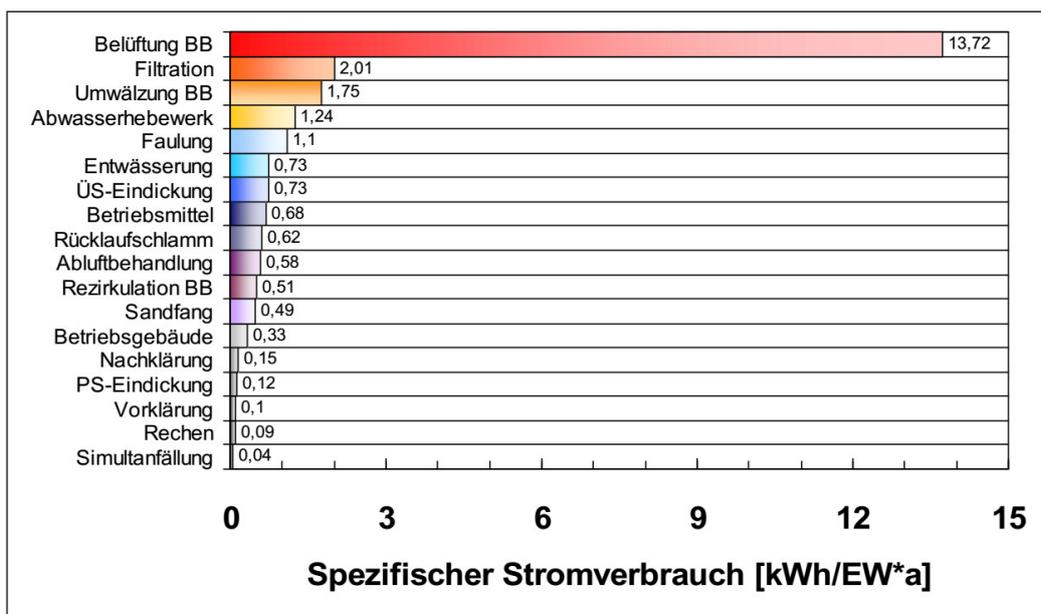


Abbildung 2.1.5: Spez. Stromverbrauch der Verfahrensstufen

Klärschlamm-trocknung und Klärschlamm-verbrennung sind als zusätzliche Verfahrensschritte zu sehen und werden im Weiteren nicht betrachtet.

Der Wegfall der intensiven Belüftung der Belebungsstufe wäre ein Schlüsselfaktor auf dem Weg in Richtung einer energieneutralen Abwasserreinigung. [WARTHMAN et al. / 2010]

Einsparungen des Energieverbrauchs sind auf der einen Seite durch **Verbesserung der Wirkungsgrade** der eingesetzten Maschinen (Pumpen, Belüftung, etc.) sowie durch die Verbesserung deren Effizienz (Steuerung, Regelung, Betriebsweise) möglich.

Auf der anderen Seite sind **konzeptionelle Änderungen** durch neue Formen der Abwasserentsorgung zunehmend in der Diskussion:

- Trennsysteme in der Kanalisation, bis hin zur Trennung von Grau- / Schwarz- bzw. Gelbwasser unter Einbeziehung von Vakuumsystemen zum Abwassertransport.
- Abwasserreinigungsverfahren/ Verfahrenskomponenten
 - vermehrter Einsatz der **Anaerobtechnik**
 - Einsatz von **Tropfkörpern**
 - Neuartige Methoden der Stickstoffelimination, wie die **Deammonifikation**

Diesen Verfahren bzw. Verfahrenskomponenten ist die Reduzierung der erforderlichen Belüftungsenergie gemeinsam.

■ Energiepotential / Energieausbeute

Die in der organischen Masse gebundene Energie im Zulauf einer Kläranlage kann nach Literaturwerten über die spezifische CSB-Fracht von 120g / (EW * d) [z.B. ATV-DVWK – A131 / 2000] bestimmt werden:

In der Literatur wird von einem theoretischen Energiepotential von 140 – 175 kWh / (EW * a) im Rohabwasser einer kommunalen Kläranlage ausgegangen. [REMY et al./ 2015; HARTWIG / 2013]

Bei einer konventionellen kommunalen Kläranlage gelangen 60 – 75 % über Primär- / Sekundär- und Überschussschlamm in den Faulgasbehälter der Schlammbehandlung, in dem ca. 40 – 50 % der Organik durchschnittlich abgebaut werden können. [HORN et al./ 2009] Somit können der energetischen Nutzung, z.B. in einem Blockheizkraftwerk, zwischen ca. 42 und 52 kWh / (EW * a), folglich nur ca. 30 % des theoretischen Energiepotentials, zugeführt werden.

Mit den Wirkungsgraden moderner Blockheizkraftwerke von ca. 38 – 42 % wäre damit die Erzeugung von zwischen 17 und 21 kWh / (EW * a) Energie möglich, d.h. für eine energetisch optimierte konventionelle kommunale Kläranlage mit ca. 25 kWh / (EW *a) müssten noch für obiges Rechenbeispiel ca. 5 – 10 kWh / Fremdenergie bezogen werden.

Die entscheidenden Faktoren zur Optimierung der Energieausbeute liegen in der **Optimierung der Gaserzeugung** und der **Verbesserung der Gasnutzung**.

Die Steigerung der Gaserzeugung kann durch die Verfahrensart der Abwasserreinigung, d.h. durch Größe und chemische Unterstützung (Vorfällung) der Vorklärung, Schlammalter der Biologie, Prozesswasserbehandlung durch Deammonifikation und den **Einsatz der Anaerobtechnik als Abwasserbehandlungsverfahren** beeinflusst werden.

Ebenso kann die **Faulgasausbeute** durch entsprechende Schlammvorbereitung (Verfahren der Desintegration und hohe Wirkungsgrade der Voreindickung) beeinflusst werden. Desweiteren kann bei der Schlammfaulung durch vollständige Nutzung des vorhandenen Faulraums (Verbundkonzepte, Kofermentation durch mehrstufige Faulung) und Temperaturanpassung der Faulgasertag gesteigert werden.

Die wirtschaftlichste und umweltfreundlichste Lösung für die Gasnutzung stellt die **Kraft-Wärme-Kopplung** (KWK) mittels BHKWs und Mikrogasturbinen dar.

Die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen erhöht sich prinzipiell mit steigenden Vollbenutzungsstunden und der Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades von BHKWs.

Die Faulgasnutzung in **BHKWs** ist auch unter Klimaschutzgründen aufgrund der vermiedenen direkten CO₂-Emissionen allen anderen Nutzungen vorzuziehen. [MERGELMEYER et al./ 2014]

■ Energienutzung

Das Nutzungsspektrum des in anaeroben Abwasser - / Schlammbehandlungsstufen gewonnenen Klärgases reicht von der ausschließlichen Wärmenutzung über die kombinierte Wärme- und Stromnutzung am Standort bis zur externen Gasnutzung im öffentlichen Erdgasnetz (vgl. Abbildung 2.1.6).

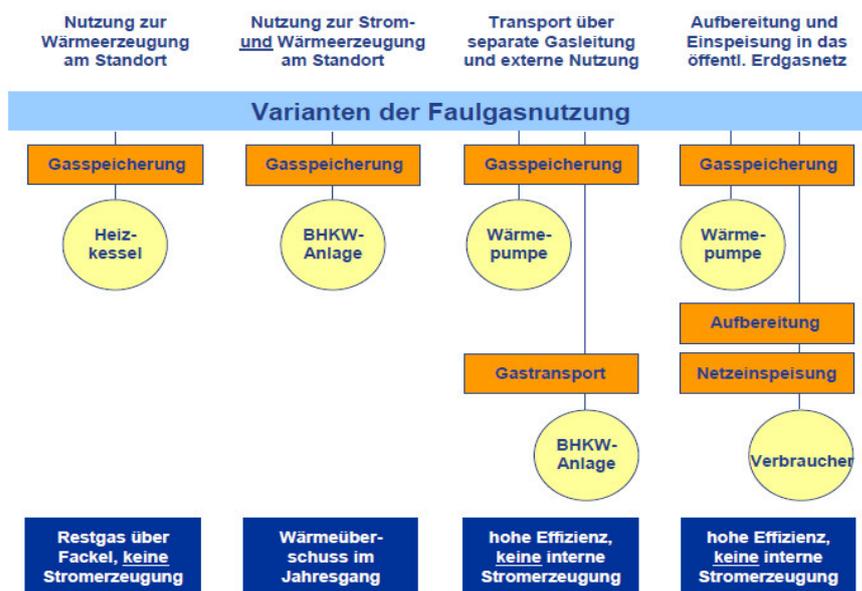


Abbildung 2.1.6: Varianten der Faulgasnutzung [HOBUS / 2010]

Nach einer Gasspeicherung kann die Energieerzeugung durch Heizkessel, BHKWs bzw. Wärmepumpen oder auch Gasturbinen erfolgen.

Ebenfalls denkbar wäre bei Kläranlagen, in denen mehr elektrischer Strom erzeugt als benötigt wird, eine Einspeisung in das öffentliche Stromnetz bzw. in dezentrale Stromnetze größerer Verbraucher (Industriebetriebe etc.).

■ Verbundkonzepte

Folgende Möglichkeiten von Verbundkonzepten werden kurz vorgestellt: [MERGELMEYER et al./ 2014]

- Regenerationsverbund
- Schlammverbund
- Wärmeverbund

Beim **Schlammverbund** sollen die Kapazitätsreserven von Faultürmen in Kläranlagen durch Transport der Klärschlämme von Kläranlagen ohne Schlammfäulung zu Kläranlagen mit Schlammfäulung ausgeschöpft werden.

Durch die resultierende größere Gasmenge kann mehr Strom und Wärme durch Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt werden.

Durch einen **Wärmeverbund** sollen insbesondere die Wärmeüberschüsse, die auf Kläranlagen in den Sommermonaten auftreten, an nahegelegene Verbraucher, z.B. Schwimmbäder, Nahwärmenetze evtl. mit Warmwasserpufferspeicher abgegeben werden.

Beim **Regenerativverbund** ergibt sich zunächst die Möglichkeit durch die Integration weiterer erneuerbarer Energien wie Windenergie und Photovoltaik den Eigenversorgungsgrad zu erhöhen. Die Energie von Faulgas kann gespeichert und bedarfsgerecht auf der Kläranlage eingesetzt oder an Dritte (Energieversorger, Industrie-/Gewerbegebiete etc.) abgegeben werden. Eine nachgeschaltete Kraft-Wärme-Kopplung kann leichter im Bereich des optimalen elektrischen Wirkungsgrades betrieben werden mit einer höheren Energieausbeute als Folge. Inwieweit Kläranlagen als große Energieverbraucher, -erzeuger und -speicher zur Stabilität im Energienetz, die durch den gestiegenen Anteil volatiler Energieerzeuger (Wind, Photovoltaik) gefährdet ist, beitragen können, ist Gegenstand aktueller Forschung.

2.2. Anaerobtechnik

2.2.1. Allgemeines

Bei der aeroben Abwasserreinigung werden die Kohlenstoffverbindungen (organische Stoffe) durch Mikroorganismen bis zu anorganischen Endprodukten (CO₂ und H₂O) veratmet und als Überschussschlamm (abgestorbene Biomasse) ausgeschieden, vgl. [KUNST et al. / 2010].

In der anaeroben Abwassertechnik wird der Kohlenstoffgehalt im Abwasser fast ausschließlich durch Mikroorganismen in Biogas (CH₄, CO₂) umgewandelt, der Überschussschlammanteil ist sehr niedrig.

Die Unterschiede zwischen aerobem und anaerobem Abbau eines kohlenhydrathaltigen Abwassers bezüglich der Energiebilanzen zeigt Abbildung 2.2.1.

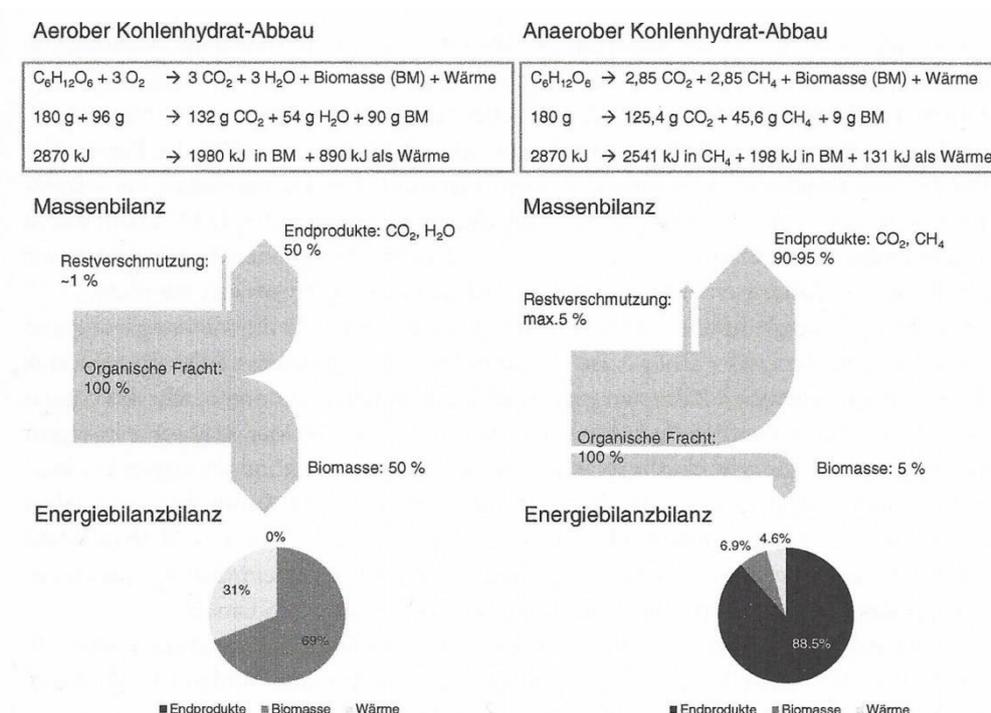


Abbildung 2.2.1 : Energiebilanz aerober und anaerober Abbau [ROSENWINKEL / 2015]

Es ist zu erkennen, dass beim aeroben Abbau die Energie in das Biomassewachstum (Schlammproduktion) und die Wärmefreisetzung investiert wird (insgesamt 50 %). Durch die Endprodukte CO₂ und H₂O erfolgt kein Energiegewinn.

Beim **anaeroben Abbau** ist dagegen ein hoher Energiegewinn durch das Endprodukt CH₄ möglich, das als nutzbarer Energieträger eingesetzt werden kann. Es wird wenig Energie in das Biomassenwachstum gesteckt, das deshalb nur langsam erfolgen kann. Ebenso wird beim anaeroben Abbau nur ein geringer Wärmegewinn erzielt, so dass die erforderliche Prozesswärme unter Energieeinsatz bereitgestellt werden muss.

Bei anaeroben Abwasserreinigungsverfahren können Abbaugrade von 65 – 95 % für den CSB erreicht werden, eine gezielte Stickstoffelimination ist jedoch nicht möglich. [HORN et al./ 2009] Daher ist eine **Nachbehandlung zur Stickstoffelimination und zum Abbau des Rest-CSB erforderlich**.

In der industriellen Abwasserreinigung (Brauereien, Brennereien, Lebensmittelindustrie, Papier- und Zellstoffindustrie) ist der Einsatz schon seit längerem erforscht und verbreitet, in der kommunalen Anwendung besteht noch Forschungsbedarf.

Im Vergleich zu konventionellen aeroben Abwasserreinigungsverfahren bietet die Anaerobtechnik folgende Vorteile: [WARTHMAN et al. / 2010, ROSENWINKEL / 2015, THORMEYER / 2009]

- Geringer Energieeinsatz (keine Belüftung erforderlich).
- Rückgewinnung hochwertiger Energie (Methangas, Strom).
- Geringer Anfall von überschüssigem Schlamm, der entsorgt werden muss (ca. 80 % geringer als bei den aeroben Verfahren); Schlamm aufgrund des hohen Schlammalters bereits gut stabilisiert,
- Möglichkeit der Nährstoffrückgewinnung,
- Gut geeignet für Kampagnebetrieb, da anaerobe Biomasse schnell wieder aktiv ist; *im Kontext zur Energiebetrachtung (Verbundkonzepte, s.o.) auch als Regelbaustein. [eigene Anmerkung]*
- Niedrige Kosten für Betrieb und Unterhalt.
- Geringer Platzbedarf, vergleichsweise geringe Behältervolumen, da mit hohen CSB-Raubelastungen (5 bis 15 kg CSB/m³ im Vgl. zu aeroben Verfahren mit 0,3 kg CSB/m³) zu betreiben.

2.2.2. Biochemische Grundlagen / Einflussfaktoren

Beim anaeroben Abbauvorgang von organischen Inhaltsstoffen interagieren im Rahmen eines mehrstufigen Prozesses unterschiedliche Bakteriengruppen. Dabei wird unter Luftabschluss ein sogenanntes Biogas (Gemisch aus CO₂, ca. 40% und CH₄, ca. 60%) erzeugt. [HORN et al./ 2009]

Der anaerobe Abbau der Biomasse läuft bis zum Methan in vier Stufen ab, vgl. Abbildung 2.2.2, wobei unterschiedliche aufeinander angewiesene Organismengruppen beteiligt sind.

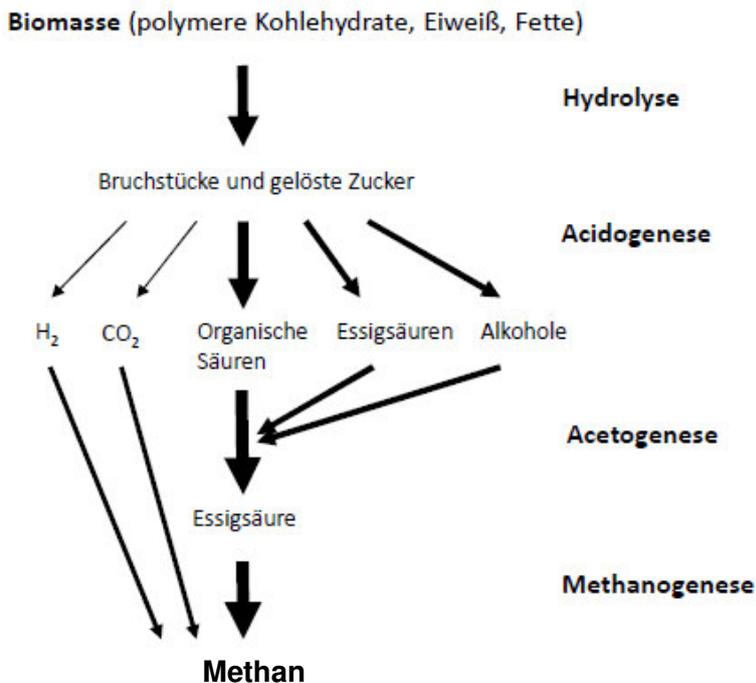


Abbildung 2.2.2: Schema des 4-stufigen anaeroben Abbaus [Schöttle / 2012]

In der **Hydrolyse (1.-Stufe)** werden die hochmolekularen Stoffe wie Stärke, Zellulose, Fette und Eiweiße durch Enzyme der Mikroorganismen (Amylasen, Proteasen und Zellulasen) in niedermolekulare Stoffe wie Zucker, organische Säuren und Aminosäuren katalytisch gespalten.

In der **2. Stufe, der Acidogenese** (auch Fermentation oder Versäuerung genannt) werden die Zucker von einer Mischkultur versäuernder Bakterien (vgl. [URBAN / 2009]) in organische Säuren (Butter-, Propion-, Essig-, Milchsäure), Aldehyde und Alkohole umgewandelt. Gleichzeitig entsteht H_2 und CO_2 .
Der pH-Wert in dieser Phase ist ein wichtiger Einflussfaktor auf die Bildung der Säurearten.

Die organischen Säuren werden in der **3. Stufe, der Acetogenese**, in Essigsäure (Acetat) und in Wasserstoff umgesetzt. Die reaktionsbestimmenden Größen in der Acetogenese sind der H_2 -Partialdruck und der pH-Wert.

In der **4. Abbaustufe, der Methanogenese** erfolgt die Umwandlung von Essigsäure, Wasserstoff und CO_2 zu Methan (CH_4). Die an diesen Reaktionen beteiligten Mikroorganismen brauchen strikt anaerobe Bedingungen. Dieser letzte Abbauschritt des Substrats erfolgt über zwei Wege, entweder über Essigsäure oder über H_2 und CO_2 als Kohlenstoffquelle. [URBAN / 2009] Der größte Teil des CSB wird über Essigsäure abgebaut, deshalb kommt den hierfür verantwortlichen Mikroorganismen eine sehr wichtige Rolle im anaeroben Abbauprozess zu, da dadurch neben der Abbauwirkung auch der pH-Wert im neutralen Bereich gehalten und der Reaktor vor Versäuerung geschützt werden kann.

Der Abbauerfolg der Vorphasen 1 bis 3 ist dafür entscheidend, wieviel verwertbares Substrat den Bakterien der methanogenen Phase zur Verfügung gestellt werden kann und somit wieviele organische Verbindungen zu Methan umgewandelt werden können. Bei biologisch leicht abbaubaren Stoffen, die in den ersten beiden Stufen relativ leicht zersetzt werden können, ist die 3. Phase, die acetogene Phase, der geschwindigkeitsbestimmende Schritt [HORN et al. /2009]. Dies gilt auch für Abwasser, das nach einer langen Passage durch ein Kanalsystem schon vorversäuert ist.

Bei biologisch schwer abbaubaren Stoffen kann bereits die Aufspaltung in niedermolekulare Stoffe in der Hydrolyse limitierend wirken.

2.2.3. Einflussfaktoren / Prozessbedingungen

Für die verschiedenen Bakteriengruppen der einzelnen Abbaustufen gibt es unterschiedliche Einflussfaktoren / Prozessbedingungen.

► Temperatur

Anaerobe Mikroorganismen können bezüglich ihrer optimalen Umgebungstemperatur in drei Gruppen eingeteilt werden:

psychrophil: $T < 20^\circ C$

mesophil: $T 25^\circ - 40^\circ C$

thermophil: $T > 45^\circ C$
[V. LIER et al. / 1997]

Die Temperaturoptima liegen nach [KUNST et al. / 2010] für die Acidogenese bei $30^\circ C$ und für die Acetogenese und die Methanogenese bei $35^\circ - 37^\circ C$, verbunden mit den besten Umsatz- und Wachstumsraten der Mikroorganismen.

Anaerobe Verfahren reagieren empfindlich auf Temperaturveränderungen, weshalb auf konstante Innentemperaturen im Reaktor zu achten ist.

Da der Energieaufwand zur Erwärmung des Abwassers in der kommunalen Abwasserreinigung nicht über den Energiegewinn durch das Biogas gedeckt werden kann, werden kommunale, anaerobe Abwasserbehandlungsanlagen im psychrophilen Temperaturbereich bzw. in Abhängigkeit von den örtlichen Klimaverhältnissen bis in den mesophilen Bereich betrieben. Der Vorteil psychrophiler Mikroorganismen ist deren hohe Toleranz gegenüber Temperaturveränderungen, wodurch ein stabiler Betrieb gewährleistet werden kann. [URBAN / 2009]

► **pH-Wert**

Insgesamt ist der optimale pH-Bereich für anaerobe Mikroorganismen mit zwischen 6,8 und 7,8 enger gefasst als für aerobe Mikroorganismen zwischen 5,5 und 8,5. [URBAN / 2009]

Dabei sind die Mikroorganismen der Hydrolyse und säurebildenden Phase toleranter gegenüber niedrigen pH-Werten im Bereich 5,2 – 6,3. [HORN et al. / 2009]

Die Optimierung der Acetogenese und der Methanogenese liegt zwischen pH-Werten von 6,8 – 7,2 [KUNST et al. / 2010]. Bei einstufiger Betriebsweise ist ein pH-Wert, der um 7 liegt, günstig.

Kurzzeitige Änderungen des pH-Wertes, z.B. das Absinken in den sauren Bereich, kann durch das Wechselspiel zwischen dem im anaeroben Prozess ständig gebildeten CO₂ und dem pH-Wert abgepuffert werden (Kohlensäure-Puffersystem). Bei Absinken des pH-Wertes diffundiert das gelöste CO₂ in die Gasphase und puffert den pH-Wert-Abfall ab, steigt der pH-Wert, so diffundiert CO₂ aus der Gasphase und puffert den pH-Wert-Anstieg ab [URBAN / 2009].

► **Hemmstoffe / Giftstoffe**

Hemmstoffe führen zu reversiblen Veränderungen der kinetischen Parameter der Biomasse, Giftstoffe zur Abtötung der Biomasse aufgrund ihrer Toxizität.

Hemmstoffe sind Sauerstoff, Schwefelwasserstoff (H₂S), organische Säuren, Ammoniumstickstoff sowie Schwermetalle. In Abhängigkeit ihrer Dosis und Konzentration können diese auch toxisch wirken.

Sauerstoff: Bei Konzentrationen > 0,1 mg/ werden die strikt anaeroben Organismen der Methanogenese gehemmt, die fakultativen Anaerobier der ersten Abbauphasen können den gelösten Sauerstoff relativ schnell abbauen, so dass ein geringer Eintrag über einen kurzen Zeitraum tolerierbar ist [MUMME / 2008]

Schwefelwasserstoff (H₂S): Beim anaeroben Prozess kommt es zur Schwefelwasserstoffbildung durch Reduktion von Sulfaten bzw. den Abbau eiweißreicher Substanzen. Die Hemmwirkung geht größtenteils vom undissoziierten H₂S aus, wobei die Hemmwirkung bei 25 – 50 mg/l (≅ 1 – 2% des gebildeten Biogases) beginnt und ab 200 – 300 mg/l (ca. 10% des gebildeten Biogases) zum Erliegen des Prozesses führt. [MUMME / 2008]

Das Verhältnis zwischen undissoziiertem und dissoziiertem H₂S ist abhängig vom pH-Wert, je niedriger dieser ist, desto mehr liegt undissoziierter Schwefelwasserstoff vor und um so größer wird die Hemmung des Abbauprozesses.

Organische Säuren: Eine Hemmung aufgrund organischer Säuren (Substrathemmung) kann durch zu hohe Zulaufkonzentrationen dieser entstehen oder durch zu starke Anreicherung während des Abbauprozesses bei gehemmter Methanogenese. Es wird davon ausgegangen, dass der undissoziierte Anteil der Säuren hemmend wirkt. Diese liegen bei niedrigen pH-Werten zu einem größeren Anteil vor analog zum Schwefelwasserstoff [URBAN / 2009]. Am stärksten ist die Hemmwirkung von Propionsäure.

Ursache für die Anreicherung der undissoziierten flüchtigen Säuren könnten nach [AUSTERMANN – HAUN / 1997] eine fehlerhafte Inbetriebnahme, organische Überlastung sowie Temperaturschwankungen sein.

Ammoniumstickstoff: In der Kanalisation wird aus dem im kommunalen Rohabwasser vorhandenen organischen Stickstoff (Harnstoffe, Eiweißverbindungen) $\text{NH}_4\text{-N}$ gebildet. Vergleichbar mit den organischen Säuren ist der undissoziierte Anteil, als Ammoniak (NH_3) bezeichnet, für die Hemmung des Abbauprozesses durch Absenkung der Aktivität der Methanbildner verantwortlich, wodurch es zu einem Anstieg der organischen Säuren im Reaktor kommt. [LOOSEN / 2012]

Im Gegensatz zu den organischen Säuren nimmt der undissoziierte Anteil des Ammoniums mit steigendem pH-Wert, somit im basischen Bereich, zu, z.B. setzt bei pH 7,8 ab einer $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen von 100 mg/l eine Hemmung ein. [URBAN / 2009]

► Nährstoffe / Spurenelemente

Nährstoffe, Spurenelemente und Vitamine benötigen die Mikroorganismen zum Aufbau der Zellsubstanz und zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen. Bei optimaler Versorgung können maximale Wachstums- und hohe Umsatzraten erreicht werden:

- Mindestnährstoffverhältnis:

CSB : N : P = 800 : 5 : 1 [HORN et al./ 2009]

C : N : P = 600 : 15 : 5 [Schöttle / 2012]

CSB : N : P = 1000 : 5 : 1, hochversäuertes Wasser [THORMEYER / 2009]

CSB : N : P = 350 : 5 : 1, teilw.versäuertes Wasser [THORMEYER / 2009]

- Essentielle Spurenelemente:

Nickel, Kobalt, Molybdän, Eisen, Selen und Wolfram

► Generationszeiten [Schöttle / 2012]

- versäuernde Bakterien (2.Stufe): 1 – 2 Tage
- acetogene Bakterien (3. Stufe): 2 – 10 Tage
- methanogene Bakterien (4. Stufe): 3 – 5 Tage bis 14 Tage

► H₂-Konzentrationen [KUNST et al./ 2010] bzw. Wasserstoffpartialdruck

- acetogene Bakterien:
nur bei sehr geringem Wasserstoffpartialdruck $< 10^{-4}$ bar stoffwechselaktiv, ansonsten können sie nicht überleben.
- methanogene Bakterien
benötigen Wasserstoff als Elektronendonator, unempfindlich gegenüber höheren H₂-Konzentrationen.

2.2.4 Anaerobe Reaktortypen - Anaerobfilter

Das Ziel der Anaerobreaktoren ist es, gute Abbauergebnisse bei niedrigen hydraulischen Verweilzeiten und großen Raumbelastungen und gleichzeitig hoher Prozessstabilität zu erreichen.

Die anaerobe Abwasserbehandlung wird durch folgende Faktoren beeinflusst:
[HORN et al./ 2009]

- ❖ Menge an im Reaktor zurückgehaltener Mikroorganismen
- ❖ Kontakt zwischen Abwasser und Mikroorganismen (Durchmischung) zur ausreichenden Versorgung der aktiven Biomasse mit abbaufähigem Substrat. Die Symbiose zwischen den einzelnen Bakteriengruppen darf durch zu intensive Umwälzung nicht gestört werden (Scherbeanspruchung).
- ❖ Temperatur, pH-Wert und Abwasserzusammensetzung

Die Gliederung anaerober Verfahren erfolgt über die Art der Biomassenanreicherung:

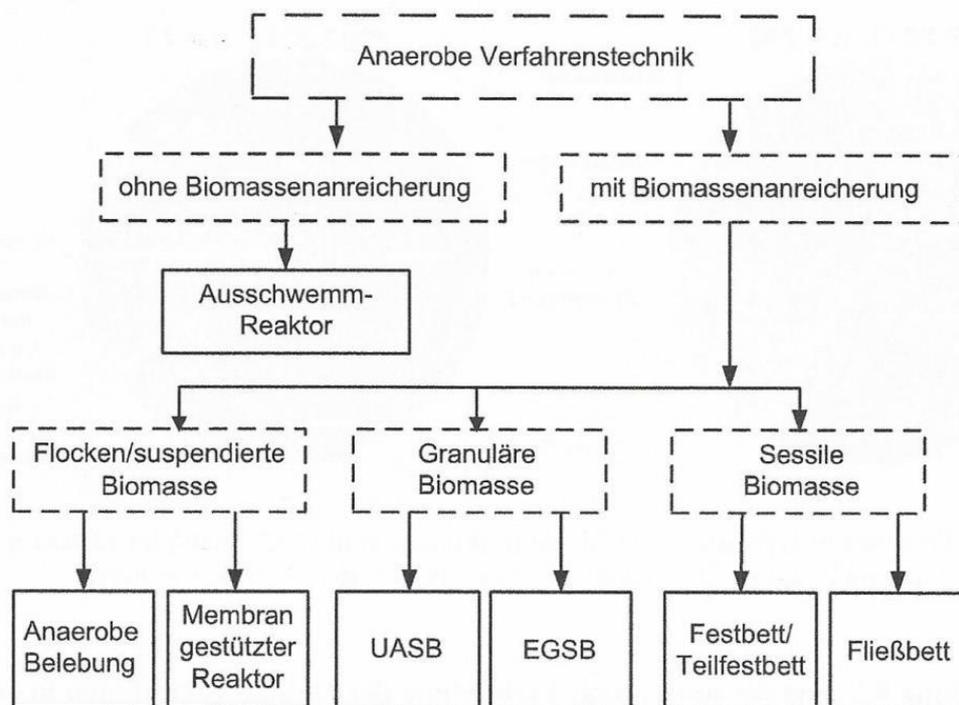


Abbildung 2.2.3: Übersicht anaerober Verfahren [ROSENWINKEL / 2015]

Die größte Verbreitung (1957 – 2012) haben die Schlammbettreaktoren EGSB mit 39% und die UASB-Reaktoren mit 23% gefolgt von der Anaerobbelebung mit 20% und den Festbettreaktoren mit 14%. [ROSENWINKEL / 2015]

Abbildung 2.2.4 zeigt in einer schematischen Darstellung einige Anaerob-Reaktoren.

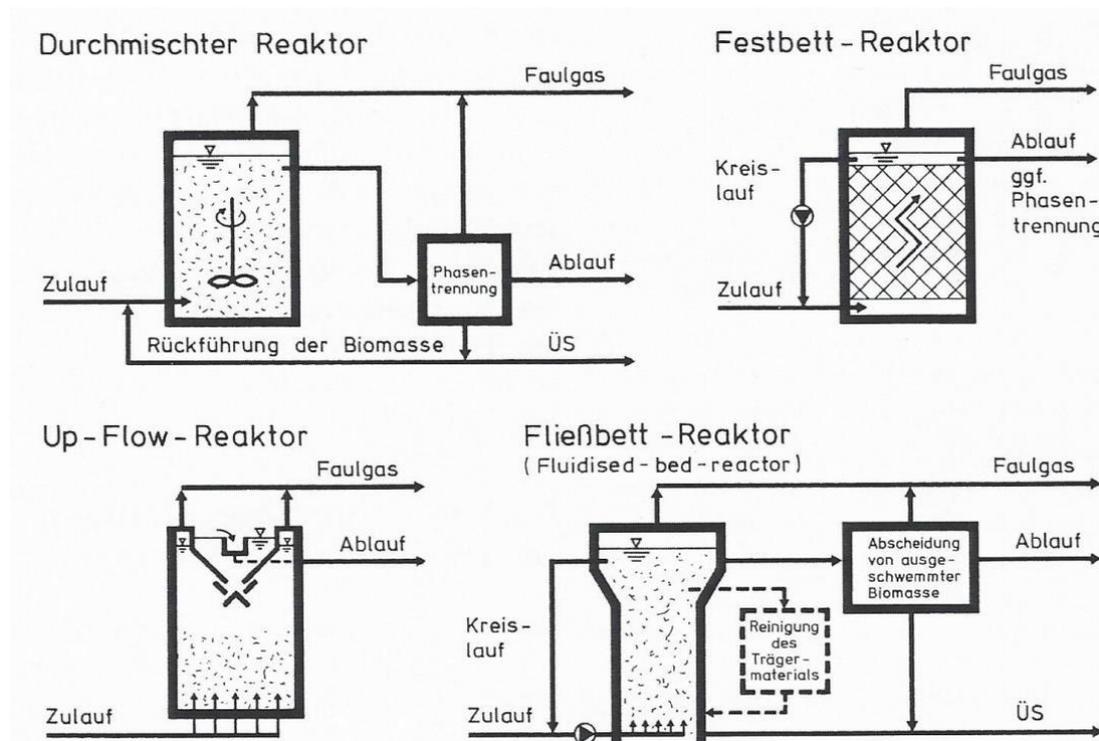


Abbildung 2.2.4: Anaerobreaktoren
[KUNST et al./ 2010]

Man unterscheidet ein- / zweistufige Betriebsweisen. Bei dem zweistufigen Abbau wird die Hydrolyse - / Versäuerungsphase von der acetogenen / methanogenen Phase, entsprechend der unterschiedlichen Prozessbedingungen, getrennt, und der Abbau findet in zwei verschiedenen Reaktoren statt.

Der größte Vorteil der zweistufigen Betriebsweise besteht in der individuellen Optimierbarkeit der jeweiligen Reaktoren durch die Einstellung optimaler Milieubedingungen (T, pH-Wert, etc.).

■ Festbettreaktoren (Anaerobe Filter)

Bei anaeroben Festbettreaktoren, in der englischsprachigen Literatur oft auch als „Anaerobe Filter (AF)“ bezeichnet, ist ein großer Anteil des Reaktorvolumens mit Trägermaterialien befüllt, die als Aufwuchsfläche für Mikroorganismen dienen und so den Biomassengehalt im Reaktor erhöhen.

Das Trägermaterialvolumen beträgt zwischen 25 und 100%. Es werden vorwiegend lose geschüttete oder geordnet gepackte synthetische Materialien mit **hohen spezifischen Oberflächen** eingesetzt, um möglichst große Besiedlungsflächen zu erzielen.

Des Weiteren sollte das Material eine **hohe mechanische Abriebfestigkeit** bei geringem spezifischem Gewicht aufweisen und der Bildung von Toträumen und Kanalbildung entgegen-

wirken. Durch eine hohe Porosität sollen Verstopfungen verhindert werden. Der Verstopfungsneigung kann auch durch kontinuierliche Umwälzung / Rezirkulation begegnet werden. [LOOSEN / 2012].

Die Trägermaterialeigenschaften beeinflussen die Ansiedlung von Mikroorganismen auf der Materialoberfläche, die sogenannte Biofilmbildung. So erfolgt auf hydrophoben Oberflächen eine schnellere Besiedlung [AUSTERMANN – HAUN / 1997]. Ebenso kann eine raue Oberfläche die Biomassenentwicklung fördern und beschleunigen.

Die oben genannte Rezirkulation führt auch zu einer intensiveren Durchmischung zwischen Substrat und Biomasse.

Grundsätzlich können Anaerobe Filter im Abstrom oder im Aufstrom betrieben werden, wobei zurzeit der Aufstrombetrieb überwiegt, da sich hier eine höhere Biomassenkonzentration im Reaktor einstellt. [ROSENWINKEL / 2015]

Bei der Betriebsweise im Aufstrom (UP-Flow) liegt neben der auf dem Trägermaterial fixierten Biomasse auch suspendierte Biomasse (Hohlräume, unterhalb Trägermaterial) vor.

- **Modifizierte / kombinierte Anwendungen**

In Abhängigkeit von dem Füllgrad mit Trägermaterial (zw. 25 und 100%, i.d.R. 70%) wird zwischen Festbett- und Teilfestbettreaktoren (auch als Hybridreaktoren bezeichnet) unterschieden.

Bei den *Teilfestbettreaktoren* wird der untere Reaktionsraum entweder mit überwiegend suspendierter Biomasse oder mit pelletförmiger Biomasse betrieben. [ROSENWINKEL / 2015]

UASB-Reaktoren (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) sind sogenannte Schlamm-bettreaktoren. Sie beruhen auf dem Prinzip, dass sich bestimmte anaerobe Mikroorganismen zu schweren Flocken oder sogenannten Pellets zusammenballen und aufgrund guter Absetzeigenschaften sich im Reaktor anreichern.

Analog zu einem konventionellen aeroben Sequential Batch Reaktor (SBR) werden Festbettreaktoren auch als Anaerobic SBR eingesetzt mit den Betriebsphasen „Befüllen“, „Belüften“, „Absetzen“ und „Abzug“, wodurch neben dem Kohlenstoffabbau auch Nitrifikation und Denitrifikation im selben Reaktor ausgeführt werden können. [WARTHMAN et al. / 2010]

Die Steigerung der Biogasausbeute durch den Zusatz von Enzymen zur Verbesserung der Hydrolyse, die auf Oberflächen fixiert werden, ist ebenfalls als mögliche Anwendung zu sehen.

- **Kenn- / Auslegungsdaten**

[ROSENWINKEL / 2015, KUNST et al./ 2010; DWA-Themen / 2016]

Im Folgenden werden die wichtigsten Kenn- / Auslegungsdaten zusammengefasst:

| | |
|--------------------------|--|
| Höhe: | Festbettreaktor gesamt: 3 – 13 m Trägermaterial: ca. 7 m max. |
| Durchmesser/Höhe: | 1 : 4 |

- Trägermaterial:** fast ausschließlich Kunststoff mit hohen spez. Oberflächen ($90 - 350 \text{ m}^2/\text{m}^3$), hohen Porositäten $> 95\%$, viele offene Poren, hohe Festigkeit, geringes Gewicht ($50 - 100 \text{ kg}/\text{m}^3$) vgl. [AUS-TERMANN – HAUN / 1997]
- Raumbelastungen:** Deutschland: $2,2 - 7,5 \text{ kg CSB} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$, im Mittel $5,3$ bzw. $2 - 3 \text{ kg CSB} / (\text{m}^3 \cdot \text{a})$ [ROSENWINKEL / 2015]
 Nordamerika / Europa: $6,4 - 10,5 \text{ kg CSB} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ [WARTH-MANN et al. / 2010]
 Indien: $1,15 - 1,45 \text{ kg CSB} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$
- Biomassengehalt:** TR-Konzentration: $5 - 20 \text{ kg} / \text{m}^3$
- CSB-Zulaufkonzentrationen:** vgl. Abbildung 2.2.5
 $< 1000 - 8000 \text{ mg}/\text{l}$
 [THORMEYER / 2009; DWA-Themen / 2016]
 bei höherer Konzentration Verdünnung durch Rückführung

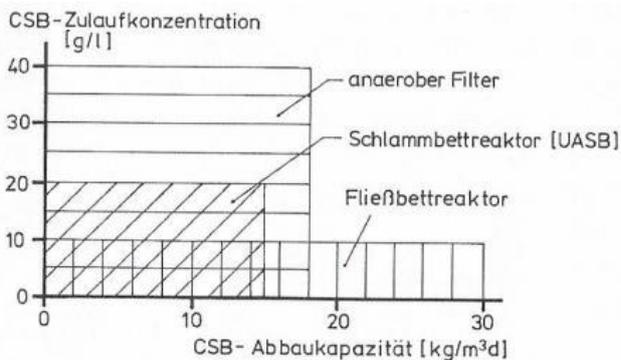


Abbildung 2.2.5 : CSB Zulaufkonzentrationen / -Abbaukapazitäten [KUNST et al./ 2010]

- CSB-Schlammbelastung:** $0,80 \text{ Kg CSB} / (\text{kg o TR} \cdot \text{d})$
 bei $10 \text{ kg CSB} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$ und $o \text{ TR} = 12,5 \text{ kg} / \text{m}^3$
- Aufstromgeschwindigkeit:** $0,2 - 2,0 \text{ m}/\text{h}$;
 typisch für kommunales Abwasser: $0,4 - 0,75 \text{ m}/\text{h}$
- Gasflächenbeschickung:** $0,5 - 1,5 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Die Zielsetzung ist, dass die Biomasse gut mit dem Abwasser vermischt wird, um lokale Totzonen und Überlastungsbereiche zu vermeiden und einen optimalen Stofftransport sicher zu stellen.

- **Einsatz kommunales Abwasser**

Festbettreaktoren sind besonders geeignet, um relativ schwach belastetes Abwasser mit niedrigen CSB-Konzentrationen zu reinigen und gleichzeitig mit einer relativ hohen Raumbelastung zu operieren. [LOOSEN / 2012]

In der kommunalen Abwasserbehandlung werden UASB-Reaktoren am häufigsten eingesetzt mit Raumbelastungen von 2 - 4 kg CSB / (m³ * d). Für UASB-Reaktoren existieren auch Bemessungsansätze für die Schlammbelastung, die Aufstromgeschwindigkeit und den Biomassegehalt in Abhängigkeit von der täglichen Zulaufmenge, den CSB-Konzentrationen, der möglichen Reaktortemperatur und der zu erzielenden CSB-Ablaufwerte (CSB-Abbaugrad). Mithilfe der berechneten Parameter können dann die Reaktorabmessungen (Grundfläche, Höhe) ermittelt werden.

Ebenso kann durch die spezifische Methanaktivität, die von der Schlammbelastung und der Temperatur abhängt, die Methanproduktion in kg CSB/d bestimmt werden. Der theoretische Gasertrag liegt bei 0,35 Nm³ CH₄ / kg CSB, wobei davon ca. 10 % für die Bildung neuer Biomasse eingesetzt wird. [ROSENWINKEL / 2015]

Abbildung 2.2.6 zeigt die CSB-Eliminationsrate in Abhängigkeit der Temperatur bei UASB-Anlagen, z.B. bei 15°C von ca. 55 % und bei 25°C von ca. 68 %. Mit abnehmender Temperatur sinkt der Wirkungsgrad der Anaerobtechnik, was für einen Einsatz vor Allem in wärmeren Regionen spricht.

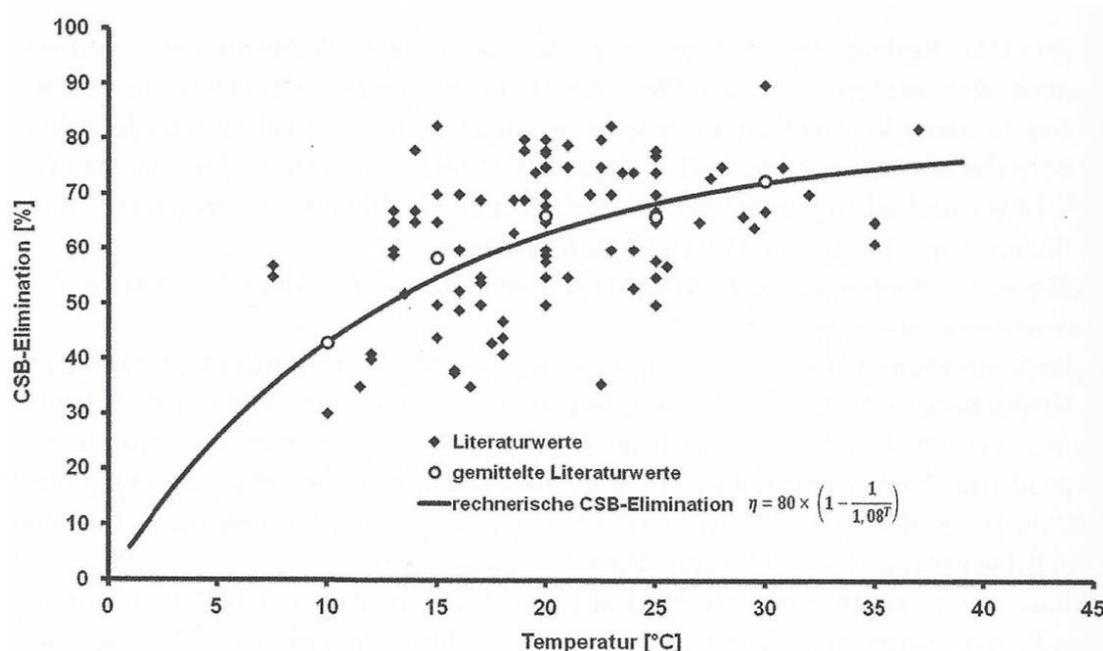


Abbildung 2.2.6: CSB Elimination in Abhängigkeit zur Temperatur [ROSENWINKEL / 2015]

Vereinzelt werden in der kommunalen Abwasserbehandlung auch anaerobe Filter, häufig in Kombination mit UASB-Reaktoren eingesetzt, wobei das Festbett über dem UASB-Reaktorteil angeordnet ist. [ROSENWINKEL / 2015]

Im Labormaßstab [WARTHMANN et al. / 2010,] werden auch Upflow Anaerobfilter (UAF) für kommunales Abwasser getestet mit niedrigen CSB-Belastungen von 100 – 250 mg/l im Temperaturspektrum von 8 – 23°C. Dabei war auch die CSB (engl. COD)- Abbauleistung mit 63% bei 8°C noch zufriedenstellend, allerdings mit einer verlängerten hydraulischen Verweilzeit von 20 h.

2.2.5 Nachteile der Anaerobtechnik / Umweltaspekte

- Die Anaerobtechnik für die Abwasserbehandlung ist zurzeit lediglich ein **Vorbehandlungsverfahren** und bedarf einer Nachbehandlung, da weder die organische Belastung (CSB) vollständig abgebaut wird, noch eine ausreichende Nährstoffelimination (N,P) erfolgen kann. Eine oder mehrere weitere, auf das „neue“ C : N –Verhältnis abgestimmte Stufen sind für die Nachbehandlung erforderlich.
- Anaerobe Abwasserbehandlungsverfahren sind empfindlich gegenüber **Temperatur- und Belastungsschwankungen** sowie Änderungen des pH-Wertes, wie in Kapitel 2.2.3 dargestellt.
- Die Bildung von **H₂S** erfordert erhöhte Anforderungen an die **Arbeitssicherheit, da es ein übel riechendes**, stark giftiges Gas ist und weil bei höheren Konzentrationen und längerer Einwirkung von H₂S die Geruchswarnung aussetzt. Beim Umgang mit Biogas ist auch für eine ausreichende Belüftung zu sorgen. [URBAN / 2009] [THORMEYER / 2009]
- **Methan** ist ein **sehr starkes Treibhausgas**, dessen Wirkung ca. 25-mal höher ist als die von CO₂, daher sollte das produzierte CH₄ möglichst vollständig zur Energiegewinnung genutzt werden. [HORN et al./ 2009]

Im Ablauf von anaeroben Reaktoren kann es zur **Lösung von Methan** kommen, das in die Umwelt gelangen kann. Durch eine Vakuumentgasung oder eine Strippung kann das gelöste Methan zurückgewonnen und einer energetischen Verwertung zugeführt werden. [WARTHMANN et al. / 2010; ROSENWINKEL et al./ 2015] Der dadurch zu erwartende Energiegewinn ist größer als der für die Entgasung erforderliche Energieverbrauch und kann bei einer Energiebilanz einer anaeroben Abwasserbehandlungsanlage berücksichtigt werden; ein geschlossenes System (abgedeckte, gasdichte Behälter) wird dabei vorausgesetzt.

2.3 Verfahren der Stickstoffelimination

Zunächst werden die klassischen **Verfahren zur Stickstoffelimination**, und dann die Deammonifikation als neuartiges Verfahren mit den biochemischen Grundlagen sowie den Einflussfaktoren und Prozessbedingungen erläutert.

Im Anschluss wird die **verfahrenstechnische Umsetzung** und der **Einsatz in der kommunalen Abwasserbehandlung** beschrieben.

Abschließend werden in diesem Kapitel die **ökologischen und energetischen Aspekte** nochmals zusammengefaßt.

Abbildung 2.3.1 zeigt sehr anschaulich in Form des Stickstoffkreislaufes die Verfahren der Stickstoffelimination [HOBUS / 2010], auf die im Folgenden eingegangen wird.

Ergänzend zu diesem Verfahren sind auch die Ammonifikation und die Assimilation als Prozesse zu nennen, die eine Umwandlung des Stickstoffs bewirken.

Bereits im Kanalnetz und im Vorklärbecken erfolgt die **Ammonifikation**, bei der es zur Freisetzung von Ammonium bzw. Ammoniak aus organischen Verbindungen, i.d.R. Harnstoffen kommt (organisch gebundener Stickstoff).

Sowohl in der mechanischen als auch in der biologischen Stufe wird dann Stickstoff in Zellsubstanz eingebaut (-> **Assimilation**). Diese wird dann i.d.R. durch Sedimentation (Primär- und Sekundärschlamm) abgetrennt (ca. 15 – 30%).

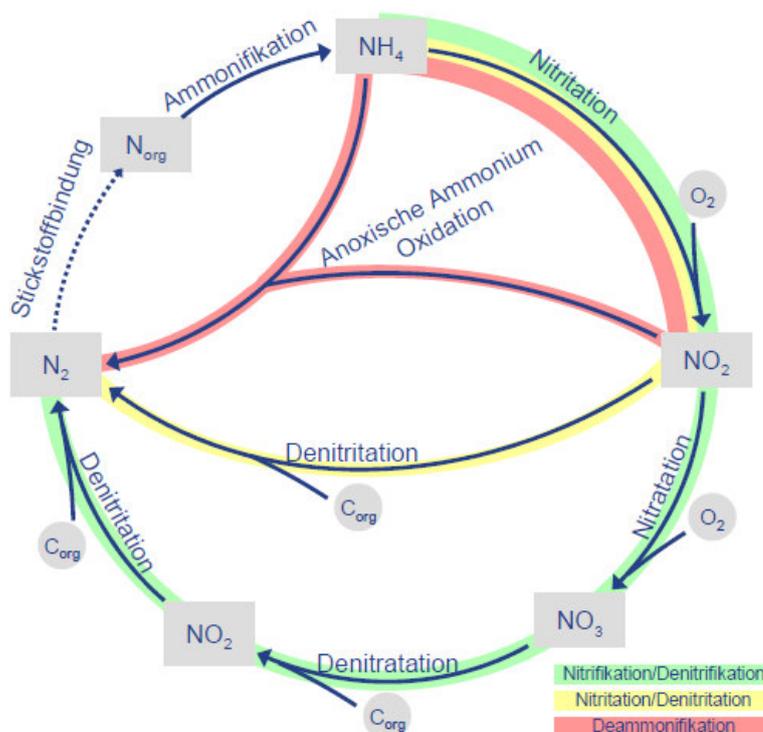


Abbildung 2.3.1 Stickstoffelimination

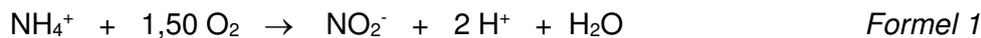
2.3.1 Nitrifikation / Denitrifikation

Die **Nitrifikation / Denitrifikation** stellt die klassische Prozesskombination der Stickstoff-elimination dar.

■ Nitrifikation

Bei der **Nitrifikation** erfolgt mithilfe autotropher Bakterien eine zweistufige Oxidation (1.Stufe: Nitrifikation → Nitritbildung; 2.Stufe: Nitrifikation → Nitratbildung) von Ammonium über Nitrit zu Nitrat unter aeroben Bedingungen.

1. Schritt Nitrifikation:



2. Schritt Nitrifikation:



Summengleichung Nitrifikation:



Die ammoniumoxidierenden Bakterien werden als AOB, die nitritoxidierenden als NOB bezeichnet.

Der theoretische Sauerstoffbedarf der gesamten Nitrifikation beträgt 4,3 gO₂/gN. [ROSENWINKEL / 2015]

Nitrifizierende Bakterien besitzen eine Reihe von Eigenschaften, durch die sie gegenüber heterotrophen Bakterien **im Nachteil** sind.

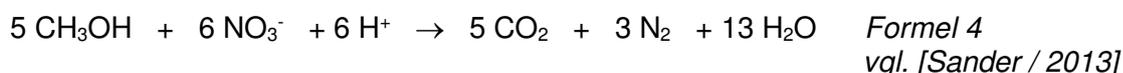
Ihre Wachstumsgeschwindigkeit beträgt nur ungefähr ein Zehntel von der der heterotrophen Bakterien. Die Biomassenproduktion, ausgedrückt durch den Bakterienzuwachs pro Nahrungsumsatz, ist etwa 3-mal so klein im Vergleich zu heterotrophen Bakterien.

Außerdem finden Nitrifikanten ein wesentlich kleineres Nahrungsangebot in Abhängigkeit der ankommenden Frachten als heterotrophe Bakterien vor (Größenordnung ca. 1 : 4). Ihre Abhängigkeit von einer ausreichenden Sauerstoffversorgung aufgrund des höheren Sauerstoffbedarfs ist größer als bei heterotrophen Bakterien.

■ Denitrifikation

Das durch die Nitrifikation gebildete Nitrat wird danach unter anoxischen Bedingungen durch die **Denitrifikation** mit Hilfe heterotropher Organismen mit Kohlenstoffverbindungen als Elektronendonatoren zu gasförmigem Stickstoff umgesetzt (Reduktion). Bei unzureichender Kohlenstoffmenge (Verhältnis CSB abbaubar / N <= 5) muss die Denitrifikationsstufe mithilfe einer externen Kohlenstoffquelle (z.B. Methanol) gestützt werden.

Für die Denitrifikation ergibt sich beispielhaft mit Methanol als Kohlenstoffquelle:



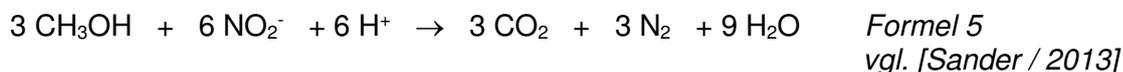
Bei der Denitrifikation kann genau die Hälfte der zuvor bei der Nitrifikation verbrauchten Säurekapazität, die das Puffervermögen gegenüber dem Einwirken einer Säure (Absinken pH-Wert) ausdrückt, zurückgewonnen werden.

Durch die Denitrifikation können 2,9 gO₂/gN des bei der Nitrifikation verbrauchten Sauerstoffs zurückgewonnen werden.

2.3.2 Nitritation / Denitritation

Bei der **Nitritation** wird der zweite Teilschritt der oben beschriebenen Nitrifikation unterdrückt und die Ammoniumoxidation nur bis zum Nitrit geführt. [CORNELIUS / 2008] In einer zweiten Stufe wird das Nitrit bei der **Denitritation** analog zur Denitrifikation (s.o.) durch heterotrophe Mikroorganismen unter Verwendung von Kohlenstoff zu molekularem Stickstoff reduziert. [ROSENWINKEL / 2015]

Für die Denitritation ergibt sich beispielhaft mit Methanol als Kohlenstoffquelle:



Auch bei der Denitritation kann die Hälfte der zuvor bei der Nitritation verbrauchten Säurekapazität zurückgewonnen werden und auch ein Anteil des bei der Nitritation verbrauchten Sauerstoffs in Höhe von 1,7 gO₂/gN.

Bei der Nitritation ergibt sich eine Verringerung des Sauerstoffbedarfs für die Ammoniumoxidation im Vergleich zur Nitrifikation um 25% [CORNELIUS / 2008] und bei der Denitritation eine Reduzierung an organischem Kohlenstoff von ca. 40% im Vergleich zur Denitrifikation. [ABELING / 1994]

Erfolgt der Ablauf von Abwasserreinigungsanlagen direkt in ein natürliches Gewässer, z.B. bei der kommunalen Abwasserreinigung im Hauptstrom, wird die Stickstoffelimination über Nitrit (Nitritation / Denitritation) besser nicht praktiziert, da Nitrit sehr fischgiftig wirkt. [CORNELIUS / 2008]

2.3.3 Deammonifikation / PNA (= Partielle Nitritation Anammox)

Die Deammonifikation gilt als „neuartiges“ Verfahren der Stickstoffelimination. Die Deammonifikation stellt die Kombination der beiden rein autotrophen Prozessschritte Nitritation und anaerobe Ammoniumoxidation („ANAMMOX“) dar. [SANDER / 2013]

Theoretisch wurde diese Möglichkeit der Stickstoffentfernung von Wissenschaftlern bereits im Jahr 1977 vermutet, der Praxisbezug wurde dann aber erst 1985 in Delft in den Niederlanden erkannt, als in einem zur Denitrifikation angelegten Fließbettreaktor unerklärliche Stickstoffverluste bemerkt wurden. Es wurde festgestellt, dass unter anaeroben Bedingungen die Umwandlung von Ammonium zu elementarem Stickstoff erfolgte und zwar mit NO₂-N als Elektronenakzeptor für die Oxidation von NH₄-N.

Seither wurde die Deammonifikation und der ANAMMOX-Prozess, der für ca. 50% des marinen Stickstoffaustrages verantwortlich ist an verschiedenen Universitäten (Delft, Hannover, Innsbruck, Karlsruhe) so weit erforscht, dass er zur Behandlung einseitig stickstoffbelasteter

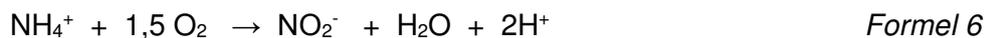
Abwässer mit einem geringen C : N- Verhältnis eingesetzt werden kann [GILBERT / 2014], da sein autotropher Stickstoffumsatz keine Kohlenstoffquelle erfordert. [SANDER / 2013] Dies gelang beispielsweise bei Prozesswässern der Klärschlamm-behandlung in den Kläranlagen Landshut und Ingoldstadt und wurde auch in der Sicker-wasserreinigungsanlage Mechernich beobachtet.

Aufgrund der nur anteilig erforderlichen Nitritation ist der Energiebedarf für die Belüftung gegenüber einer vollständigen Nitrifikation um etwa 60% geringer. Daneben reduzieren sich auch der Überschussschlammanfall und dessen Entsorgungskosten wegen der geringeren Wachstumsraten der autotrophen gegenüber den heterotrophen Bakterien. [SANDER / 2014] Daher ist die Deammonifikation als kosten- /energieeffizientes und umweltfreundliches Verfahren zur Stickstoffelimination aus Abwasser zu bezeichnen.

Für eine anaerobe Behandlungsstufe, in der die organischen Kohlenstoffverbindungen weitgehend in CH₄ bzw. CO₂ umgewandelt werden und bei der für die nachgeschaltete konventionelle Stickstoffelimination mit Nitrifikation und Denitrifikation ein ungünstiges C/N-Verhältnis entsteht, erscheint die Deammonifikation, die keinen Kohlenstoff zur Stickstoffelimination benötigt, ein geeignetes Verfahren zu sein.

Die Deammonifikation besteht aus den folgenden zwei aufeinander aufbauenden Prozessschritten zum autotrophen Abbau des Ammoniums [ROSENWINKEL / 2015]

Nitritation (hier partielle Nitritation):



Anaerobe Ammoniumoxidation („Anammox“):



Hierbei wird zunächst ca. 50 – 60 % des zugeführten Ammoniums bis zum Nitrit oxidiert (partielle Nitritation) und dann das verbleibende Ammonium unter anoxischen Bedingungen mit dem gebildeten Nitrit direkt zu elementarem Stickstoff umgesetzt (vgl. Abbildung 2.3.2).

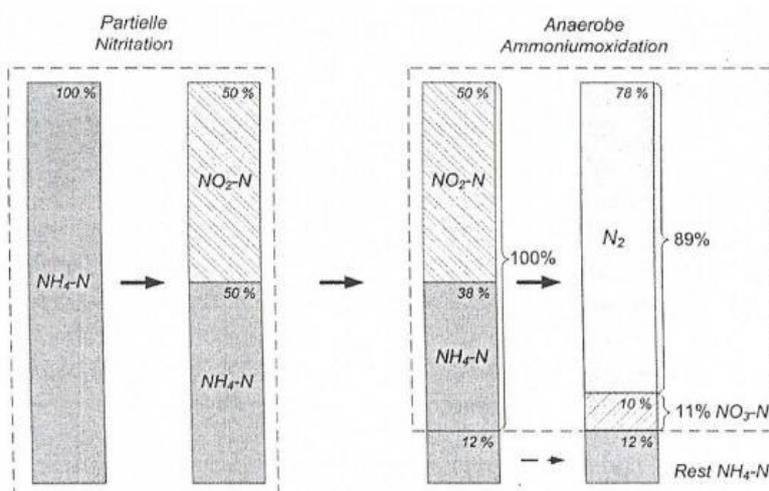


Abbildung 2.3.2: „Stoffumsatz der Deammonifikation“ mit $\eta_{\text{Nitritation}} = 0,5$ [SANDER / 2013]

Zur Gewährleistung eines stabilen Betriebs der Nitrifikation muss die Nitritbildung dauerhaft von der Nitratbildung entkoppelt werden, d.h. die Nitrifikation muss unterdrückt werden. [ROSENWINKEL / 2015]

■ **Nitritanreicherung**

Die für die Deammonifikation erforderliche Nitritanreicherung setzt eine Unterdrückung der Nitrifikation voraus, die durch folgende Maßnahmen erreicht werden kann:

• **Hemmung der Nitrifikation durch geringe Sauerstoffkonzentrationen**

Die für die Nitrifikation verantwortlichen AOB gelten als sauerstoffaffiner als NOB, d.h. dass sie bereits bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen höhere Umsatzraten erzielen. AOB können bei dauerhaft niedrigen Sauerstoffkonzentrationen Ammonium umsetzen, wodurch eine Ausselektion von NOB möglich wäre und somit die Nitrifikation vermieden werden könnte. [GILBERT / 2014]

In der Literatur [HENNERKES et al. /2011] wird eine Sauerstoffkonzentration von 0,3 – 0,5 mg / l angegeben, bzw. < 0,5 mg / l [SCHÄPERS et al. / 2016].

• **Hemmung der Nitrifikation durch intermittierende Belüftung**

Bei dem Wechsel von anaeroben zu aeroben Bedingungen (Anschalten der Belüftung) wurde bei kurzen Belüftungszeiten eine Hemmung der Nitratbildung festgestellt. [SANDER / 2013] Die sogenannte lag-phase, die Anfangsphase des bakteriellen Wachstums, setzt für die Nitrifikation (NOB) später ein als für die Nitrifikation (AOB), so dass durch eine entsprechende Belüftungsstrategie (Belüftung an /aus) eine stabile Nitrifikation durch die Hemmung der Nitrifikation erreicht werden kann. Nach [GILBERT / 2014] sollte die Belüftungspause mindestens 15 min betragen.

• **Einfluss Temperatur und Schlammalter**

Bei Temperaturen > 20°C [ROSENWINKEL / 2015] verfügen die AOB über höhere Wachstumsgeschwindigkeiten als die NOB, so dass es bei einem Reaktorbetrieb ohne Biomassenrückführung (hydraulische Aufenthaltszeit = Schlammalter) durch entsprechende Wahl des Schlammalters möglich ist AOB im System zu halten und NOB auszuschwemmen.

Bei niedrigeren Temperaturen wachsen NOB schneller als AOB, so dass sich die Hemmung von NOB mit sinkenden Temperaturen als schwieriger gestaltet. Untersuchungen von [GILBERT / 2015] haben allerdings gezeigt, dass NOB im Gegensatz zu AOB einen drastischen Aktivitätsabfall beim Unterschreiten von Temperaturen von 13 – 15°C aufweisen, was allerdings auch bei AnAOB festgestellt wurde.

Insgesamt sind bei der Einstellung des Schlammalters auch die Limitierung des Umsatzes durch geringe Sauerstoffkonzentrationen sowie Hemmungen des Umsatzes durch salpetrige Säure und Ammoniak (s.u.), die sich stärker auf NOB als auf AOB auswirken, zu berücksichtigen. [SANDER / 2013]

• Ammoniak und salpetrige Säure

Ammoniak und salpetrige Säure wirken hemmend auf AOB und NOB, wobei der Einfluss auf NOB bei gleicher Konzentration wesentlich stärker ist [SANDER / 2013], vgl. Abbildung 2.3.3

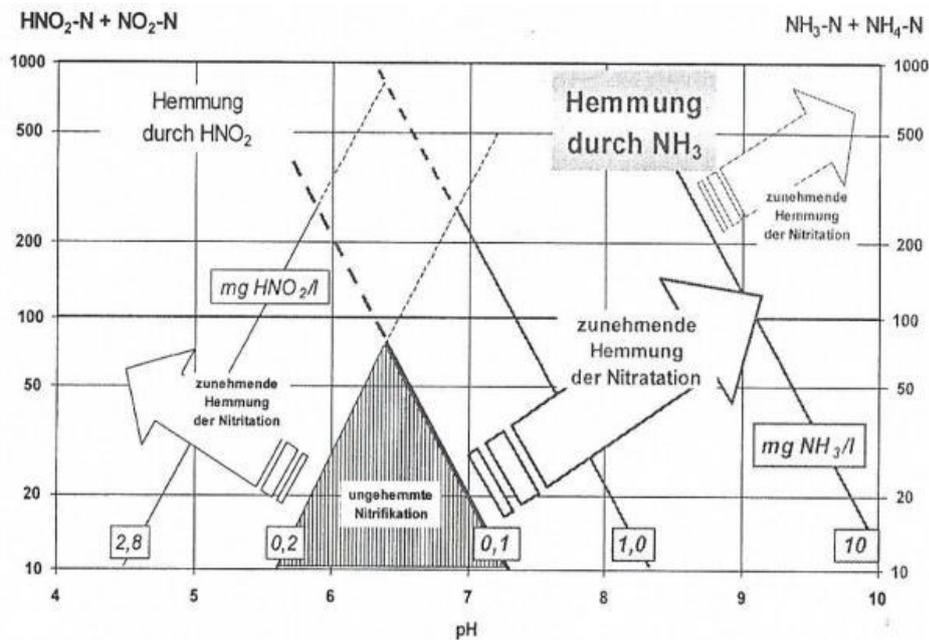


Abbildung 2.3.3: Nitrifikationshemmung durch Ammoniak und salpetrige Säure in Abhängigkeit des pH-Wertes

Durch Einstellen einer bestimmten Konzentration an freiem Ammoniak infolge einer pH-Wert-Anhebung kann eine Anreicherung des Nitrits durch Unterdrückung der Nitratation abgestimmt auf das jeweilige Abwassersystem erzielt werden.

■ „Anammox“

• Anammox-Bakterien:

Anammox-Bakterien sind der Gattung der Planktomyceten zuzuordnen [STROUS / 2000]. Die bekanntesten, in Abwassersystemen gefundenen Arten sind *Candidatus Brocadia anammoxidans* und *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*.

Die Biologie der purpurroten Bakterien wurde von einem europäischen Forscherkonsortium Anfang 2006 entschlüsselt [STROUS et al. / 2006].

Anammox-Bakterien sind in unterschiedlichsten Nischen, je nach Salzgehalt und Temperatur ihrer Umgebung vorzufinden. Eine große Rolle spielen sie in den Ozeanen, in denen sie bis zu 50 % der Ammoniumoxidation übernehmen.

Die Stoffwechselfähigkeit findet im innersten Bereich der Zelle, dem sogenannten Anammoxosom, statt über drei Zwischenprodukte Hydroxylamin (NH_2OH) und Hydrazin (N_2H_4) sowie das Intermediat Diimin (N_2H_2). [vgl. STROUS / 2000]. Hierbei ist besonders zu erwähnen, dass die

Beschaffenheit der das Anamoxosom (vgl. Abbildung A IX, Anhang) umgebenden Membranen verhindert, dass das toxische Hydrazin durch die Zellwand der Organismen nach außen dringt.

Die Wachstumsraten der Anammox-Bakterien liegen deutlich unter denen der Nitrifikanten, wodurch sich ein hohes Schlammalter für abwassertechnische Anwendungen ergibt.

Zur Anreicherung von den langsam wachsenden Anammoxbakterien können Trägermaterialien als Aufwuchsflächen genutzt werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin mit Hilfe technischer Apparate, wie z.B. durch ein Zyklon, die Anammox-Bakterien über Dichteunterschiede unter Schwerkrafteinfluss von anderer Biomasse zu trennen.[SCHÄPERS / 2016]

• **Parameterabhängigkeiten von Anammox-Bakterien:**

- pH-Bereich: 6,7 - 8,3, Optimum 7,5 - 8 [GILBERT / 2014]
6,5 - 9 Optimum 8 [CORNELIUS / 2008]
- Temperatur: 10° - 43°C, Optimum 37°C [GILBERT / 2014]
11° - 45°C Optimum 38°C [CORNELIUS / 2008]
- O₂ gelöst: Hemmung vollständig 0,03 mg/l, aber reversibel
Kein Sauerstoff für Anammox-Prozess erforderlich
- Nitrit: Hemmung bei kritischen Konzentrationen von >30 – 50, vollständige Hemmung ab > 100 – 400 mg/l, stark abhängig von der Art der Bakterien. [GILBERT / 2014, CORNELIUS / 2008]
- Substratkonzentrationen: Substrat-Verhältnis Ammonium zu Nitrit 1 : 1,32
Ammoniumüberschuss kann zum Einbruch der Umsatzleistung des Anammox-Prozesses führen.
Gehalt an gelöstem CSB: bei CSB / NH₄-N von 1,4 können Anammox-Bakterien neben heterotrophen coexistieren [JENNI / JENNI / 2016]
- Ammoniak: Hemmeffekte: Rückgang der Aktivität von 50% bei 38 mg NH₃-N / l
und von 80 % bei 100 mg NH₂N / l [SANDER / 2013]
- salpetrige Säure: Hemmeffekte:
Rückgang der Aktivität von 50% bei 0,011 mg HNO₂-N / l
und von 30 % bei 0,04 mg HNO₂-N / l

2.3.4 Verfahrenstechnische Umsetzung

In der Praxis stehen bereits einige Verfahrensvarianten zur Umsetzung der Deammonifikation zur Verfügung. Die Verfahren unterscheiden sich in der Anzahl der Verfahrensstufen, der eingesetzten Biomassensysteme, dem gewählten Reaktortyp und der Betriebsführung [SANDER /2013].

Folgende Kriterien sind zu beachten:

- aerobe (partielle Nitritation) und anaerobe, besser anoxische,(Anammox) Milieubedingungen,

- ausreichendes Schlammalter für langsam wachsende Anammox-Bakterien
- hohe Biomassenkonzentration, Animpfung, Anreicherung mit Anammox-Bakterien
- Bereitstellung der benötigten Substrate in nicht hemmender Konzentration

Zur Gewährleistung der aeroben bzw. anaeroben Verhältnisse muss eine zeitliche oder räumliche Trennung der Prozesse erfolgen. [GILBERT / 2014]

Bei der **räumlichen Trennung** kann es sich um zweistufige Anlagen handeln, mit einem ersten aeroben Reaktor, in dem ca. 50% des Ammoniums zu Nitrit oxidiert werden, und einem zweiten anaeroben Reaktor, in dem das restliche Ammonium und das gebildete Nitrit über das Anammoxverfahren zu Stickstoff umgewandelt wird.

Die räumliche Trennung von aeroben und anaeroben Bedingungen kann auch in Biofilmen auf Aufwuchsträgern bzw. granulierter Biomasse erfolgen. Hier wird die Versorgung mit Sauerstoff durch Diffusion und Zehrung begrenzt, so dass in den unteren Schichten anaerobe Verhältnisse herrschen.

Eine **zeitliche Trennung** kann z.B. in den Sequencing-Batch-Reaktoren (SBR) erfolgen, in denen Nitrit in den Belüftungsphasen (aerob) produziert und in den Rührphasen (anaerob) umgesetzt wird. Die Regelung kann über zeitliche Begrenzung (Intervalle) bzw. über den pH-Wert erfolgen. [GILBERT/ 2014]

Im Folgenden werden die bekannten, patentierten Verfahren kurz vorgestellt, unterschieden in einstufige und zweistufige Anlagen, wobei die Vorteile der einstufigen im geringen Bauvolumen bzw. Platzbedarf liegen und die der zweistufigen in der höheren Betriebssicherheit.

■ Einstufige Anlagen

Hier finden die beiden Prozesse **partielle Nitritation** und „**Anammox**“ in einem Reaktor statt, entweder durch zeitliche Taktung der Belüftung oder durch Sauerstofflimitierung in tieferen Biofilmschichten.

Die **Intervallbelüftung** als Regelstrategie zur Etablierung der Nitritation bzw. Hemmung der Nitratation ist inzwischen „Verfahren der Wahl“ [ROSENWINKEL et al./ 2015].

Diese wird im **DEMON-Verfahren** mit pH-Regelung und Sauerstoffkonzentrationen $<0,3$ mg/l sowie im **DIB-Verfahren** mit fester Zeittaktung der belüfteten Phasen realisiert.

Beim DEMON-Verfahren wird durch den pH-Wert die Dauer der aeroben und anoxischen Intervalle definiert.

Durch die Oxidation von Ammonium zu Nitrit im aeroben Milieu sinkt der pH-Wert. Die Belüftung erfolgt bis zu einem voreingestellten unteren pH-Sollwert.

Danach wird das gebildete Nitrit in der anoxischen Phase mit Hilfe des Anammox-Verfahrens und dem restlichen $\text{NH}_4\text{-N}$ zu gasförmigem Stickstoff und $\text{NO}_3\text{-N}$ umgewandelt.

Durch die Zugabe von z.B. alkalischem Schlammwasser oder Zudosierung von Lauge steigt der pH-Wert bis zu einem oberen pH-Sollwert an und die aerobe Phase beginnt erneut.

Die relative pH-Wert Differenz von rd. 0,01 stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik. [HENNERKES et al. / 2011]

Sauerstofflimitierung in Biofilmen zur Ausbildung anaerober Zonen wurden bisher in Sickerwasseranlagen mit Scheibentauchkörpern (**CANON-Verfahren**) und Tropfkörpern erreicht, ebenso in Moving-Bed-Reaktoren (**De Ammon-Verfahren**).

Der Vorteil von Biofilmsystemen ist der Biomassenrückhalt, der durch die sessilen Mikroorganismen gewährleistet wird. [SANDER / 2013]

■ Zweistufige Anlagen

Die Zweistufigkeit macht es möglich, beide Prozesse (Nitritation und Anammox) jeweils unter optimalen Milieubedingungen zu betreiben und deshalb höhere Umsatzraten in den Teilprozessen zu erzielen [ROSENWINKEL / 2015].

Die Unterdrückung der Nitratation ist durch eine intermittierende Belüftung möglich. Allerdings müssen beide Prozessschritte exakt aufeinander abgestimmt sein, damit das notwendige **Ammonium-/ Nitritverhältnis** von **1 : 1,3** eingehalten wird. Die Beschickung der 2. Stufe mit Ammonium muss auf die hohen Nitritkonzentrationen angepasst werden.

Zweistufige Anlagen sind im „**PANDA-Verfahren**“ mit suspendierter Biomasse und im „**SHARON-ANAMMOX-Verfahren**“ (granulierte Biomasse) realisiert.

2.3.5 Ökologische / Energetische Aspekte

■ Klima- / Umweltrelevanz

Im Folgenden werden die wichtigsten Indikatoren der ökologischen Auswirkungen der Deammonifikation beschrieben:

► Emission von Treibhausgasen:

- **CO₂**: durch den autotrophen Charakter der Nitritation und von Anammox kommt es zu einer Bindung von Kohlenstoff anstelle einer CO₂-Freisetzung. [ROSENWINKEL et al./ 2015]
- **N₂O / NO** (Lachgas): Bildung von N₂O und NO bei unvollständiger Umsetzung der Ammoniumoxidation mit sehr hohem Treibhausgaspotential von N₂O: 310 CO₂-Äquivalente. Dabei wird davon ausgegangen, dass zum einen die Denitrifikation und zum anderen die Nitritation als hauptsächliche Quelle von Lachgas verantwortlich sind. [BEIER et al. / 2015]

Abbildung 2.3.4 zeigt für die Denitrifikation (inklusive Denitritation) die Reduktionsschritte, in denen sich auch N₂O als Zwischenprodukt bildet und bei unvollständiger Denitrifikation / Denitritation akkumulieren kann. Die Nitratation und die Anammox-Reaktion enthalten kein N₂O-Bildungspotential. [BEIER et al. / 2015]

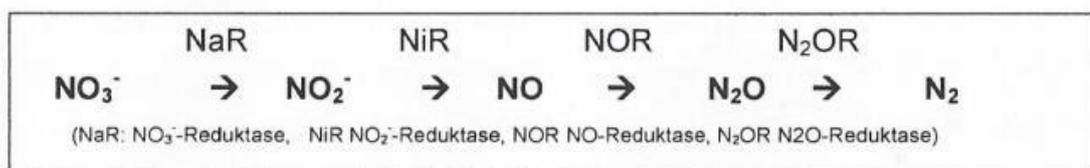


Abbildung 2.3.4: Reduktionsschritte der Denitrifikation - Lachgas

- Die Angaben in der Literatur weisen insgesamt eine große Bandbreite, z.B. aufgrund des Temperatureinflusses auf die Emissionen, auf. Bei kommunalen Kläranlagen mit Nitrifikation / Denitrifikation werden Emissionswerte von 0,01 bis 1,8% des umgesetzten Stickstoffs angegeben (vgl. z.B. [WEISSENBACHER et al./ 2013]), wobei für die Kläranlage Strass in Österreich ein Wert von 0,3% genannt wird. Für die Deammonifikation werden Werte von 2 – 6,6% der gesamten eintretenden Stickstofffracht [CASTRO-BARROS et al. / 2013] angegeben. Für die Kläranlage Strass wird ein Messwert von 1,3% der Stickstofffracht genannt [WEISSENBACHER et al./2013].

► Ressourcenbedarf / Reststoffe

- **C-Quellen:** Da bei der Deammonifikation die Mikroorganismen autotroph leben, wird kein organisches C, evtl. auch aus externen Quellen (Methanol) benötigt.
- **Überschussschlamm:** geringere Überschussschlammproduktion bei der Deammonifikation im Vergleich zur konventionellen Stickstoffelimination.
- **Ablaufqualität:** stabiler Prozess der Deammonifikation, auch bei niedrigen Abwassertemperaturen, zur Vermeidung von zu hohen Nitrit-Konzentrationen im Ablauf ist zwingend erforderlich.

■ Energiebedarf / Energieausbeute

- **Energiebedarf:** Im Vergleich zur Nitrifikation / Denitrifikation wird bei der Deammonifikation nur ca. die Hälfte des Sauerstoffeintrages benötigt.
- **Energieausbeute:** Da bei der Deammonifikation kein CSB-Bedarf im Falle der Denitrifikation besteht, kann das organische Material über eine anaerobe Stufe (Faulung, Anaerobreaktor zur Abwasserbehandlung) der Energiegewinnung zugeführt werden. [WEISSENBACHER et al./2013]

2.4 Entwicklung von Verfahrenskombinationen

Aufbauend auf den Grundlagen der Kapitel 2.2 und 2.3 werden Verfahrenskombinationen entwickelt, die die energetischen Vorteile der Anaerobtechnik und der Deammonifikation in das jeweilige Konzept integrieren. Dabei muss die Sicherstellung der Ablaufqualität gewährleistet sein.

Zunächst werden die für den Einsatz bei kommunalem Abwasser wichtigen Aspekte zusammengefasst erläutert, dann folgt die Vorstellung der Verfahrenskombinationen und abschließend wird auf die Mess-/ Steuer- und Regeltechnik als Möglichkeit zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Prozessstabilität eingegangen.

2.4.1 Einsatz bei kommunalem Abwasser

Das Hauptanwendungsfeld der Anaerobtechnik liegt bisher in der industriellen Abwasserreinigung mit hohen organischen Belastungen; für die kommunale Anwendung besteht noch Forschungsbedarf.

Die Deammonifikation wird zurzeit im **Teilstrom** kommunaler Kläranlagen zur Behandlung von Prozesswässern der Faulschlammbehandlung eingesetzt. Diese Prozesswässer weisen hohe Ammoniumkonzentrationen von 500 - 2500 mg/l, - und damit ein niedriges C/N-Verhältnis von ca. 0,15 -, sowie Temperaturen von 25 – 35°C auf. [SANDER / 2013]

Für die Anwendung der Anaerobtechnik und der Deammonifikation im Hauptstrom einer kommunalen Kläranlage sind folgende Kriterien von besonderer Bedeutung:

- jahreszeitlich bedingte Temperaturreduktion von 20°C im Sommer auf 10°C im Winter [GILBERT / 2014]
- einzuhaltende Grenzwerte für Direkteinleitung in Gewässer (hohe Ablaufqualität; insbesondere muss die Einleitung von Nitrit aufgrund der hohen Fischgiftigkeit vermieden werden!), z.B. Größenklasse 4: $\text{NH}_4\text{-N} \leq 10 \text{ mg/l}$ und $\text{N}_{\text{ges.}} \leq 18 \text{ mg/l}$ (s.o., Kap. 2.1.3)
- Stabile Einhaltung des stöchiometrischen Verhältnisses von Ammonium zu Nitrit (1 / 1,3).
- geringes Konzentrationsniveau von unter 50 mg $\text{NH}_4\text{-N}$ /l. [SANDER / 2013]
- Anaerobtechnik ist ein Vorbehandlungsverfahren und bedarf einer Nachbehandlung für den CSB-Abbau und die Stickstoffelimination.
- Bei anaerober Vorbehandlung verbleibt ein Anteil des abbaubaren Kohlenstoffs, das bedeutet Gefahr der Verdrängung autotropher Biomasse (für Nitritation und Anammox verantwortlich) durch schneller wachsende heterotrophe Organismen (Kohlenstoffabbau, Denitrifikation). [ROSENWINKEL et al./ 2015]
- Temperaturabhängigkeit der Anaerobtechnik mit sinkenden Wirkungsgraden bei Temperaturen < 20°C.
- In der Anaerobtechnik kann relativ schwach belastetes Abwasser mit niedriger CSB-Konzentration und relativ hoher Raumbelastung behandelt werden.

[GILBERT / 2014] hat in ihren Untersuchungen Folgendes festgestellt:

Die NOB, die für die bei der Deammonifikation nicht gewünschte Nitratation verantwortlich sind, sind am empfindlichsten gegenüber kälteren Temperaturen (< 13 – 15°C), insbesondere im Vergleich zu AOB. Da auch die Aktivität der AnAOB, die im Anammox-Prozess Nitrit verbrauchen, bei niedrigeren Temperaturen nachlässt, ist eine Nitrit-akkumulation bei < 13°C festzustellen. Diese muss wegen der Hochgiftigkeit des Nitrits für Wasserorganismen unbedingt vermieden werden.

Laut [GILBERT / 2014] ist dies durch Reaktorsysteme mit großer Biofilmdicke möglich, da dadurch eine ausreichende Anammoxaktivität zur Verfügung gestellt werden kann. Ebenso könnte über eine intermittierende Belüftung eine Nitritakkumulation bei niedrigen Temperaturen reduziert werden.

2.4.2 Verfahrenskombinationen

[ROSENWINKEL et al. / 2011] schlägt ein dreistufiges Konzept zunächst für den Sommerbetrieb (20°C) für die Abwasserbehandlung im Hauptstrom einer kommunalen Kläranlage vor. vgl. Abbildung 2.4.1.

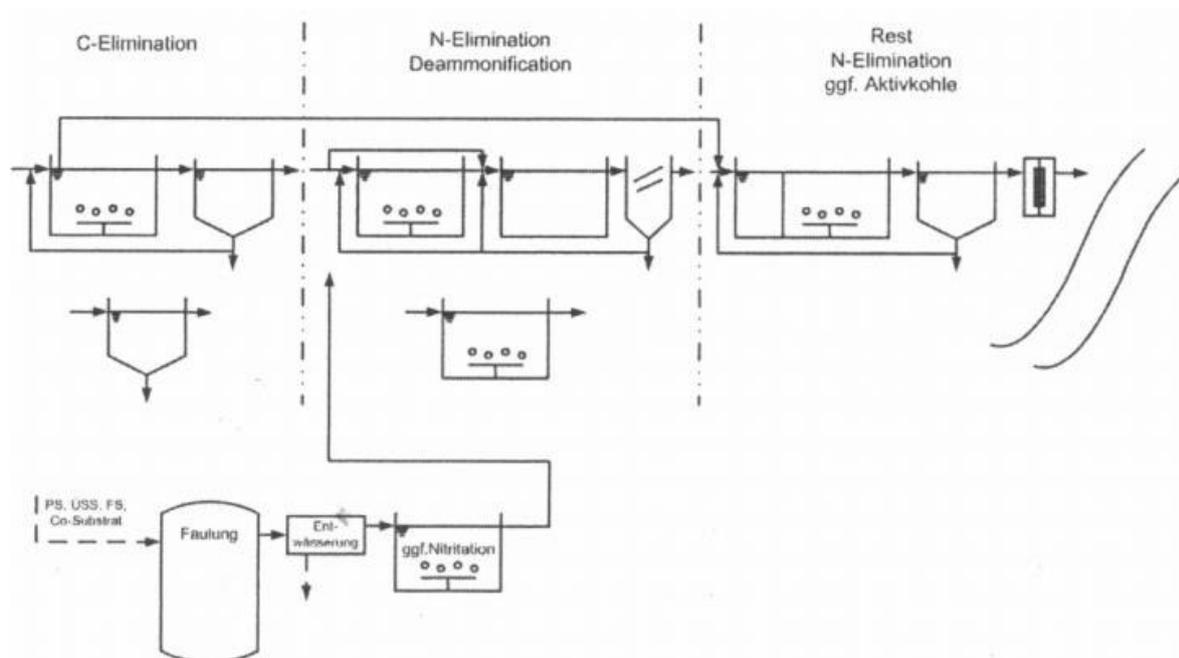


Abbildung 2.4.1: Konzept zur Umsetzung der Deammonifikation im Hauptstrom

Das Konzept beinhaltet eine **Stufe zum Kohlenstoffabbau**, eine zweite **Stufe zur Stickstoffelimination** und eine dritte **Stufe zur Reststickstoffelimination** durch Nitrifikation / Denitrifikation, ergänzt evtl. um eine Filtration oder einen Aktivkohleeinsatz.

Neben der **Reduzierung des Energieverbrauches** durch z.B. die Deammonifikation aufgrund der Reduzierung des Sauerstoffverbrauches soll auch die **Erhöhung der Energieausbeute** durch Anwendung der Anaerobtechnik, die den ausgeschleusten Kohlenstoff energetisch nutzt, ohne Beeinträchtigung der Reinigungsleistung in den Verfahrenskonzepten berücksichtigt werden.

In den Verfahrenskonzepten sollen die Prozesse des C-Abbaus und der Stickstoffelimination sinnvoll hinsichtlich Energieausbeute, Energieverbrauchsreduzierung und Sicherstellung der Ablaufqualität kombiniert werden.

■ **Anaerobfilter (AF) + Nitrifikation + Denitrifikation bzw. Nitritation + Denitrifikation (Varianten 1a und 1b)**
(vgl. Abbildung 2.4.2)

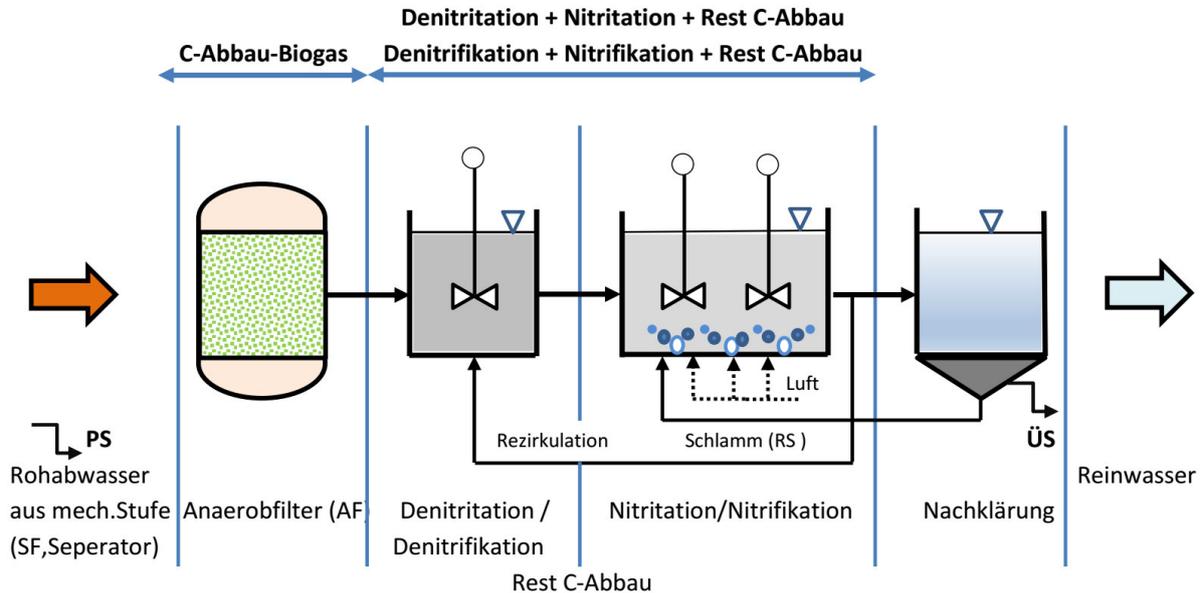


Abbildung 2.4.2: Variante 1a/1b Anaerobfilter (AF) + Nitrifikation+Denitrifikation bzw. Nitritation+Denitrifikation

Nach Entfernung der größeren Fest- und Schwimmstoffe in der mechanischen Stufe erfolgt der Kohlenstoffabbau schwerpunktmäßig im Anaerobfilter bei gleichzeitiger Energiegewinnung durch das hier entstehende Biogas.

Der Rest-CSB-Abbau und die Stickstoffelimination sollen in einer klassischen Belebtschlamm-anlage mit vorgeschalteter Denitrifikation / Denitrifikation ablaufen. Dabei wird im anaeroben Behälter der Ammoniumstickstoff zu Nitrat- bzw. Nitritstickstoff oxidiert und in den vorgeschalteten anaeroben / anoxischen Behälter rezirkuliert. Dort erfolgt dann mit Hilfe des im Anaerobfilter nicht abgebauten Kohlenstoffs die Reduktion des Nitrat- / Nitritstickstoffes (Denitrifikation / Denitrifikation) zu freiem Stickstoff, der als Gas entweicht.

Der Primärschlamm der mechanischen Stufe und der Überschussschlamm aus der Nachklärung sollen in einem Faultrum in Biogas umgewandelt werden.

Während des Sommerbetriebes (20°C) ist im Anaerobfilter mit einem höheren CSB- Abbaugrad zu rechnen, was bedeutet, dass ein geringerer Kohlenstoffgehalt für die Stickstoffelimination vorliegt. Es ist davon auszugehen, dass das Kohlenstoffangebot für die Denitrifikation dann nicht mehr ausreicht und stattdessen eine Denitrifikation aufgrund des geringeren Kohlenstoffbedarfes geeigneter ist.

Entsprechend muss der aerobe Bereich in der Form angepasst werden, dass nur noch die Nitritation, abläuft. Dadurch ist auch eine Reduzierung des Energieverbrauches wegen des geringeren Sauerstoffbedarfes der Nitritation im Vergleich zur Nitrifikation möglich.

Im Winterbetrieb wird der CSB-Abbaugrad des Anaerobfilters sinken und dadurch kann die Denitrifikation durch ein höheres Kohlenstoffangebot ablaufen. Voraussetzung ist eine voll-

ständige Nitrifikation mit einer höheren Belüftungsintensität wegen des erhöhten Sauerstoffbedarfes. Dies bedeutet für den Winterbetrieb, dass zum einen weniger Energie erzeugt und auf der anderen Seite mehr Energie verbraucht wird als im Sommer. Denkbar ist auch der gemeinsame Ablauf der Prozesse Denitrifikation/Denitrifikation im anaeroben Behälter bei unvollständiger Nitrationshemmung.

Der Rest-CSB-Abbau und die Nitrifikation könnten auch in einem Tropfkörper mit natürlicher Belüftung (Kamineffekt) und sessilen Mikroorganismen, die lange im System zu halten sind, erfolgen, wobei die Beschickung des Tropfkörpers im freien Gefälle vom Anaerobfilter möglich wäre.

■ Anaerobfilter (AF) + Deammonifikation (PNA)

Varianten 2a und 2b

(vgl. Abbildungen 2.4.3 und 2.4.4)

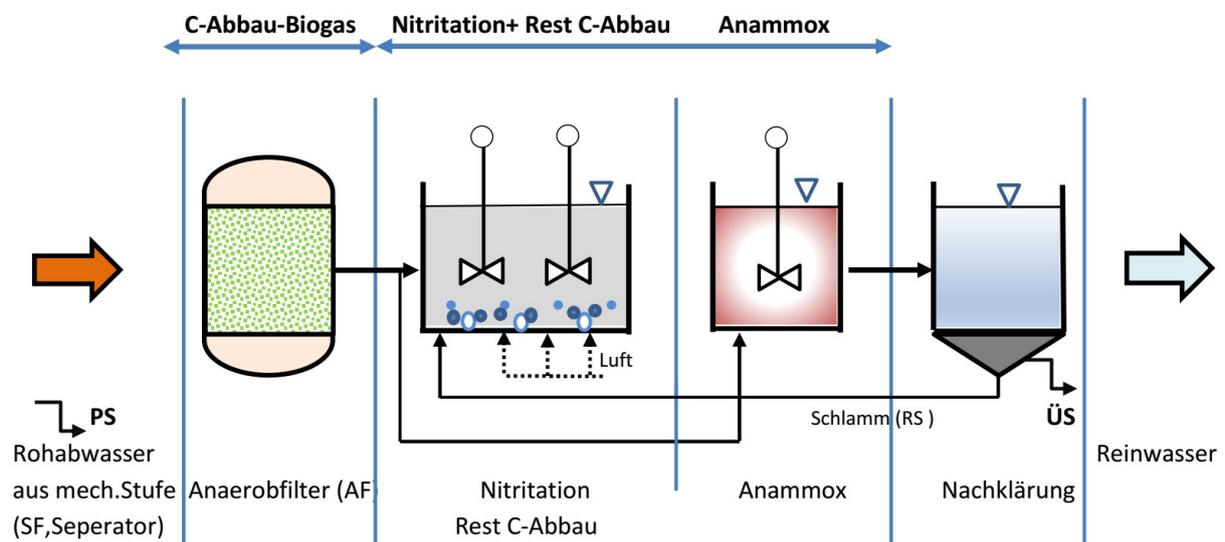


Abbildung 2.4.3: Variante 2a Anaerobfilter (AF) + Deammonifikation (PNA – Anammox nachgeschaltet)

Die Aussagen zur mechanischen Stufe und zum Anaerobfilter bei Varianten 1a und 1b sowie zum Primär- und Überschussschlamm treffen auch auf Varianten 2a und 2b zu.

Der Hauptunterschied liegt in der Belebtschlammstufe, in der eine Deammonifikation, bestehend aus einer Nitritation und Anammox, ablaufen soll.

Bei der **Variante 2a** mit dem nachgeschalteten Anammox findet zunächst ein Rest-C-Abbau und eine Nitritation mit Hemmung der Nitrifikation im belüfteten aeroben Behälter statt. Ein Teilstrom des Ablaufs aus dem Anaerobfilter wird an dem aeroben Behälter vorbeigeführt und gelangt direkt in den nachgeschalteten anaeroben Behälter. Dort kann mit Hilfe des im aeroben belüfteten Behälter gebildeten Nitrits und des vorbeigeschleusten Ammoniums der Anammox-Prozess ablaufen. Wichtig ist dabei, dass das Verhältnis von Nitrit zu Ammonium ca. 1,3 beträgt und die CSB-Menge, die mit dem Ammonium in den Anammox-Behälter gelangt, nicht so hoch ist, dass Anammox nicht mehr ablaufen bzw. der CSB-Ablaufgrenzwert nicht mehr eingehalten werden kann.

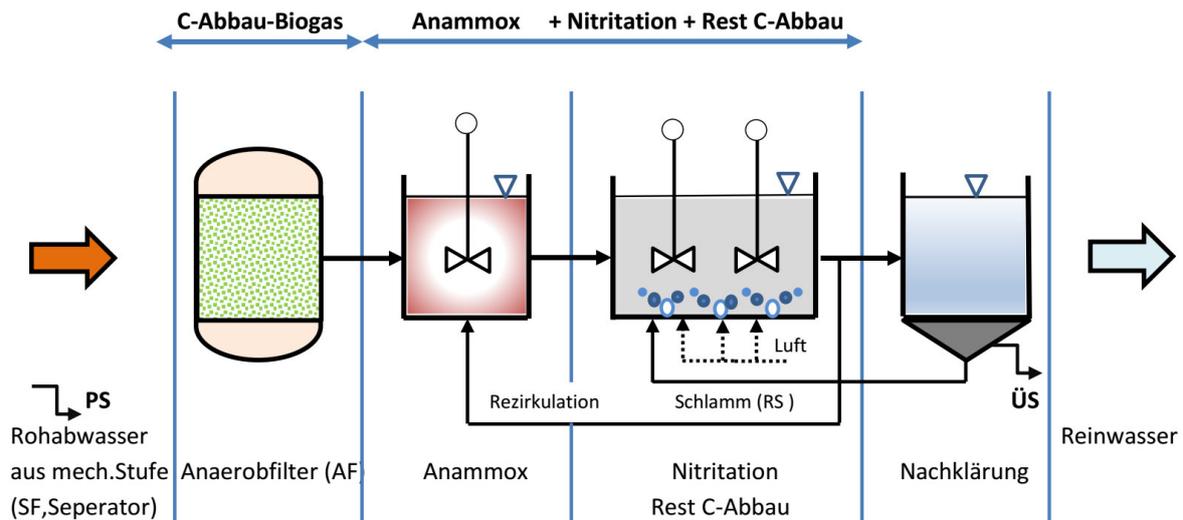


Abbildung 2.4.4: Variante 2b Anaerobfilter (AF) + Deammonifikation (PNA – Anammox

vorgeschaltet)

Im Sommerbetrieb, wenn mit hohen CSB-Abbaugraden im Anaerobfilter zu rechnen ist, wird der Anammox-Prozess gut ablaufen können, dagegen besteht beim Betrieb mit schlechten CSB-Abbaugraden im Anaerobfilter die Gefahr, dass zu viel CSB in den nachgeschalteten Anammoxbehälter und somit in den Ablauf gelangt.

Aus diesem Grunde wurde eine weitere **Variante 2b** mit vorgeschaltetem Anammox vorgeschlagen, mit der Möglichkeit einer kompletten aeroben Nachbehandlung für den Rest-Kohlenstoffabbau und die Nitritation. Durch eine intermittierende Belüftung könnten in dem aeroben Behälter auch anaerobe Phasen geschaffen werden, in denen eine Denitritation möglich wäre.

2.4.3 Mess- / Steuer- und Regeltechnik

Zur Koordination der verschiedenen Klärprozesse (C-Abbau, Nitrifikation + Denitrifikation bzw. Nitritation + Denitritation und Anammox + partielle Nitritation) sind Messgeräte zum Steuern und Regeln erforderlich. Dadurch kann auch auf wechselnde Bedingungen wie unterschiedliche Temperaturen, im Tagesgang schwankende Zulaufwerte oder unterschiedliches Substratangebot reagiert werden. Daneben können die Energiekosten (z.B. Belüftung und Rezirkulation), der sonstige betriebliche Aufwand (Zudosierung von Chemikalien) minimiert werden.

Steuerung und Regelung sind zwei unterschiedliche Verfahrensabläufe, die in DIN IEC 60050-351 definiert sind.

■ Steuerung

Bei der Steuerung beeinflussen die Eingangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten die Ausgangs- bzw. Steuergrößen. Zwischen Ausgangs- und Eingangsgrößen besteht keine (offener Wirkungskreis) oder nur eine zeitweise Rückkoppelung, um eventuelle Störungen zu beseitigen.

Beispiele sind die Steuerung des Schlammabzuges über eine Zeitschaltuhr oder die Steuerung eines konstanten Beckenabflusswertes durch Messung der Wasserspiegelhöhe und entsprechender Schieberöffnung.

■ Regelung

Die Regelung ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Größe, die Regelgröße (IST-Wert) durch Messung fortlaufend erfasst, mit der sogenannten Führungsgröße (SOLL-Wert) verglichen (Regeldifferenz) und im Sinne einer Angleichung an diese Führungsgröße mit einem Regler beeinflusst bzw. angepasst wird. Der Wirkungskreis (= Regelkreis) ist geschlossen.

Beispiel: → Halten des Beckenabflusses auf einem bestimmten Wert

Der Abfluss des Beckens wird von vornherein gemessen. Nach Abgleich im Regler wird dann der Schieber entsprechend der notwendigen Durchflussänderung bewegt.

Beispiel: → Regulierung des Schlammabzuges aus einem Nachklärbecken
Regelgröße: Höhe der Schlammschicht

Die Elemente der Regelung nach [PÖPEL et al. / 1990] sind Regelgröße, Stellglied, Regelstrecke, Meßeinrichtung, Regler und Stelleinrichtung.

Regelgröße: Für die Stickstoffelimination eignen sich die Sauerstoffkonzentrationen, die – zehrerung, der Ammoniumstickstoff- und der Nitrat- / bzw. Nitritstickstoffgehalt als Regelgrößen. Begrenzt geeignet sind die Zulaufkonzentrationen (z.B. der CSB), da sie in Abhängigkeit vom Bedarf an C-Verbindungen durch Speicherbecken und Rezirkulationen dem jeweiligen Bedarf teilweise angepasst werden können.

Regelstrecke: Die Regelstrecke umfasst den Bereich, auf den durch die Regelung eingewirkt wird (z.B. Beckenvolumen von biologischen Stufen, Rücklauf- und Rezirkulations-/ Zuleitungen).

Messeinrichtung: Der Messung kommt bei den Steuer- und Regelvorgängen eine entscheidende Bedeutung zu. Sie muss zuverlässig, betriebssicher sein, über eine große Messgenauigkeit mit geringem Fehlerbereich und eine kurze Mess- und Analysendauer verfügen. Die Messungen sollten kontinuierlich (online) über Sonden als Direktmessungen ohne Probenvorbehandlung erfolgen. Neben den Direktmessungen können auch indirekte Messungen, z.B. über das Redox-Potential, vgl. [HANSEN / 1997] durchgeführt werden.

Regler: Regler vergleichen innerhalb eines Regelkreises laufend das Signal der Führungsgröße (Soll-Wert) mit der gemessenen Regelgröße (Ist-Wert) und ermitteln aus dem Unterschied dieser beiden Größen (Regelabweichung) eine Stellgröße, die die Regelstrecke so beeinflusst, dass die Regelabweichung minimiert wird. [WIKIPEDIA / 11.02.2017]

Stelleinrichtung: Die Stelleinrichtung besteht aus einem Leitgerät und einem Stellglied. Als Leitgeräte können beispielsweise Schieber und Leitungen (Druckluft, Abwasser), Pumpen oder Verdichter mit Drehzahländerung dienen.

Stellglied: Mögliche Stellglieder sind das Kohlenstoffangebot, die Sauerstoffzufuhr, die Rezirkulation und Volumenaufteilungen, vgl. [HANSEN / 1997]

Die Stellglieder werden meistens über reine Steuerungsstrategien (z.B. Arbeitszeit-Pausen-Steuerung) oder über un stetige Regler (Mini-Max-Regler) beeinflusst.

Wenn die Zugabe einer Substanz, z.B. Sauerstoff auf gleichem Niveau gehalten werden soll, um den O₂-Gehalt konstant zu halten, werden sogenannte PID-Regler eingesetzt. [HANSEN / 1997]

3. Material und Methoden

3.1. Zielsetzung und Konzeption

Durch die Versuchsanlage/ Versuchsreihe sollten die im Kapitel 2.4 vorgestellten Verfahrenskombinationen im labortechnischen Maßstab abgebildet werden.

Das vorrangige Ziel war zunächst die **Sicherstellung der Reinigungsleistungen** durch Einhaltung der Ablaufanforderungen für CSB, N_{ges} , und NH_4-N (vgl. Tabelle 1.1).

Durch die Entkoppelung der C- und N-Elimination sollte die **Energieausbeute optimiert** und der **Energieverbrauch reduziert** werden bei gleichzeitiger **Minimierung des Schlammfalls** im Vergleich zu konventionellen Verfahren.

Im Anaerobfilter soll schwerpunktmäßig die C-Elimination und die Energieerzeugung (Biogasproduktion) erfolgen, die Belebtschlammanlage hat die Aufgabe der Stickstoffelimination mit reduziertem Energieverbrauch und die der Rest-CSB-Elimination. Dabei wurde versucht, in der Belebtschlammanlage zunächst eine Denitrifikation + Nitrifikation bzw. eine Denitrifikation + Nitritation (D +N) zu etablieren und diese in eine Deammonifikation (= Partielle Nitrifikation-Anammox → **PNA**) zu überführen.

Parallel zur Einfahrphase wurden Vorversuche zur Einstellung und Optimierung der Belüftung durchgeführt.

3.2. Versuchsanlage

Die Versuchsanlage besteht aus den nacheinander geschalteten Komponenten Anaerobfilter (AF) und Belebtschlammanlage (PNA bzw. D+N), die im Folgenden näher beschrieben werden:

Die Anlage befindet sich in der Versuchshalle der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Göttingen, Fachgebiet Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik (NEU-Tec) und wurde von der Firma FLEXBIO Technologie, Göttingen, betrieben.

3.2.1 Anaerobfilter (AF)

● Reaktor / Trägermaterial

Die Abbildungen 3.2.1 und 3.2.2 zeigen den Versuchsstand mit drei zylindrischen Reaktoren aus Plexiglas der Firma Liquilux aus Gladbeck.

Für die Versuchsreihe, die vorliegender Masterarbeit zugrunde liegt, kam Reaktor I zur Anwendung mit folgenden Kennwerten: vgl. Tab. 3.2.1 [LOOSEN F. / 2012]

Das Verhältnis Durchmesser zu Höhe beträgt ca. 1 : 2 im Vergleich zu großtechnischen Anlagen mit 1 : 4 [ROSENWINKEL 2015 und KUNST et al./ 2010]

Die Füllkörper (vgl. Abbildung 3.2.1) wurden in loser Schüttung in den Reaktor eingebracht. Der Füllgrad als das Verhältnis des ausgefüllten Gesamtreaktorraumes und dem Raum, den die Füllkörper ausfüllen, beträgt ca. 79 %, was dem Füllgrad der meisten großtechnischen Anlagen entspricht. [LOOSEN, F. /2012 bzw. AUSTERMANN-HAUN /1997].

Die vorliegende spezifische Oberfläche ist um ein Vielfaches (3 bis über 10-fach) höher als bei anderen Versuchen bzw. in Literaturangaben. [AUSTERMANN-HAUN /1997]

| | |
|---|----------------------|
| Reaktornettohöhe [cm] | 63,5 |
| Bodennettodurchmesser [cm] | 29,2 |
| Gesamtvolumen [l] | 42,5 |
| Arbeitsvolumen [l] | 39,8 |
| Eingen. Festkörpervolumen [l] | 6,7 |
| Hydraulisches Volumen [l] | 33,1 |
| Spez. Oberfläche Trägermaterial [m ² /m ³] | 1180 |
| Besiedlungsoberfläche [m ²] | 38,94 |
| Füllgrad [%] | 79 |
| Beschickung | quasi kontinuierlich |
| Entnahme | Überlauf |
| Umwälzungsrate | 3,5 |
| Temperaturbereich | mesophil |

Tabelle 3.2.1: Kenndaten und Abmessungen Anaerobfilter AF (Reaktor I)

● Versuchsstand:

Der Versuchsstand gliedert sich in 3 Ebenen, vgl. Abbildung 3.2.1

In der untersten Ebene befinden sich die Zuführungs- und die Zirkulationspumpe sowie das Rohrleitungssystem, in der mittleren Ebene der isolierte, aufheizbare Festbettreaktor mit einem Heiz-/Dämmmantel und in der obersten Ebene die Gastrommelzähler zur Erfassung der Gasströme.

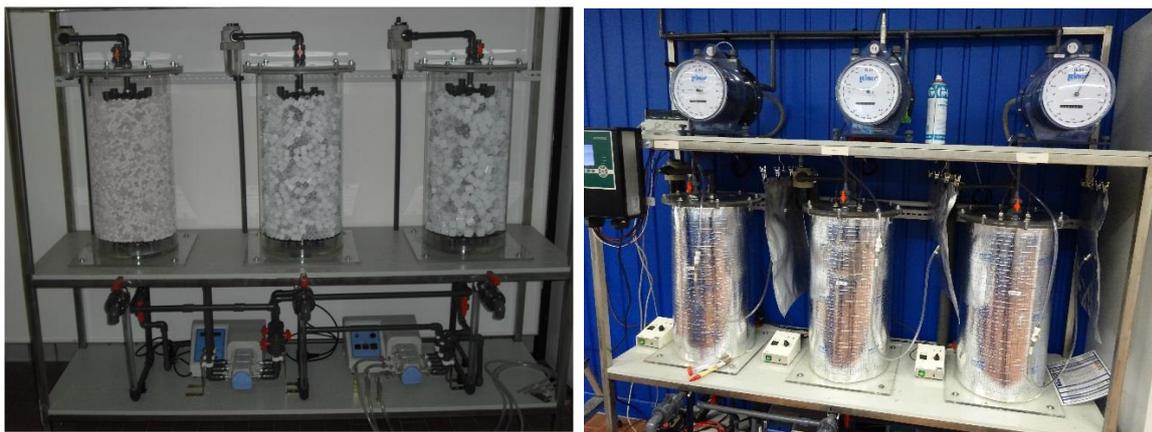


Abbildung 3.2.1: Versuchstand Anaerobfilter

Die Kenndaten/ Charakteristika des Pumpensystems sind in folgender Tabelle zusammengefasst [LOOSEN, F. /2012].

| | Volumenstrom | Drehzahl | Betrieb |
|---|---|--------------|---|
| Zuführungs-/ Fütterungs- oder Beschickungspumpe (Labor-schlauchpumpe) | 24 – 587 ml/min (\cong 34,6 l/d bis 845 l/d) | 10 – 250 rpm | Zeitgesteuert (quasi kontinuierlich) |
| Zirkulationspumpe | 24 – 587 ml/min (\cong 34,6 l/d bis 845 l/d) | 10 – 250 rpm | Dauerhaft (kontinuierlich mit Umwälzungsrate 3,5) |

Table 3.2.2 Pumpenkenndaten Anaerobfilter AF

Für das Rohrleitungssystem wurden graue PVC-Rohre mit einem Innendurchmesser von 20 bzw. 25 mm eingesetzt. Zu Wartungsarbeiten und zur Vermeidung von Lufteintritt sind Kugelhähne installiert.

Für das Rohabwasser ist ein Vorlagebehälter ($V = \text{ca. } 525 \text{ l}$) und für den Ablauf („flüssiger Gärrest“) ein Zwischenbehälter, der als Vorlage ($V = 60 \text{ l}$) für die zweite Stufe dient, vorgesehen.

Das gebildete Biogas wird über ein PVC-Rohr mit einem Innendurchmesser von 10 mm abgeleitet und in luftdichten Foliengassäcken gesammelt. Gasvolumen und Gaszusammensetzung werden täglich mittels eines Gasanalysegerätes VISIT03 der Fa. Eheim analysiert und im Messprotokoll aufgezeichnet. Eine Kalibrierung des Gasanalysators erfolgt vor jeder Analyse des gebildeten Biogases mit einem Prüfgas der Fa. Linde, das 55,4 Vol.-% CH_4 , 40,0 Vol.-% CO_2 und 210 ppm H_2S enthält [LOOSEN, F. / 2012]

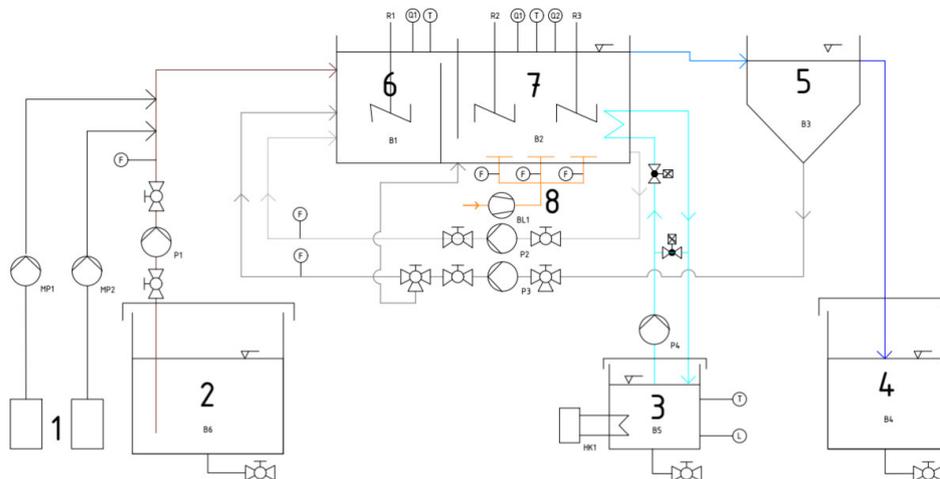
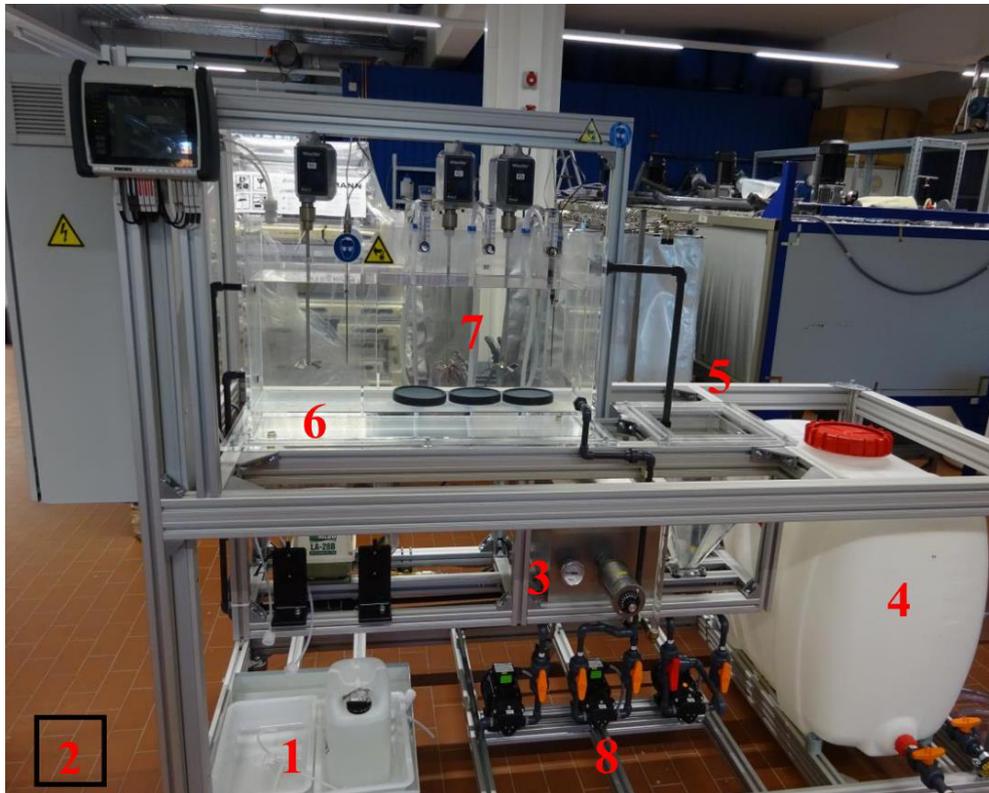
Eine gleichbleibende Innentemperatur (mesophiler Bereich) im Reaktor kann durch einen Heizmantel mit Temperaturfühlern geregelt und als Messwert an einen PC übertragen werden. Zur Verhinderung von Wärmeabstrahlung nach außen ist um den Reaktor ein abnehmbarer Dämmmantel aus alukaschiertem Styropor angebracht.

Neben der Temperatur, dem Gasvolumen und der Gaszusammensetzung können das Redoxpotential mittels Redoxsonde, die in der Zirkulationsleitung installiert ist, und der pH-Wert, sowie die Zuführungs-/ Zirkulationswassermengen gemessen werden.

3.2.2 Belebtschlammanlage

Bei dem Versuchsstand BS1050 [FLEXBIO / 2015] handelt es sich um eine konventionelle Kläranlage nach dem Belebtschlammverfahren im Labormaßstab.

Die Anlage besteht aus folgenden Anlagenkomponenten mit Nummern (vgl. Abbildung 3.2.2)



Legende

Teilbereiche: 1 Neutralisationsstation, 2 Rohwasserspeicher/Vorlage, 3 Heizung, 4 Reinwasserspeicher, 5 Nachklärbecken, 6 Anoxischer/anaerober Beckenbereich, 7 Belüfteter Beckenbereich, 8 Belüftungskompressor mit 3 Belüftungsteller
Messsonden/-Fühler: F Durchfluss, L Füllstand, Q1 pH-Wert, Q2 Sauerstoffkonzentration, T Temperatur

- Rohwasser
- Schlammrückführung
- Rezirkulation
- Belebungsbeckenüberlauf
- Reinwasser
- Säure und Lauge
- Heizkreislaufwasser

| Titel | Blatt | Blätter |
|------------------------|-------|---------|
| VT-Bild-Versuchsanlage | 1 | 1 |

Abbildung 3.2.2 Versuchsstand Belebtschlammanlage

● Behälter

- Rohwasserspeicher / Vorlage; in diesem Falle wurde der oben beschriebene Zwischenbehälter ($V = 60$ l), vgl. 3.2.1, als Vorlagebehälter genutzt *Nr. 2*
- „Belebtbecken“ bestehend aus anoxischem / anaerobem Bereich (Behälter B1) mit Rührwerk R1, Nutzvolumen $V_N = 20$ l; *Nr. 6* und belüftetem aeroben Beckenbereich (Behälter B2) mit drei Belüftungsstellern und zwei Rührwerken R2 und R3; Nutzvolumen $V_N = 40$ l; *Nr. 7*
- Nachklärbecken (Behälter B3); Nutzvolumen $V_N = 15$ l; *Nr. 5*
- Reinwasserbehälter; Fassungsvermögen $V_F = 200$ l; *Nr. 4*

● Rohr- /Maschinentechnik

- Belüftungsstation mit Kompressor BK1 und Anschluss an belüfteten Beckenbereich: Luftfördererrate 5 – 25 l/min, *Nr. 8*
- Heizanlage mit Heizwasserpumpe B 5 (ca. 26 l), Umwälzpumpe P4, Heizkörper zur Beheizung der Belebungsseinheit, *Nr. 3*: Temperatur bis 35°C
- Neutralisationsanlage/Dosierstation: Möglichkeit der pH-Reduzierung durch Salzsäuredosierung bzw. pH-Anhebung durch Natriumhydroxid-Dosierung aus Behältern mit Membranpumpen MP1/MP2: *Nr. 1*/ pH-Bereich 2 - 12
- Abwasserpumpen (vgl. Abbildung 3.2.4):
 - Beschickungspumpe P1 als Membranpumpe: von Vorlage (*Nr. 2*) in anaeroben/anoxischen Bereich, (*Nr. 6*) Förderleistung 0 - 3 l/min
 - Rezirkulationspumpe P2 als Membranpumpe vom belüfteten Bereich (*Nr. 7*) in anaeroben/ anox. Bereich (*Nr. 6*): Förderleistung 0 - 3 l/min
 - Rücklaufschlammpumpe P3 als Membranpumpe vom Nachklärbecken (Trichter *Nr. 5*) in belüfteten Bereich (*Nr. 7*): Förderleistung 0 - 3 l/min.

● Mess- und Steuertechnik:

- Messsonden / Fühler: Folgende Messungen sind vorgesehen:
 - Durchflussmessungen F für die Durchflüsse der Abwasserpumpen und die Sauerstoffdruckleitung (*Nr. 8*)
 - Füllstandsmessungen L des Heizwasserpuffers (*Nr. 3*)
 - pH-Wertmessungen Q1 in anoxischen/anaeroben (*Nr. 6*) und im belüfteten Beckenbereich (*Nr. 7*)
 - Sauerstoff-Messung Q2 im belüfteten Beckenbereich (*Nr. 7*)
- Steuerung:
 - Schaltschrank B/H/T: 600mm / 800mm / 250mm mit Anzeige und Bedienpaneel;
 - Steuerung über SPS
 - Text- und Eingabedisplay und optische Anzeige bei Störung
 - Einstellung/Schalter für automatischen bzw. manuellen Betrieb für Abwasserpumpen, Belüftung, Rührwerke und Dosierung von Säure/Lauge

- Messvorrichtung / Datenlogger:
 - Messdatenerfassung: Speicherung und Verarbeitung über Datenlogger „ALMEMO 710“
 - Anschluss von o.g. 2 pH-Einstabmessketten, 2 Temperaturfühlern, 1 O₂- Sonde sowie 3 Durchflussmessern der Abwasserleitungen.

Die Funktionsweise der konventionellen Belebtschlammanlage ist wie folgt:

Das Rohabwasser wird vom Vorlagebehälter *Nr.2* über die Beschickungspumpe P1 in den anoxischen / anaeroben Beckenbereich (*Nr.6*) gefördert, in dem die vorgeschaltete Denitrifikation unter Durchmischung mittels Rührwerk stattfindet. Von hier erfolgt ein Überlauf in den belüfteten Beckenbereich (*Nr.7*), in dem der Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation erfolgt, bei Durchmischung mit Rührwerken und Belüftung durch Belüftungssteller.

Vom belüfteten Beckenbereich wird das nitrifizierte Abwasser in den anoxischen/ anaeroben Beckenbereich rezirkuliert.

Ebenfalls vom belüfteten Beckenbereich erfolgt ein Überlauf mit Zulauf von oben in das Nachklärbecken (*Nr.5*). Hier setzt sich der Belebtschlamm ab, wobei ein Teil des Schlammes als Rücklaufschlamm in den belüfteten Beckenbereich zurückgeführt und der Überschusschlamm abgezogen wird.

Das gereinigte Abwasser gelangt vom Nachklärbecken über einen Überlauf in den Reinwasserbehälter (*Nr.4*).

3.2.3 Gesamtanlage

Der Grundgedanke ist, die beiden Komponenten Anaerobfilter (AF) und die Belebtschlammanlage zu koppeln und die Denitrifikations-/ Nitrifikationsmodule (D+N) in eine PNA-Anlage umzufunktionieren.

Die Verbindungsstelle zwischen den Anlagekomponenten ist der Behälter des Anaerobfilters für den Gärrest-Zwischenbehälter, der als Vorlage für die Belebtschlammanlage dient. Es handelt sich nicht mehr um Rohabwasser, sondern um vorbehandeltes Abwasser mit stark reduzierter CSB-Belastung.

Im anoxischen/ anaeroben Beckenbereich soll nicht mehr die Denitrifikation stattfinden, sondern eine Denitritation bzw. Anammox, eventuell sogar parallel.

Im belüfteten Beckenbereich soll nur noch eine Nitritation erfolgen, die zweite Stufe der Nitrifikation, die Nitratation, soll unterdrückt werden.

Die Versuchseinstellungen werden in Kapitel 3.4 beschrieben.

3.3. Grundlagen / Vorversuche:

3.3.1 Synthetisches Abwasser / Belebtschlamm

◆ Synthetisches Abwasser:

Es wurde ein synthetisches Abwasser, das in seiner organischen Belastung und Stickstoffbelastung einem kommunalen Abwasser nahe kommt, eingesetzt.

Synthetisches Abwasser wurde aus folgenden Gründen gewählt:

- Klar definiertes Abwasser mit geringen Schwankungen
- Variable Zulaufgestaltung, z.B. hinsichtlich Fremdwasseranteil
- Keine Feststoffe (hier: Primärschlamm), deshalb keine mechanische Vorbehandlung erforderlich
- Stabile Verhältnisse für den Labormaßstab

Die Rezeptur basiert auf DIN 38412-26 bzw. [KOPPE/ STOZEK/ 1999] und ist dem Anhang A II zu entnehmen, mitsamt der durchgeführten Modifikation bzgl. der Kohlenwasserstoffe.

◆ Zulaufkonzentrationen:

Die Abwasserkonzentrationen, die als Zulaufkonzentrationen zum Anaerobfilter (AF) angestrebt wurden, wurden wie folgt hergeleitet:

- Einwohnerspez. Wasserverbrauch w_s : 120 l/(E*d); für Deutschland 2014 nach Wikipedia 122 l/(E*d); gew. **120 l/(E*d)**
- Fremdwasserzuschlag FWZ: 20%, entspricht Fremdwasseranteil von ca. 17%
- Einwohnerspez. CSB-Fracht (vgl. ATV-A131): **120 g/(E*d)**
- Einwohnerspez. $N_{ges.}$ -Fracht (vgl. ATV-A131): **11 g/(E*d)**
- CSB- bzw. N-Abbaugrad mech. Stufe (Siebschnecke o.ä.): 15 – 20%, gewählt **16,66%**

$$\underline{\text{CSB:}} \quad \frac{120 \text{ g/(E*d)} * 0,833}{(120 + 0,2 * 120) \text{ l/(E*d)}} * 1000 \text{ mg/g} = 694 \text{ mg/l} \rightarrow \text{gewählt ca. 700 mg/l}$$

$N_{ges.}$: (hier: TKN = $\text{NH}_4\text{-N}$ + org. N):

$$\frac{11 \text{ g/(E*d)} * 0,833}{(120 + 0,2 * 120) \text{ l/(E*d)}} * 1000 \text{ mg/g} = 63,6 \text{ mg/l} \rightarrow \text{gewählt ca. 60 mg/l}$$

In den Versuchsreihen wurden i.M. Zulaufkonzentrationen von CSB = 500 bis 550 mg/l und $N_{ges.}$ = 45 – 50 mg/l erzielt.

Hierbei ist anzumerken, dass der $N_{ges.}$, das heißt die Summe aus allen Stickstoffkomponenten (org. N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NO}_2\text{-N}$), nicht parallel gemessen wurde.

Es wird davon ausgegangen, dass im Anaerobfilter eine weitestgehende Umwandlung des org. N in $\text{NH}_4\text{-N}$ stattgefunden hat und daher die Summe aus $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NO}_2\text{-N}$ als

N_{ges} betrachtet werden kann. Aufgrund des pH-Wertes von 7,5 ist auch nicht davon auszugehen, dass sich Ammoniak gebildet hat.

Der Grund, warum die beabsichtigten Konzentrationen für CSB und N_{ges} nicht erreicht wurden, liegt in einem stärkeren Abbau (ca. 20 – 30%) im Vorlagebehälter durch eine schon einsetzende Hydrolyse bzw. Versäuerung und in der relativ leichten Abbaubarkeit des synthetischen Abwassers.

◆ Belebtschlamm:

Es wurde Belebtschlamm (eingedickter Überschussschlamm mit ca. 0,5 – 1% TS-Gehalt) zur Einleitung/Beschleunigung der biologischen Abbauprozesse aus dem Nachklärbecken der kommunalen Kläranlage Göttingen entnommen. Der Belebtschlamm wurde mit Leitungswasser gemischt (50% / 50%) und in die Belebtschlammanlage gegeben, die danach mit dem synthetischen Abwasser im Durchlaufbetrieb beschickt wurde.

Es wurden zwar von Anfang an Anstrengungen unternommen, Belebtschlamm mit Anammox-Bakterien zu besorgen, was allerdings nicht von Erfolg gekrönt war.

Da Anammox-Bakterien im Belebtschlamm enthalten sind, wurde versucht, durch Einstellung der entsprechenden, nachfolgend aufgeführten Milieubedingungen die Anreicherung dieser Bakterien zu forcieren:

- pH-Bereich: Optimum 7,5 - 8
 - Temperatur: 10° - 45°. Optimum 37 - 38°
 - O_2 gelöst $\leq 0,5$ mg/l
 - Nitrit: Vermeidung der Hemmung bei kritischen Konzentrationen von $> 30 - 50$, vollständige Hemmung ab $> 100 - 400$ mg/l,
 - Substrat-Verhältnisse:
 - Ammonium (NH_4) zu Nitrit (NO_2) 1 : 1,32
 - CSB zu NH_4 -N: 1,4 : 1
- [JENNI/ JENNI / 2014]

Inwieweit dies gelang, bzw. welche Bedingungen eingestellt werden konnten, wird in dem Kapitel 4 „Auswertung“/„Ergebnisse“ beschrieben.

3.3.2. Bemessungsansatz für Grundeinstellung

Die Durchflussmenge beider Anlagenkomponenten muss aufeinander abgestimmt sein, da ein Durchlaufbetrieb durchgeführt werden soll.

Die unsicherste Komponente ist die der Belebtschlammanlage, die zu einer Deammonifikationsanlage umgebaut werden sollte, da es hierzu noch keine Bemessungsansätze insgesamt und nur wenige Erfahrungen für kommunales Abwasser gibt.

Um eine stabile Prozessführung zu erzielen und die Anlage bzw. die sich bildende Biozönose nicht von Anfang an zu überfordern, wurde zunächst eine kleine Zuflussabwassermenge < 1 l/h eingestellt und dann, im weiteren Versuchsverlauf, auf die Zuflussabwassermenge erhöht, die mit der einer konventionellen Kläranlage, die nach dem Belebungsverfahren mit Nitrifikation und Denitrifikation funktioniert, vergleichbar ist.

Diese Grobbemessung nach Arbeitsblatt A 131 ist im Anhang (vgl. Anhang Anlage AIII) mit den Bemessungsparametern für Abfluss und Frachten nach Anlage AVIII-1 des Anhanges durchgeführt.

Mithilfe des für einen Einwohnerwert von 10.000 ermittelten Volumens und der angesetzten Zuflussabwassermenge unter Zugrundelegung eines mittleren täglichen Wasserverbrauchs von 120 l/(E*d) und eines Fremdwasserzuschlags von 20%, erfolgte eine Umrechnung auf den Maßstab der Laboranlage.

Dabei wurde eine Zuflussabwassermenge von 1,8 l/h (\cong hydraul. Verweilzeit von ca. 33 h) ermittelt, welche als Größenordnung zunächst anvisiert wurde und danach entsprechend der Versuchsergebnisse erhöht werden sollte.

Der Anaerobfilter (AF) wurde mit der gleichen Zuflussabwassermenge wie die Belebtschlamm-anlage betrieben.

3.3.3. Belüftungseinstellungen/ Belüftungskonzepte

Die Belüftung des anaeroben Behälters B2, in dem die Nitrifikation ablaufen sollte, erfolgte durch am Boden angeordnete Belüftungsteller. Der Luftvolumenstrom wurde per Hand eingestellt auf Grundlage von zuvor durchgeführten Vorversuchen, mit denen festgestellt wurde, welche Schalterstellung welche O₂-Konzentration im Behälter bewirkt.

Mit dem Belüftungskonzept sollte eine Hemmung der Nitrifikation bzw. eine Nitritanreicherung durch eine geringe O₂-Konzentration und/oder durch eine intermittierende Belüftung erreicht werden.

Zunächst wurde zur Gewährleistung einer sicheren Betriebsführung und zur Vermeidung der Überforderung des Systems mit folgenden Einstellungen (Belüftungskonzept 1), gearbeitet:

- Belüftungsintensität: Luftertrag 15 l_{Luft}/ min.
Dies bedeutet bezogen auf das Reaktorvolumen von 40 l/Stunde:
 $15 \text{ l}_{\text{Luft}}/\text{min} * 60 \text{ min}/\text{h} / 40 \text{ l} = 22,5 \text{ l}_{\text{Luft}}/(\text{l}_{\text{Reaktorvolumen}} * \text{h})$
- Belüftung: 5 min
- Belüftungspause: 15 min

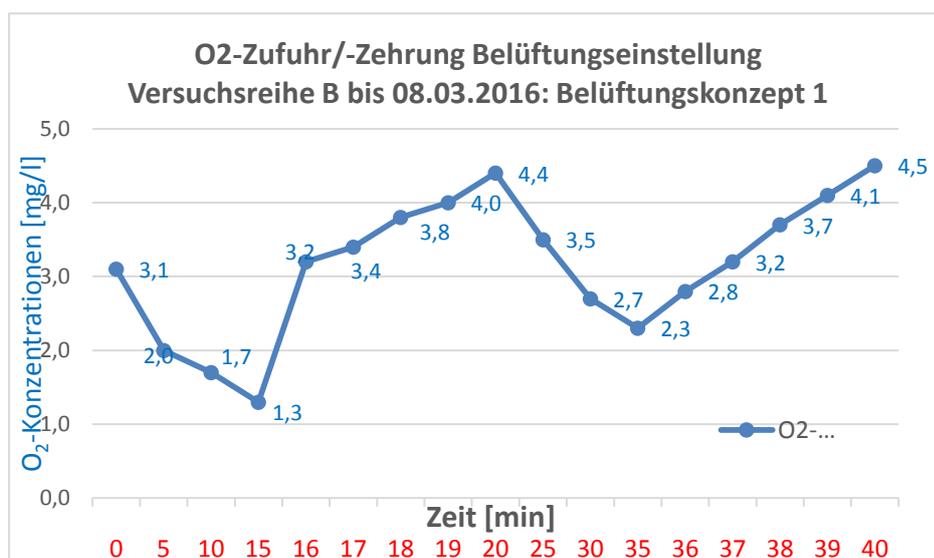


Abbildung 3.3.1: O₂-Konzentrationen Belüftungskonzept 1

Da sich bei diesen Belüftungseinstellungen hohe O₂- Konzentrationen im Behälter 2 einstellen, (vgl. Abbildung 3.3.1) und es dadurch zu einer sehr guten Nitrifikation gekommen ist, entgegen der Absicht der Nitrationshemmung, wurde das Belüftungskonzept geändert in Anlehnung an [GILLBERT / 2014] mit folgenden Einstellungen:

- Belüftungsintensität: Luftertrag $6 I_{\text{Luft}} / (I_{\text{Reaktorvolumen}} * h)$
Dies bedeutet bezogen auf das Reaktorvolumen von 40 l/Stunde:
 $6 I_{\text{Luft}} / (I_{\text{Reaktorvolumen}} * h) * 40 I_{\text{Reaktorvolumen}} / 60 \text{ min} / h = 4 I_{\text{Luft}} / \text{min}$
- Belüftung: 3 min
- Belüftungspause: 15 min

Zielsetzung war eine Obergrenze der O₂-Konzentration von 1mg/l bzw. eine intermittierende Belüftung.

Die Abbildungen 3.3.2 bis 3.3.3 zeigen die Entwicklung des Belüftungskonzepts 2 von Beginn der Belüftungseinstellung am 09.03. bis zum 18.03.2016. Es ist ersichtlich, dass sich mit der Versuchsdauer das Niveau des Sauerstoffgehalts von > 2 mg/l auf 1,1 – 1,3 mg/l absenkt. Des Weiteren wurden die anaeroben Phasen (O₂-Gehalt = 0 mg/l) mit zunehmender Versuchsdauer länger.

Die Auswertung der O₂-Werte war nur zwischen dem 12.03.2016, 11:37 Uhr bis zum 24.03.2016, 10:42 Uhr auf Basis von Minutenwerten möglich, danach standen nur noch durch Angabe von Stundenwerten stichprobenartige Ablesungen mit eingeschränkter Aussagekraft zur Verfügung.

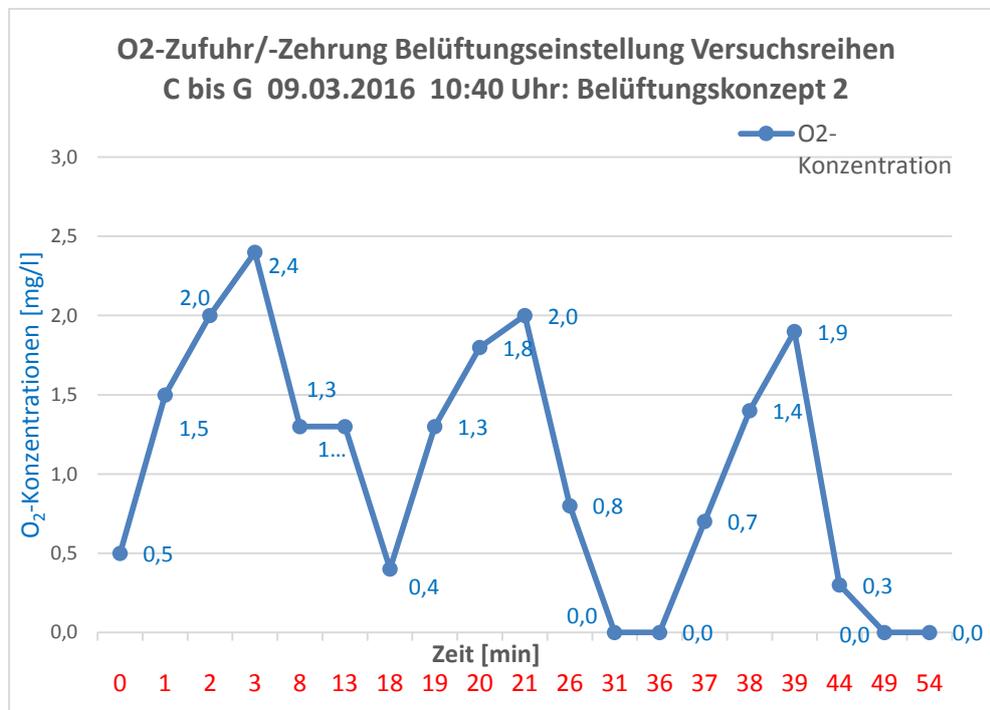


Abbildung 3.3.2: Belüftungskonzept 2 – 09.03.2016

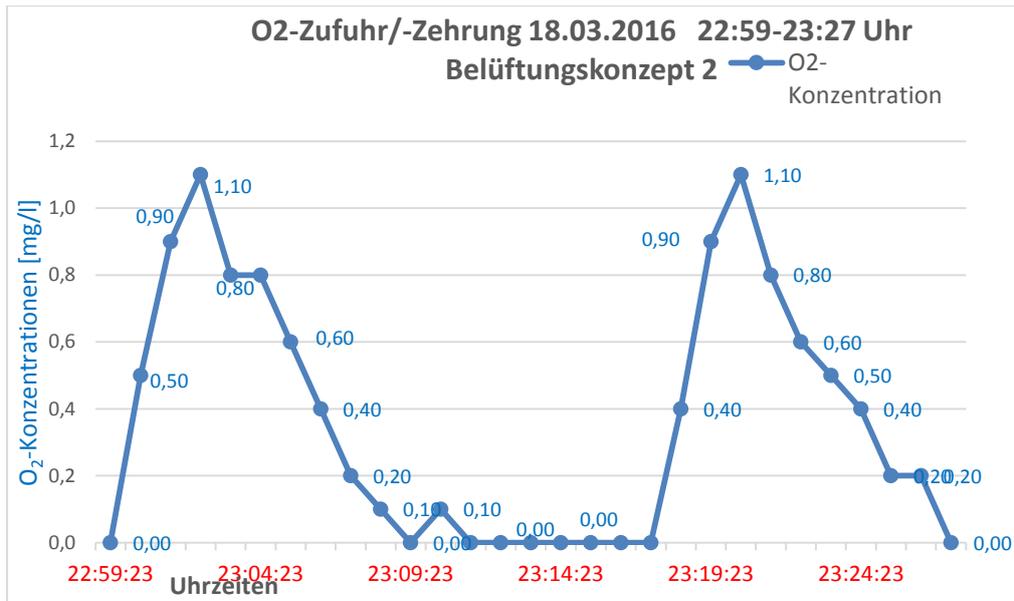


Abbildung 3.3.3: Belüftungskonzept 2 – 18.03.2016

Aus den Minutenwerten (vgl. Abbildung 3.3.4) ist sehr gut der fast lineare Sauerstoffabbau (O₂-Zehrung) mit „Zehrungsgeschwindigkeiten“ von ca. 0,14 bis 0,2 mgO₂/min ablesbar.

Insgesamt wurden auch längere Phasen (einige Stunden bis Tage) mit einem Sauerstoffgehalt von 0 mg/l festgestellt, was entweder auf Verunreinigungen der Messsonden oder auf Störungen an der Belüftung hindeutet. Dies ist auch in Abbildung 3.3.5, die die O₂-Tagesmittelwerte der Minutenmessungen zeigt, zu erkennen, so am 20.03 und vom 23.03.2016 an.

Aus dieser Abbildung ist auch erkennbar, dass sich beim störungsfreien Betrieb im Behälter 2 O₂-Gehalte zwischen 0,20 und 0,40 mg/l eingestellt haben.

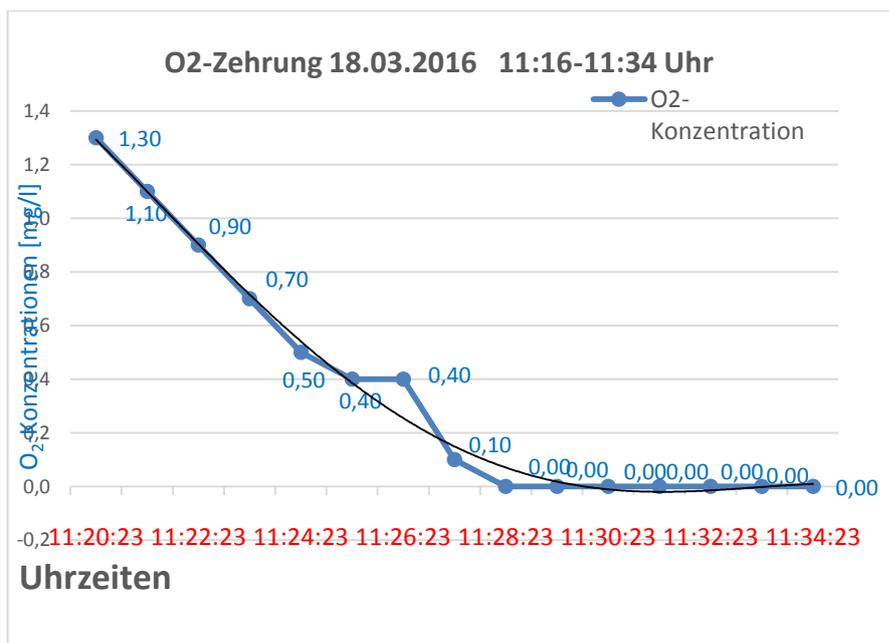


Abbildung 3.3.4: O₂ - Zehrung – 18.03.2016

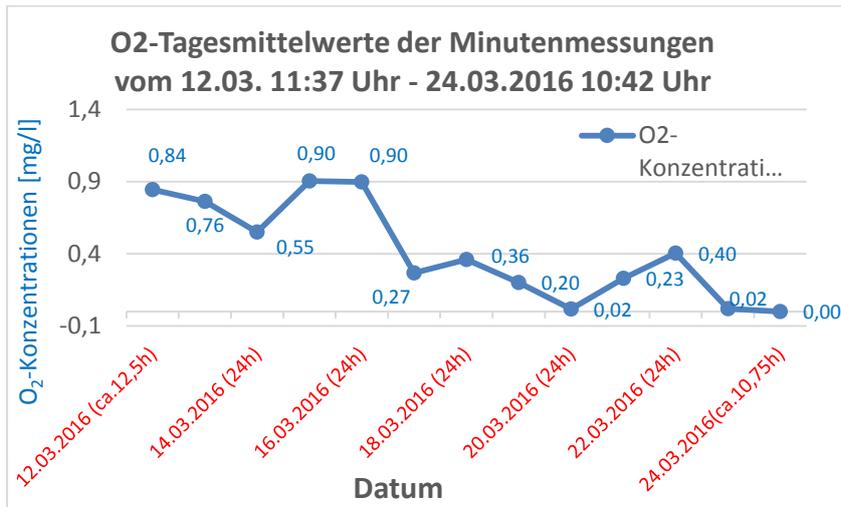


Abbildung 3.3.5: O₂ – Tagesmittelwerte der Minutenmessungen

3.4 Versuchsdurchführung

3.4.1 Messprogramm / Analysemethoden

■ Messprogramm

Im Messprogramm konnten nicht alle Parameter gemessen bzw. analysiert werden, da dies aus Kostengründen und der Schwierigkeit einer ständigen Wartung und Kontrolle der Anlage nicht möglich war.

Insbesondere wäre eine online-Messung der anorganischen Stickstoffwerte und des CSB bzw. eine größere Verdichtung der Analysewerte für die Entwicklung von Prozessstrategien von großer Bedeutung gewesen. Insgesamt war dies im Rahmen einer Masterthesis im Fernstudium nicht zu leisten.

Darum musste ein pragmatisches Messprogramm entwickelt werden, das den finanziellen Möglichkeiten und dem realisierbaren Betreuungsaufwand entsprach.

Abbildung 3.4.1 zeigt die Gesamtanlage in einem Verfahrensfliessbild mit Eintragung der Messstellen „AF-Input“, „PNA- bzw. D+N-Input“, „B1-Output“, „B2-Output“ und „B3-Output“, sowie die Rezirkulation, den Rücklaufschlamm (RS) und die Belüftung.

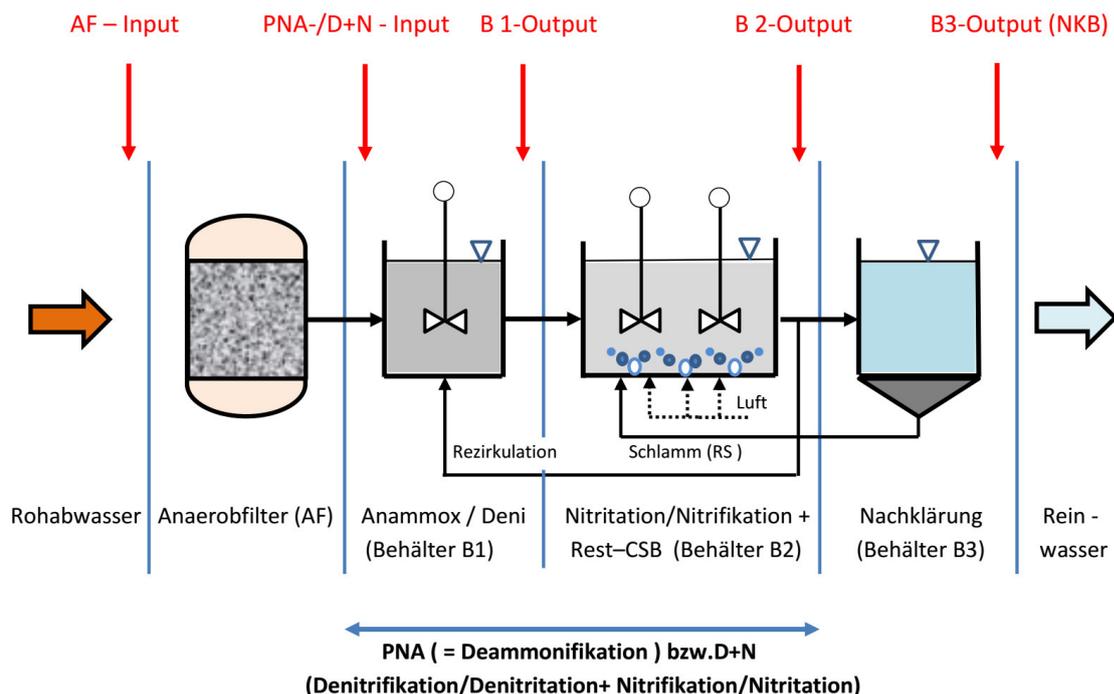


Abbildung 3.4.1 Verfahrensfliessbild mit Messstellen

In den Tabellen A3.4.1 und A3.4.2 im Anhang A IV ist das Messprogramm für den Anaerobfilter (AF) und die Belebtschlammanlage (PNA bzw. D+N) dargestellt mit Angabe des Messverfahrens und der Messhäufigkeit.

Die wesentlichen Messungen/Bestimmungen waren für den Anaerobfilter die Durchflussmenge, die Zu- und Ablaufkonzentrationen von CSB und $\text{NH}_4\text{-N}$, die Gasanalyse (Gasmenge, insbes. CH_4 und CO_2) und die Temperaturen (Reaktor, Gas).

Für die Belebtschlammanlage waren die CSB-Analytik sowie die Stickstoffanalytik ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$) die entscheidenden Parameter, die für die Abläufe der Behälter B1, B2 und B3 bestimmt wurden.

Die Zufluss-/ Rezykulations- und Rücklaufschlammengen wurden mit dem Datenlogger AL-MEMO erfasst, ebenso die mit Sonden gemessenen pH-Werte in den Behältern B1 und B2 und der Sauerstoffgehalt in Behälter B2.

Die CSB - bzw. N-Analytik wurde zwischen dem 23.02.2016 und dem 17.08.2016 durchgeführt. Die vollständige N-Analytik erfolgte bis Mitte März 2016 in etwa wöchentlich, danach bis ca. Ende Juli 2016 14-tägig und im August 2016 noch einmal.

Die CSB-Analytik wurde bis Mitte März 2016 ca. alle 2 – 7 Tage und danach bis ca. Ende Juli 2016 einmal wöchentlich und im August 2016 noch einmal durchgeführt.

■ Geräte und Analysemethoden

Folgende Geräte wurden für die Analysen und Probenaufbereitung im Rahmen dieser Arbeit verwendet:

- Zentrifuge EBA20, Firma Hettich,
- Spektralphotometer Xion 500, Firma Dr. Lange,
- pH/mV-Taschenmessgerät WTW pH 340i, Firma WTW,
- Gasanalysegerät VISIT03 der Firma Messtechnik Eheim zur Analyse von CO_2 , O_2 , CH_4 , H_2S und H_2 .

Chemikalien:

- Küvettentest Hach-Lange CSB-Test (0 – 1.000 mg/l) nach DIN 15705
- Küvettentest Hach-Lange $\text{NH}_4\text{-N}$ -Test
- Küvettentest Hach-Lange $\text{NO}_3\text{-N}$ -Test
- Küvettentest Hach-Lange $\text{NO}_2\text{-N}$ -Test

Im Anhang, Anlage A IV befindet Tabelle A 3.4.3, in der die Analysemethoden genauer beschrieben sind.

3.4.2 Versuchseinstellungen

Im Februar 2016 wurden Anaerobfilter (AF) und Belebtschlammanlage (PNA bzw. D+N) separat angefahren mit niedriger Beschickung (ca. 0,5 l/h) und mit einer starken Belüftung des aeroben Teils der Belebtschlammanlage ($> 6 \text{ mg O}_2/\text{l}$).

Am 25.02.2016 wurden die Anlagenteile AF bzw. PNA/D+N gekoppelt im Sinne eines Durchflussbetriebes mit einem Zwischenbehälter, $V = 60 \text{ l}$.

Für die **Einfahrphase** der Gesamtanlage wurden folgende Ausgangseinstellungen vorgenommen / gewählt:

- Vorlagebehälter AF, $V = 500 \text{ l}$
- Abwasser mit wenig Fremdwasser: FWZ = ca. 20% unter Berücksichtigung mechanischer Vorbehandlung: CSB = ca. 700 mg/l ; TKN (org.N + $\text{NH}_4\text{-N}$) = ca. 60 mg/l, reduziert auf ca. 50 mg/l, da mittelfristig im AF Stickstoffabbau über die Einbindung im Überschussschlamm zu erwarten ist
- Rezirkulationsmengen: Abwasser $\rightarrow 150 - 400 \%$; RS $\rightarrow 100 - 150 \%$
- $T = 20 - 25^\circ\text{C}$ fest eingestellt
- Durchflussmenge: Anfahren 1 – 1,5 l/h, später Erhöhung in Anhängigkeit der Ablaufwerte
- 2-stufige Deammonifikation (PNA) bzw. Denitrifikation + Nitrifikation oder Denitrifikation + Nitritation (D+N) mit suspendierten Mikroorganismen für Nitritation (keine sessilen); vorgeschaltetes Anammox, keine Aufteilung des $\text{NH}_4\text{-N}$ bzw. vorgeschaltete Denitrifikation/ Denitrifikation
- Anaerobreaktor: Reaktor I des vorhandenen Versuchsstands mit Arbeitsvolumen von rd. 40 l. Die Durchflussmenge muss auf die der Belebtschlammanlage abgestimmt sein, da die Anlage im Durchflussbetrieb betrieben wird. Geringe Abweichungen können durch den Zwischenbehälter ausgeglichen werden.
- Einstellung O_2 -Konzentration: Vgl. Vorversuche (Kap. 3.3.3)
- Messungen s.o.; vgl. Messprogramm (Kap. 3.4.1)

→ **Ziel:**

Sukzessive Umstellung in „PNA-Behälter“ von Denitrifikation über Denitrifikation zu Anammox

Im Rahmen verschiedener **Versuchsreihen** (vgl. Kap. 3.4.4) wurden folgende **Prozesssteuerungsstrategien** vorgenommen:

- O_2 -Einstellungen (Intensität Belüftung, Belüftungsintervalle) zur Nitratationshemmung
- Variation der Rezirkulation (Abwasser RV, Rücklaufschlamm RS) zur Beeinflussung der Substratverhältnisse, Verbesserung des Wirkungsgrades (RV) und Anreicherung des Belebtschlammes (RS),
- Steigerung der Zulaufmenge (= Durchlaufwassermenge)

Es wurde mit relativ kleinen Durchflüssen gearbeitet, damit die biologischen Abbauvorgänge aufgrund langer Verweilzeiten in Gang kommen und stabil bleiben können.

Um im Vergleich zu konventionellen Belebungsverfahren zu wirtschaftlicheren Volumina zu kommen, wurde eine Erhöhung der Zulaufmenge auf über 3 l/h angestrebt. Die Erhöhungen konnten aber nur moderat durchgeführt werden, da ansonsten die Stabilität der Reinigungsprozesse auch in Anbetracht der Analyseergebnisse (Ablaufwerte) gefährdet gewesen wäre. In diesem Zusammenhang spielen auch die Beschaffungskosten der Reagenzien zur Herstellung von synthetischem Abwasser eine Rolle.

Im Anschluss an die Variation der Prozesssteuerungsmöglichkeiten sollten noch verschiedene **Betriebszustände bzw. Betriebsweisen mit Praxisrelevanz** simuliert werden:

- Verschiedene Abwasserkonzentrationen: Fremdwasserzuschläge (FWZ) von 50% bzw. 100%
- Verschiedene Abwassertemperaturen: $T = 10 - 20^{\circ}\text{C}$
- Einsatz von kommunalem Abwasser aus einer Kläranlage
- Variationen innerhalb der Belebtschlammanlage:
 - Volumenanteile anaerob / aerob
 - Ein / zweistufige Betriebsweise
 - Nachgeschaltete Betriebsweise mit Aufteilung der Volumenströme
 - Verwendung eines sessilen Biomassensystems (z.B. eingetauchtes Festbett)
 - Animpfen mit Biomasse, die Anammoxbakterien enthält.

Diese Variationen der Betriebszustände und Betriebsweisen konnten aus nachfolgend aufgeführten Gründen nicht durchgeführt werden:

- Untersuchungszeit im Rahmen einer Masterthesis zu kurz
- Hoher Betreuungsaufwand für die Versuchsanlage / Messungen im Rahmen eines Fernstudienganges nicht zu leisten,
- Eingeschränktes Budget.

3.4.3 Versuchsreihen / Versuchsplan

Die Versuchsreihen stellen keine total unterschiedlichen Varianten dar, vielmehr mussten die Variationen behutsam durchgeführt werden, so dass die Übergänge fließend sind.

In Tabelle 3.4.3 sind die *Versuchsreihen A bis G* mit dazugehörigen Zulaufabwassermengen Q_{Zul} , den Rezirkulationen RV (Rückführung des Abwassers von Behälter B2 in Behälter B1) und dem Rücklaufschlamm RS (Rücklauf von der Nachklärung B3 in Behälter B2), jeweils angegeben als Rücklaufverhältnis, dem Sauerstoffgehalt im aeroben Behälter B2 und den pH-Werten in den Behältern B1 und B2 dargestellt.

Im Februar 2016 erfolgte zunächst die separate Inbetriebnahme der Anlagenkomponenten Anaerobfilter (AF) und Belebtschlammanlage (*Versuchsreihe A*)

Nach Koppelung der Anlagenkomponenten Ende Februar 2016 begann die **Einfahrphase** innerhalb der *Versuchsreihen B und C* bis Mitte/Ende März 2016.

In diesen Versuchsreihen wurden die Ausgangseinstellungen (vgl. Kap. 3.4.3) berücksichtigt.

Am 8.03.2016 (*Versuchsreihe C*) wurde das Belüftungskonzept (vgl. Kap. 3.3.3) geändert, so dass sich im Behälter B2 ein Sauerstoffgehalt im Bereich 0,5 bis 1 mg/l i.M. einstellte.

In *Versuchsreihe D* wurde dann ein geringerer Sauerstoffgehalt in B2 bei ungefährer Beibehaltung der Rezirkulationsverhältnisse wie in Versuchsreihe C festgestellt.

Da die Ablaufwerte des Gesamtstickstoffs noch nicht den Grenzwerten nach Abwasserverordnung AbnV 2016 [DWA Themen 2016] entsprachen, wurden die Rezirkulationsverhältnisse RV in der *Versuchsreihe E* erhöht.

In *Versuchsreihe F* erfolgte dann eine weitere Erhöhung des Rezirkulationsverhältnisses RV, sowie eine Reduzierung des Rücklaufschlammverhältnisses RS.

In den *Versuchsreihen E und F* wurden die Zulaufwassermengen leicht erhöht. In *Versuchsreihe G* wurde dann wieder das Rezirkulationsverhältnis RV reduziert.

| Probentag | Abwassermengen | Rezirkulationen [-] | | O ₂ -Gehalt B2 | | pH-Wert | |
|---|-------------------------|---------------------|-----------|---------------------------|--------|---------|------|
| | Q [l/h] | RV | RS | Sättigung | Konz. | B1 | B2 |
| | Q _{zu,PNA/D+N} | (B2-->B1) | (B3-->B2) | [%] | [mg/l] | | |
| Einfahrphase | | | | | | | |
| Versuchsreihe A): nur PNA/D+N mit sehr starker Belüftung Q _{zu,PNA} = 0,51l/h, RV=5,16, RS=1,69 | | | | | | | |
| 23.02.2016 | 0,51 | 5,16 | 1,69 | 79,40 | 6,31 | 6,61 | 7,26 |
| Versuchsreihe B): AF+PNA/D+N mit Belüftungskonzept 1, hoher O ₂ -Gehalt, Q _{zu,AF} und Q _{zu,PNA/D+N} = 1,12-1,15l/h, RV=2,45-3,86, RS=1,10-1,54 | | | | | | | |
| 29.02.2016 | 1,12 | 3,86 | 1,10 | 43,46 | 3,43 | 7,32 | 7,73 |
| 07.03.2016 | 1,15 | 2,45 | 1,54 | 36,64 | 2,80 | 7,18 | 7,53 |
| Versuchsreihe C): AF+PNA/D+N mit Belüftungskonzept 2, mittlerer O ₂ -Gehalt Q _{zu,AF} und Q _{zu,PNA/D+N} = 1,22-1,32l/h, RV=1,64-1,69, RS=1,18-1,21 | | | | | | | |
| 14.03.2016 | 1,22 | 1,69 | 1,21 | 8,74 | 0,66 | 7,15 | 7,30 |
| 16.03.2016 | 1,32 | 1,64 | 1,18 | 12,55 | 0,90 | 7,11 | 7,35 |
| Versuchsreihe D): AF+PNA/D+N mit Belüftungskonzept 2, geringer O ₂ -Gehalt, Q _{zu,AF} und Q _{zu,PNA/D+N} = 1,32-1,37l/h, RV=1,88-2,14, RS=1,18-1,34 | | | | | | | |
| 30.03.2016 | 1,32 | 2,14 | 1,18 | 8,96 | 0,64 | 7,18 | 7,60 |
| 13.04.2016 | 1,35 | 1,93 | 1,34 | 2,38 | 0,14 | 7,19 | 7,51 |
| 27.04.2016 | 1,37 | 1,88 | 1,25 | 0,67 | 0,03 | 7,11 | 7,61 |
| Versuchsreihe E): AF+PNA/D+N mit Belüftungskonzept 2, geringer O ₂ -Gehalt, Q _{zu,AF} und Q _{zu,PNA/D+N} = 1,56-1,72l/h, RV=5,35-7,44, RS=0,36-1,03 | | | | | | | |
| 11.05.2016 | 1,72 | 5,35 | 0,83 | 5,85 | 0,37 | 7,09 | 7,54 |
| 25.05.2016 | 1,56 | 7,44 | 1,03 | 4,96 | 0,33 | 7,16 | 7,58 |
| 08.06.2016 | 1,70 | 7,40 | 0,36 | 1,55 | 0,08 | 7,17 | 7,63 |
| Versuchsreihe F): AF+PNA/D+N mit Belüftungskonzept 2, geringer O ₂ -Gehalt, Q _{zu,AF} und Q _{zu,PNA/D+N} = 1,50-1,74l/h, RV=6,01-10,02, RS=0,34-0,40 | | | | | | | |
| 22.06.2016 | 1,74 | 7,93 | 0,40 | 4,51 | 0,29 | 7,10 | 7,69 |
| 06.07.2016 | 1,52 | 10,02 | 0,34 | 0,73 | 0,03 | 6,95 | 6,88 |
| 20.07.2016 | 1,50 | 6,01 | 0,37 | 2,49 | 0,15 | 7,09 | 6,45 |
| Versuchsreihe G): AF+PNA/D+N mit Belüftungskonzept 2, geringer O ₂ -Gehalt, Q _{zu,AF} und Q _{zu,PNA/D+N} = 1,01l/h, RV=4,82, RS=0,30 | | | | | | | |
| 17.08.2016 | 1,01 | 4,82 | 0,30 | 8,24 | 0,62 | 7,23 | 5,73 |

Tabelle 3.4.1: Zusammenstellung der Versuchsreihen

4. Auswertung / Ergebnisse

4.1. Allgemeines

Zunächst erfolgt die Darstellung / Auswertung der Ablaufwerte, die den Einleitewerten in ein Gewässer entsprechen.

Anschließend werden die Abbauleistungen und Abbauvorgänge in den Anlagenkomponenten Anaerobfilter (AF) und Belebtschlammanlage (PNA bzw. D + N) analysiert.

Die Messwerte wurden statistisch ausgewertet durch Mittelwertbildung [vgl. BENNINGHAUS / 2005] als:

Arithmetisches Mittel:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \text{Formel 8}$$

Median (Zentralwert):

$$\tilde{x} = x_{\left(\frac{N+1}{2}\right)} \quad \text{für ungerade Anzahl} \quad \text{Formel 9}$$

$$\tilde{x} = \frac{x_{\left(\frac{N}{2}\right)} + x_{\left(\frac{N}{2} + 1\right)}}{2} \quad \text{für gerade Anzahl} \quad \text{Formel 10}$$

Die Streubreite der Messwerte um den Mittelwert werden mit Hilfe folgender statistischer Größen ermittelt [vgl. BENNINGHAUS / 2005]:

Varianz:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad \text{Formel 11}$$

Standardabweichung:

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{N} \quad \text{Formel 12}$$

4.2. Einleitewerte/ Ablaufwerte

Es wurden die Ablaufwerte, gemessen als "B3-Output NKB" im Auslauf des Nachklärbeckens, von CSB, NH₄-N und N_{ges} = N_{anorg.} (Gesamtstickstoff = anorg. Stickstoff = Ammoniumstickstoff + Nitratstickstoff + Nitritstickstoff) mit den Werten der deutschen Abwasserverordnung AbwV 2016 [DWA-Themen / 2016], vgl. Tabelle 1.1, verglichen. Beim Gesamtstickstoff wurde davon ausgegangen, dass sich kein organischer Stickstoff mehr im Ablauf befindet, sondern innerhalb der Reinigungsstufen komplett ammonifiziert wurde.

Die Grenzwerte betragen:

CSB = 90 mg/l (Größenklasse 3 und 4)

NH₄-N = 10 mg/l (Größenklasse 3 und 4)

N_{anorg.} = 18 mg/l (Größenklasse 4)

Für N_{anorg.} kann eine höhere Konzentration bis zu 25 mg/l von der Wasserwirtschaftsverwaltung zugelassen werden, wenn die Verminderung der Gesamtstickstofffracht $\geq 70\%$ beträgt.

4.2.1 Abbau der organischen Abwasserbelastung (CSB)

Der CSB beschreibt die Abwasserbelastung mit organischen Abwasserinhaltsstoffen. Die CSB-Konzentrationen und CSB-Abbaugrade über den gesamten Untersuchungszeitraum sind in den Abbildungen 4.2.1 und 4.2.2 dargestellt, die statistischen Daten in Tabelle 4.2.1.

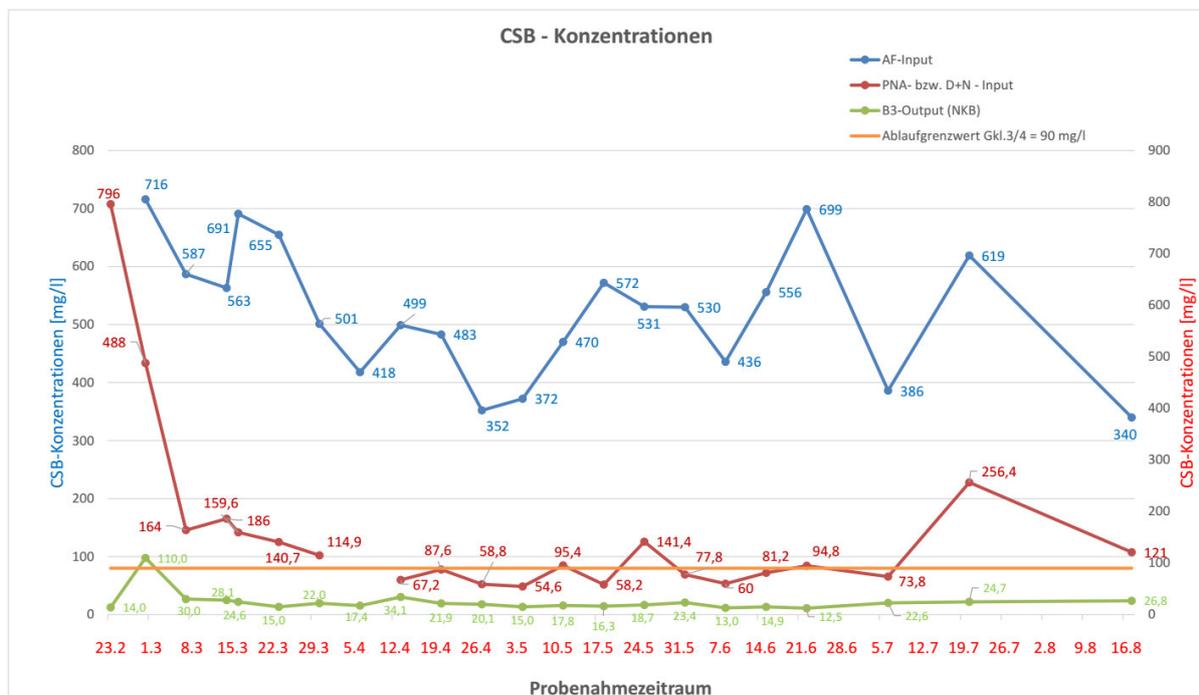


Abbildung 4.2.1: CSB-Konzentrationen im Untersuchungszeitraum

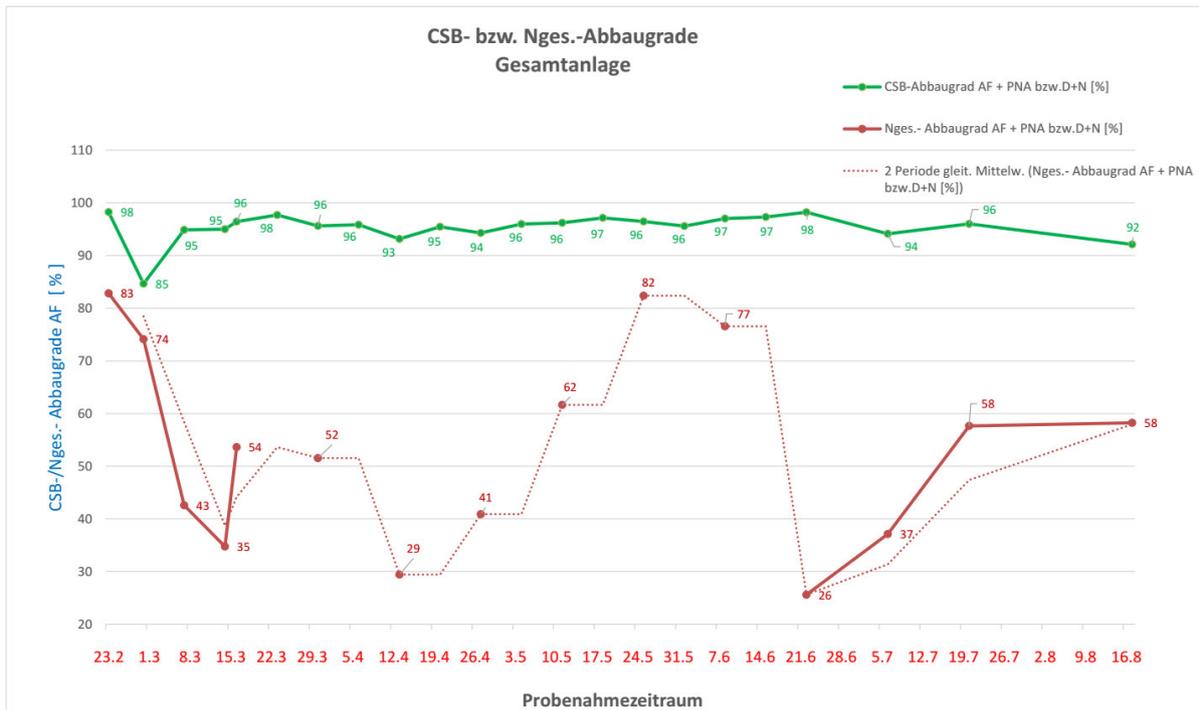


Abbildung 4.2.2: CSB- u. N- Abbaugrade im Untersuchungszeitraum

| | NH ₄ -N | | N _{ges.} | | CSB _{gel} | | |
|---------------------------|--|---------------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| | NH ₄ -N - PNA- bzw. D+N - Input | NH ₄ -N - B3- Output (NKB) | N _{ges.} - PNA- bzw. D+N - Input | N _{ges.} - B3-Output (NKB) | AF-Input | PNA- bzw. D+N - Input | B3-Output (NKB) |
| Mittelwert | 46,08 | 5,80 | 46,80 | 21,65 | 532,54 | 129,07 | 24,67 |
| Median | 47,20 | 2,49 | 47,52 | 23,00 | 543,00 | 95,40 | 21,00 |
| Varianz | 26,09 | 53,34 | 23,34 | 74,69 | 12336,66 | 9354,88 | 379,24 |
| Standardabweichung | 5,11 | 7,30 | 4,83 | 8,64 | 111,07 | 96,72 | 19,47 |

Tabelle 4.2.1: Statistische Werte aller Messungen CSB- und N-Konzentrationen 23.02-17.08.2016

Der Mittelwert der CSB-Konzentration des Zulaufs von rd. 530 mg/l, statt dem anvisierten Wert von 700 mg/l, und die hohe Standardabweichung ist durch Abbauvorgänge im Vorlagebehälter und unterschiedliche zeitliche Abstände der Probenahme zum frisch hergestellten synthetischen Abwasser zu erklären.

Die CSB-Ablaufwerte des Anaerobfilters (AF), die gleichzeitig die Zulaufwerte der Belebtschlammanlage („PNA- bzw. D + N-Input“) darstellen, befinden sich bereits auf einem nied-

rigen Niveau, i.M. 161 mg/l (arithmetisches Mittel), wobei hier auch eine sehr hohe Standardabweichung vorliegt. Es handelt sich um eine stichprobenartige Einzelmessung mit einer relativ großen Unsicherheit.

Der CSB-Abbaugrad wird im Zusammenhang mit den Auswertungen zum Anaerobfilter (vgl. Kap. 4.3) bewertet.

Die CSB-Ablaufwerte der gesamten Anlage befinden sich auf einem sehr niedrigen Niveau über den gesamten Untersuchungszeitraum und liegen mit einem Mittelwert von ca. 25 mg/l mit nur geringer Streuung deutlich unter dem geforderten Einleitewert.

Der CSB-Abbaugrad der gesamten Anlage liegt im Untersuchungszeitraum zwischen 85% und 98%.

Aufgrund des relativ starken Abbaus im Vorlagebehälter ist davon auszugehen, dass das synthetische Abwasser relativ leicht abbaubare Kohlenstoffverbindungen enthalten hat.

4.2.2 Abbau der Stickstoffverbindungen

Der Mittelwert der $N_{\text{ges.}}$ -Konzentration des Zulaufs (vgl. Tabelle 4.2.1) zur Belebtschlammanlage von ca. 47 mg/l erreicht fast den im synthetischen Abwasser angestrebten Wert von 50 mg/l. Das zeigt, dass im Anaerobfilter der organische Stickstoff, der im synthetischen Abwasser den Gesamtstickstoff ausmacht, i.M. fast komplett zu Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) umgebaut wurde. Über den Untersuchungszeitraum ist eine relativ geringe Schwankungsbreite erkennbar, was auch in der Standardabweichung abzulesen ist.

Bei den Zulaufwerten von nur knapp über 40 mg/l ist davon auszugehen, dass die Ammonifikation noch nicht vollständig erfolgt ist.

Die Stickstoffablaufwerte („ $\text{NH}_4\text{-N}$ – B3-Output“ „ $N_{\text{ges.}}$ – B3-Output“), - vgl. Tabelle 4.2.1 und Abbildungen 4.2.2 und 4.2.3 -, zeigen unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Reinigungsleistung.

Während die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte mit ca. 6 mg/l i.M. unter dem geforderten Einleitewert von 10 mg/l liegen, wird der $N_{\text{ges.}}$ -Einleitewert von 18 mg/l mit einem Mittelwert von 22 mg/l überschritten.

Deutlicher ist dies in den Verläufen der Stickstoffkonzentrationen (Abbildung 4.2.3) zu sehen. Während die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen sich fast immer unter dem Einleitegrenzwert bzw. knapp darüber, bis auf einen Ausreißer, bewegen, liegen die $N_{\text{ges.}}$ -Ablaufwerte meistens über dem Einleitegrenzwert.

Die Ausnahme ist hierbei die Versuchsreihe „E“ mit $N_{\text{ges.}}$ -Werten unter dem Einleitegrenzwert von 18 mg/l, zum Teil sogar deutlich darunter. Dies wird auch durch den Verlauf der $N_{\text{ges.}}$ -Abbaugrade bestätigt mit Abbaugraden von über 60% bis über 80% (vgl. Abbildung 4.2.2) in dieser Versuchsreihe.

4.3. Anaerobfilter

Zunächst werden die Formeln, die für die Versuchsauswertung im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung sind, zusammengestellt und erläutert. Danach erfolgt eine Beschreibung und Bewertung der Versuchsergebnisse. Die Tabelle mit allen Messdaten und den berechneten Werten befindet sich im Anhang, Anlage A V.

4.3.1. Funktions- und Leistungsparameter

◆ Gasmenge und Gaszusammensetzung

Als erster Schritt wird das Normvolumen des gebildeten Biogasvolumens berechnet; hierfür muss der Wasserdampfgehalt des Biogases abgezogen werden.

Die mittels Gaszählern gemessene Brutto-Biogasmenge in l wird mit der Formel 13 auf die Normbedingungen von 0°C und 1013,25 hPa bezogen und um den Wasserdampfdruck korrigiert [vgl. MUMME / 2008]

$$V_n^{tr} = V_{\text{Messung}} * \frac{(p - p_w) * 273,15}{p_0 * (273,15 + T)} \quad \text{Formel 13}$$

Mit:

V_n^{tr} = Volumen des trockenen Biogases unter Normbedingungen

V_{Messung} = gemessenes Volumen des feuchten Biogases

p_0 = Normdruck = 1013,25 hPa

p = Gasdruck während der Volumenerfassung in hPa

p_w = Wasserdampfdruck im Biogas in hPa nach Formel Norm-Biogasvolumen (s.u.)

T = Temperatur des Biogases während der Volumenerfassung in °C

Der Wert für den Wasserdampfdruck wurde auf Grundlage der Formel von [LINKE et al.; 2006] und Angaben aus der VDI-Richtlinie 4630 mit der Formel 14 bestimmt:

$$p_w = - 4,3965 + 9,7962 * e^{0,0521*(T-273,15)} \quad \text{Formel 14}$$

mit: p_w und T siehe oben

Die Bestimmung der energierelevanten Methanmenge erfolgt nach folgender Formel:

$$V_{\text{CH}_4} = V_n^{tr} * C_{\text{CH}_4, \text{korr.}} \quad \text{Formel 15}$$

Mit:

V_{CH_4} = Methanmenge in l

V_n^{tr} = Volumen des trockenen Biogases unter Normbedingungen (s.o.)

$C_{\text{CH}_4, \text{korr.}}$ = korrigierte Konzentration der Methan Komponente in Vol.-%

Dabei ergeben sich die korrigierten Anteile für Methan und Kohlendioxid im trockenen Biogas, da sie gleichzeitig im feuchten Biogas analysiert wurden, nach folgender Formel: [vgl. VDI-Richtlinie 4630; 2004 / vgl. MUMME, JAN; 2008, S.49]

$$C_{i, \text{kor.}} = \frac{C_i}{C_{\text{CH}_4} + C_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{S}} + C_{\text{H}_2}} * 100 \quad \text{Formel 16}$$

mit:

$C_{i, \text{kor.}}$ = korrigierte Konzentration der Biogaskomponente i in Vol.-%

C_i = gemessene Konzentration der zu korrigierenden Biogaskomponente i in Vol.-%

$C_{\text{CH}_4} + C_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{S}} + C_{\text{H}_2}$ = korrig. Konzentration der Biogaskomponente i in Vol.-%

◆ CSB-Fracht und CSB-Abbaugrad

Die CSB-Fracht wurde aus der Zulaufmenge zum Anaerobfilter und der CSB-Zulaufkonzentration bestimmt:

$$B_{d, \text{CSB, Z-AF}} = Q_{\text{zul, d, A-F}} * C_{\text{CSB}} \quad \text{Formel 17}$$

mit:

$B_{d, \text{CSB, Z-AF}}$ = CSB-Fracht im Zulauf des Anaerobfilters [g/d]

Q_{zul} = Abwassermenge im Zulauf des Anaerobfilters [l/d]

C_{CSB} = CSB-Konzentration im Zulauf [g/l]

Dabei wurden die Zulaufwassermengen für den Anaerobfilter aus der Onlinemessung von AL-MEMO der Belebtschlammanlage entnommen.

Da im Vorlagebehälter CSB-Abbau stattfindet, stellen die gemessenen CSB-Konzentrationen nur eine Momentaufnahme (Stichprobe) dar. Sie wurden zu unterschiedlichen Abbaupunkten gemessen und bewegen sich in einem weiten Spektrum von ca. 370 – 710 mg/l. Es wird davon ausgegangen, dass der Mittelwert aus den gemessenen CSB-Werten auch das Tagesmittel der CSB-Konzentration darstellt, mit der der Anaerobfilter beschickt wird.

Die Ermittlung der jeweiligen CSB-Tagesfracht wurde daher jeweils mit dem Mittelwert der gemessenen CSB-Konzentrationen von 0,533 g/l durchgeführt.

Der CSB-Abbaugrad wurde mit folgender Formel bestimmt:

$$\eta_{\text{CSB}} = \frac{V_{\text{CH}_4} [\text{l}]}{B_{d, \text{CSB, Z-A}} [\text{gCSB}]} * \frac{1}{0,35 [\text{lCH}_4 / \text{gCSB}]} \quad \text{Formel 18}$$

mit:

Methangehalt pro CSB = 0,35 l_{CH4}/g_{CSB} nach [REUTERS / 2011]

η_{CSB} = CSB-Abbaugrad

◆ Leistungsparameter

Nachfolgende Leistungsparameter werden auf das Arbeitsvolumen des Festbettreaktors bezogen. Das Arbeitsvolumen wird vereinfachend als die Summe aus hydraulischen Volumen und dem Volumen der Festkörper angenommen. Rechnerisch ergibt sich das Arbeitsvolumen aus der Grundfläche des Reaktors multipliziert mit der Höhe der Flüssigkeit. Vereinfachend wird dafür die Höhe des Ablaufrohres angenommen. Das Arbeitsvolumen blieb während der Versuchsdurchführung konstant auf 39,8 l.

Hydraulische Verweilzeit t_H

Die hydraulische Verweilzeit resultiert aus dem Quotienten von Arbeitsvolumen und Flüssigkeitsvolumen in Tagen [d]. [MUMME / 2008, S.85]

$$t_H = \frac{V}{\dot{V}} \quad \text{Formel 19}$$

mit:

V = Arbeitsvolumen in l

\dot{V} = Volumenzustrom der Prozessflüssigkeit in den Festbettreaktor in l/d = $Q_{zul,d,AF}$

CSB-gesamt Raumbelastung B_R

Dieser Parameter beschreibt das „Verhältnis der täglich in die Vergärungsanlage zugeführten Mengen an Substrat zum Fermentervolumen“ [FNR / 2010, S. 266]. Der Wert wird in $kg\ oTS(m^3 \cdot d)$ angegeben. Mit dem Fermentervolumen wird dabei das Arbeitsvolumen, also der mikrobiologisch aktive Raum, bezeichnet (vgl. [SCHLATTMANN / 2007])

$$B_R = \frac{m.O,CSB_{ges}}{V} \quad \text{Formel 20}$$

mit:

$m.O, CSB_{ges}$ = CSB-Gehalt gesamt im Zustrom in den Festbettreaktor in $g \cdot d^{-1} = B_{d, CSB, Z-AF}$
 V = Arbeitsvolumen in l je Reaktor

4.3.2. Ergebnisse Anaerobfilter AF

■ CSB-Abbaugrad und CSB-Raumbelastung

Der CSB-Abbaugrad ist zum einen aus Sicht der Abwasserreinigung und zum anderen aus energetischer Sicht (Biogasausbeute) zu beurteilen.

Die Bestimmung des CSB-Abbaugrades aus der Biogasanalytik, vgl. Formel 18 bringt die in Abbildung 4.3.2 dargestellten Ergebnisse (blaue Kurve), im Mittel wurde ein CSB-Abbaugrad von 62% ermittelt.

Bei einer angenommenen mittleren Zulaufkonzentration zum AF von 533 mg/l (vgl. Tabelle 4.2.1) bedeutet dies eine mittlere CSB-Ablaufkonzentration aus dem AF von ca. 202 mg/l. Die in der CSB-Analytik gemessenen Werte betragen hingegen ca. 130 mg/l. Hierbei handelt es sich aber um punktuelle Einzelmessungen (Stichproben), bei der Biogasanalytik werden dagegen mittlere Tagesmengen (Methanmengen, CSB-Frachten) berücksichtigt. Ein weiterer Grund für die doch relativ starke Abweichung dürften Abbauvorgänge im Zwischenbehälter sein, aus dem die Proben für die CSB-Analytik entnommen wurden. Zur Beurteilung des Anaerobfilters werden die Ergebnisse der Biogasanalytik verwendet.

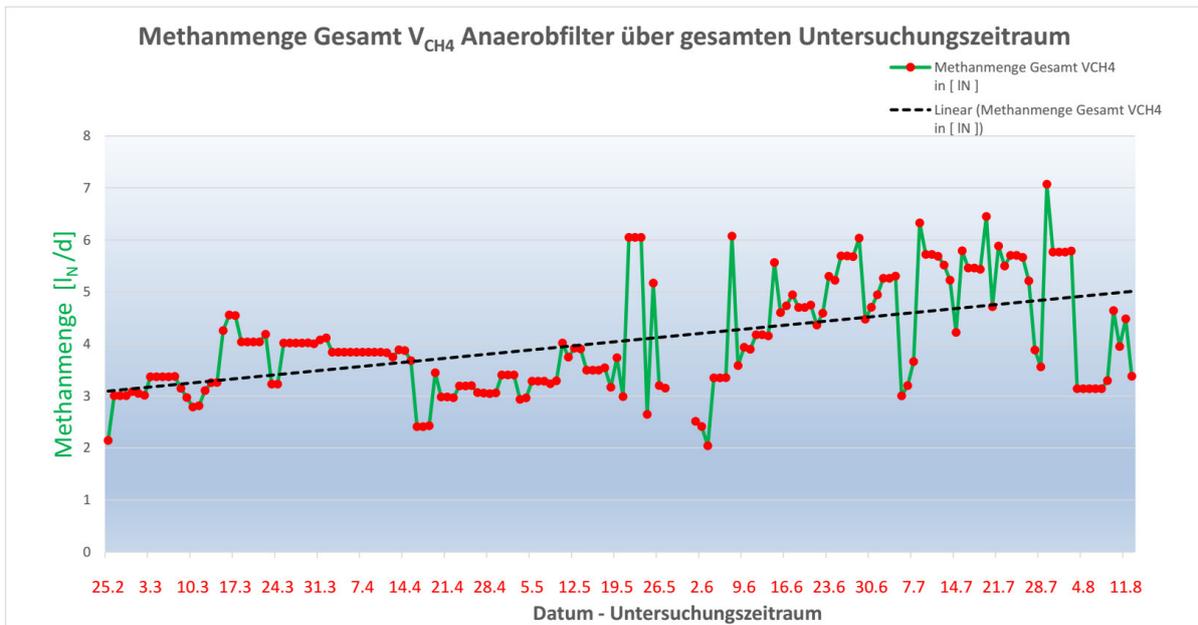


Abbildung 4.3.1: Methanmenge im Anaerobfilter

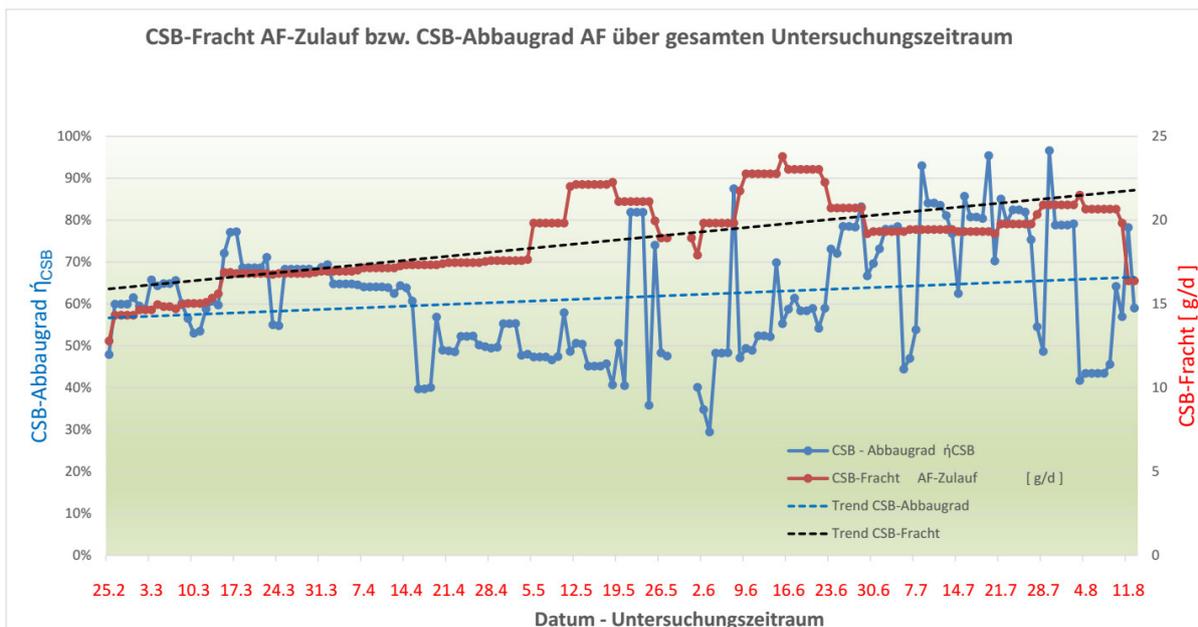


Abbildung 4.3.2: CSB-Fracht und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter

Im gesamten Untersuchungszeitraum lassen sich aus den Abbildungen 4.3.1 und 4.3.2 vier unterschiedliche Zeiträume mit unterschiedlicher Charakteristik erkennen:

- *Anfang März bis Mitte April* eine mittlere Methanmenge korrespondierend mit einem mittleren CSB-Abbaugrad von 55 – 70%,
- dann von *Mitte April bis Mitte Mai* ein geringer CSB-Abbaugrad von 45 – 50%, danach ein sehr starker Anstieg auf 75 – 80%, für einige Tage unterbrochen von einer Phase mit Luftertrag und Absinken auf 30 – 40% in der letzten Maiwoche,
- darauf folgend von *Anfang Juni bis Ende Juni* ein Anstieg bis auf 75%
- und dann den *ganzen Juli* auf einem Niveau von 75 – 80% mit Ausreißern nach oben und unten.

Die Störungen im Abbauverlauf bzw. schwache Abbauphasen lassen sich gut über die Verläufe der Temperatur, des Sauerstoffgehalts und der Wasserstoffkonzentrationen im AF, jeweils im Vergleich zur Ganglinie des Abbaugrades (vgl. Abbildungen 4.3.3 bis 4.3.5), erklären. Das Absenken der Temperatur im AF von über 25°C auf 20° – 22°C bewirkt das Absenken des CSB-Abbaugrades und im Gegenzug steigt danach der Abbaugrad wieder kontinuierlich mit einer Temperaturerhöhung auf 25°C wieder an.

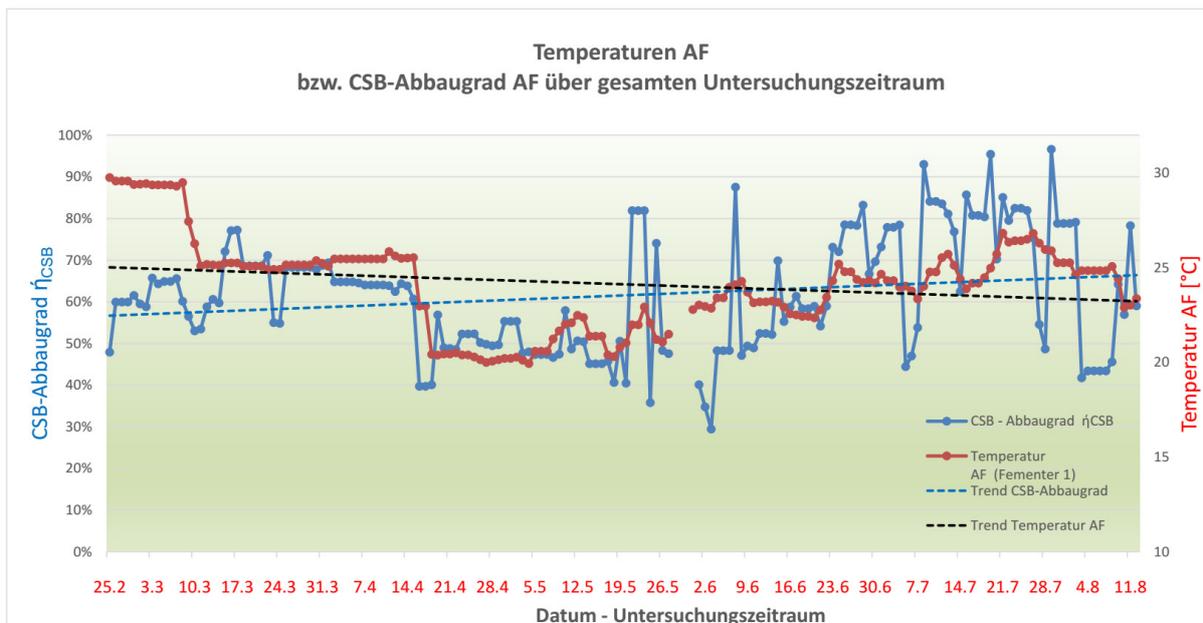


Abbildung 4.3.3: Temperaturen und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter

Der oben erwähnte Luftertrag lässt sich sehr gut an der Spitze des Sauerstoffgehalts ablesen. Durch höhere Wasserstoffkonzentrationen über 1000 ppm kommt es punktuell zum Absinken des CSB-Abbaugrades, Anfang August über mehrere Tage (Störung der acetogenen Phase)

Insgesamt ist ein leicht ansteigender Trend des CSB-Abbaugrades im Verlauf des Untersuchungszeitraums abzulesen, d.h. die Anlage ist langsam eingefahren und die Biozönose funktioniert immer besser.

Wenn die Phase im April mit schlechten Abbaugraden und die kurze Phase mit Luftertrag Ende Mai nicht gewesen wäre, hätte ein wesentlich höherer mittlerer Abbaugrad erreicht werden können. Durch den Luftertrag wurde das anaerobe Milieu offenbar massiv gestört, wobei

im April die Störung von der Biozönose wesentlich schlechter verkraftet wurde als der Luftertrag von Ende Mai.

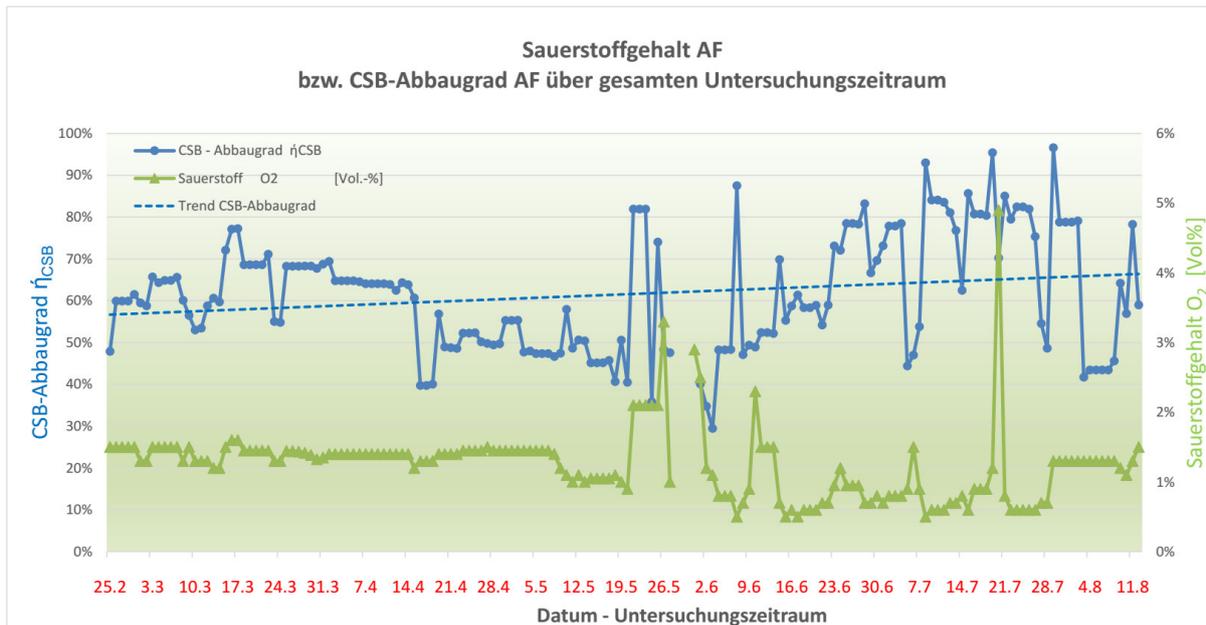


Abbildung 4.3.4: Sauerstoffgehalt und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter

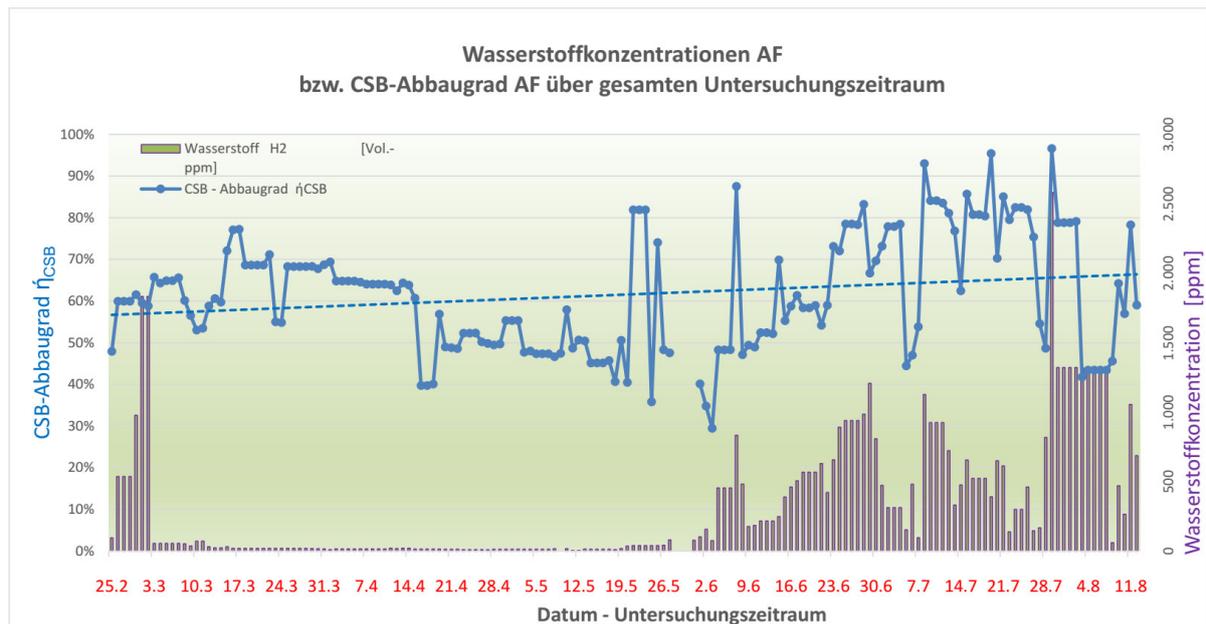


Abbildung 4.3.5: Wasserstoffkonzentration und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter

Auffallend ist auch, dass der Anstieg des CSB-Abbaugrades mit dem Anstieg der CSB-Fracht einhergeht; insbesondere 2 bis 3 Wochen vor den hohen Niveaus des CSB-Abbaugrades Mitte / Ende Mai und Mitte / Ende Juni sind sehr hohe CSB-Frachten festzustellen. Dadurch wird deutlich, dass eine Versorgung der Biozönose mit mehr organischem Substrat zu einer größeren Abbauleistung führt. Dies wird auch bei Betrachtung der CSB-Raubelastung (vgl. Abbildung 4.3.6) deutlich, die im Prinzip eine Normierung der CSB-Fracht auf das Arbeitsvolumen darstellt.

Der gegenläufige Trend der Verweilzeiten (vgl. Abbildung 4.3.7) in Richtung < 1 d hat die gleiche Aussage.

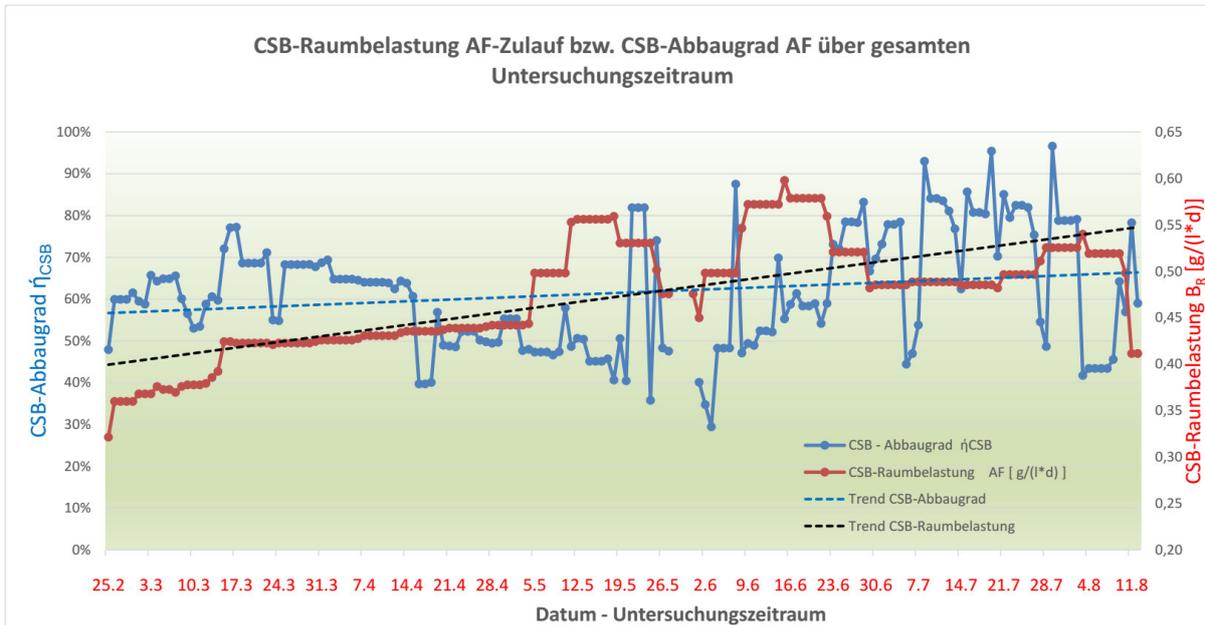


Abbildung 4.3.6: CSB-Raumbelastung und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter

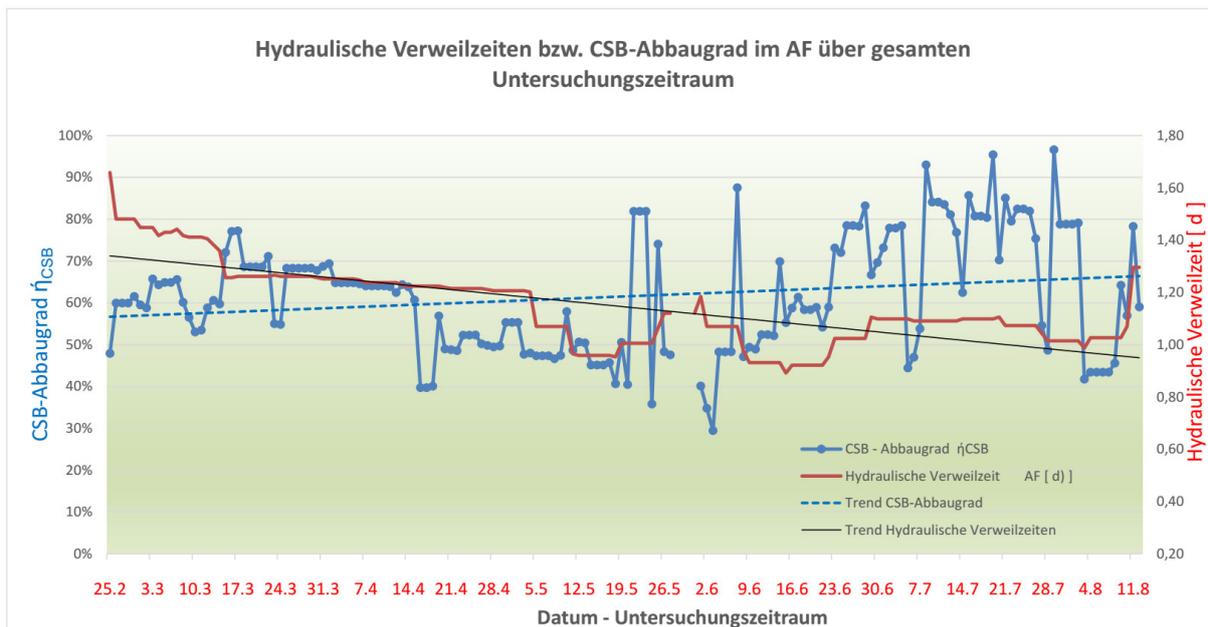


Abbildung 4.3.7: Hydraulische Verweilzeiten und CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter

Wenn die Störungen durch Sauerstoffeintrag und Temperaturschwankungen verhindert werden können, kann mit zunehmender Einarbeitungszeit der Biozönose eine größere Raumbelastung gefahren werden mit verbessertem CSB-Abbaugrad.

4.4. Abbauvorgänge in Belebtschlammanlage

Um die Abbauvorgänge in der Belebtschlammanlage besser analysieren zu können, erfolgte für jede vollständige Messreihe eine Profildarstellung des Abbauperlaufes durch die einzelnen Anlagenteile mit den jeweiligen Probenahmestellen für die CSB- und Stickstoffkonzentration (vgl. Abbildung 4.4.1) und die CSB- bzw. Stickstofffrachten.

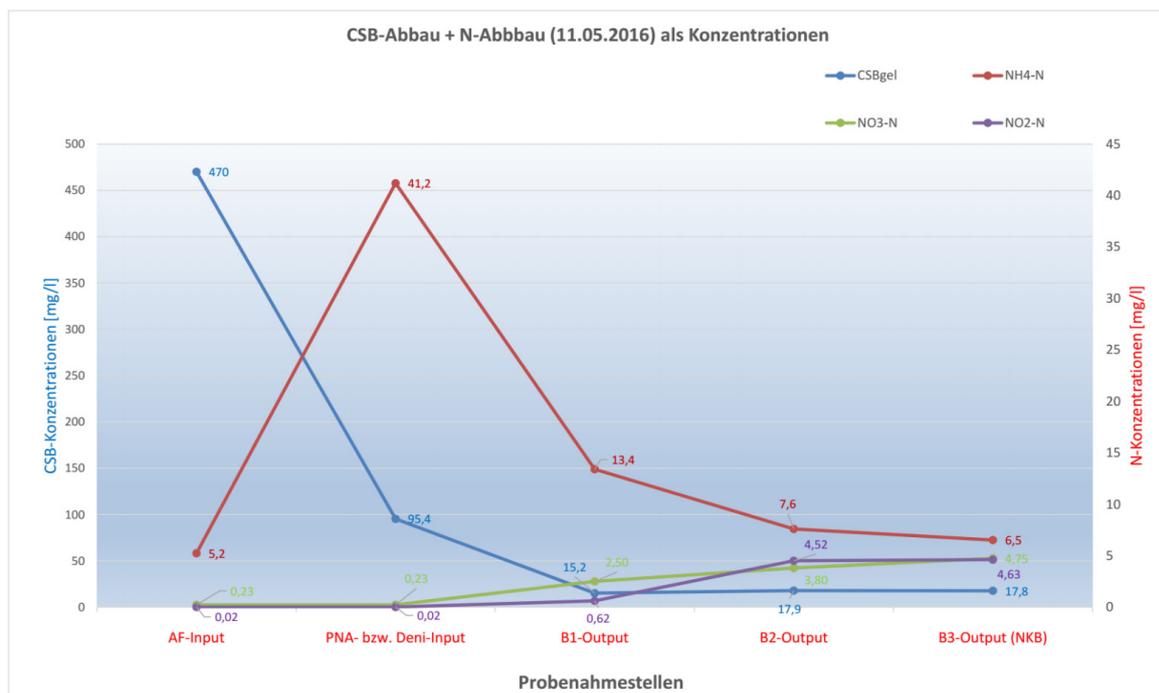
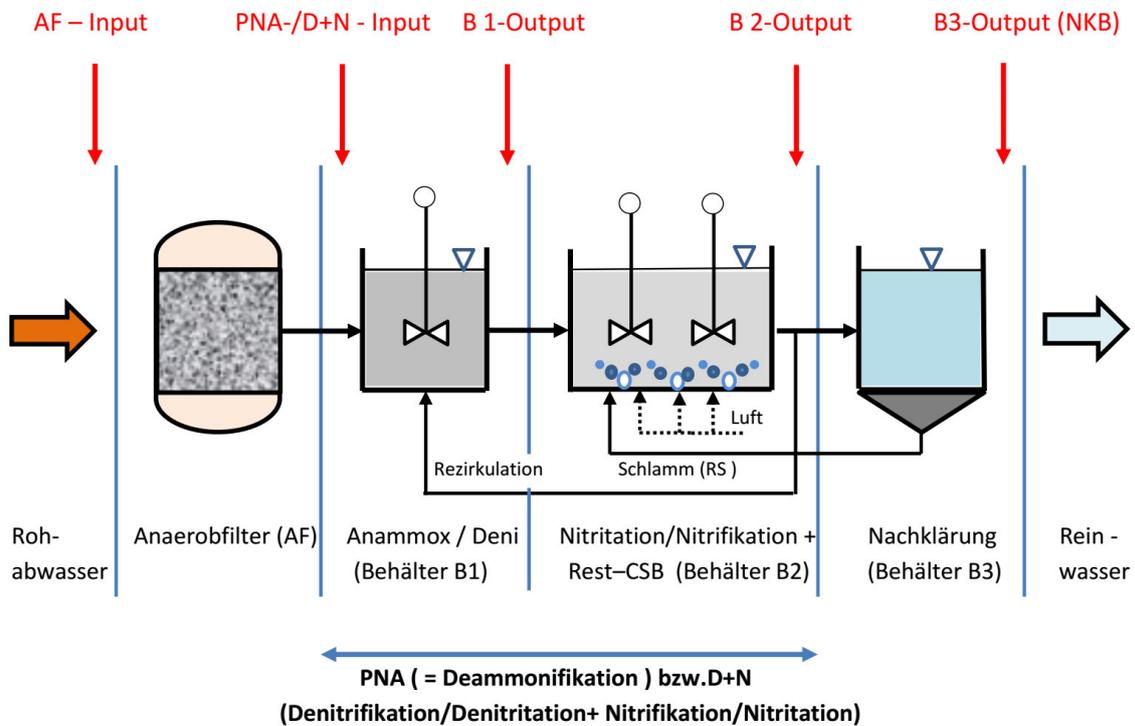


Abbildung 4.4.1: Verfahrensfließbild mit Messstellen und Abbauperlauf

Bei den vollständigen Messreihen werden für alle Probenahmestellen alle Parameter CSB, NH₄-N, NO₃-N und NO₂-N gemessen. Bei der Messreihe vom 25.05.2016 fehlte lediglich die CSB-Zulaufkonzentration des Anaerobfilters (AF-Input), diese wurde ergänzt durch den Mittelwert (arithmetisches Mittel) von allen gemessenen Zulaufwerten (CSB = 533 mg/l).

Zunächst werden die Konzentrationsverläufe analysiert und in einem zweiten Schritt die Frachtverläufe, woraus besser aufgezeigt werden kann, wo und welche biologischen Abbauprozesse stattgefunden haben bzw. welche Substratverhältnisse vorliegen. Die Auswertungen aller Messreihen befinden sich im Anhang (Anlage A VI), im Folgenden wird auf besonders prägnante, aussagekräftige Messungen bzw. auf Mittelwerte eingegangen.

4.4.1. Verläufe der Konzentrationen

Zunächst werden die Mittelwerte der Versuchsreihen D bis F betrachtet (vgl. Abbildung 4.4.2).

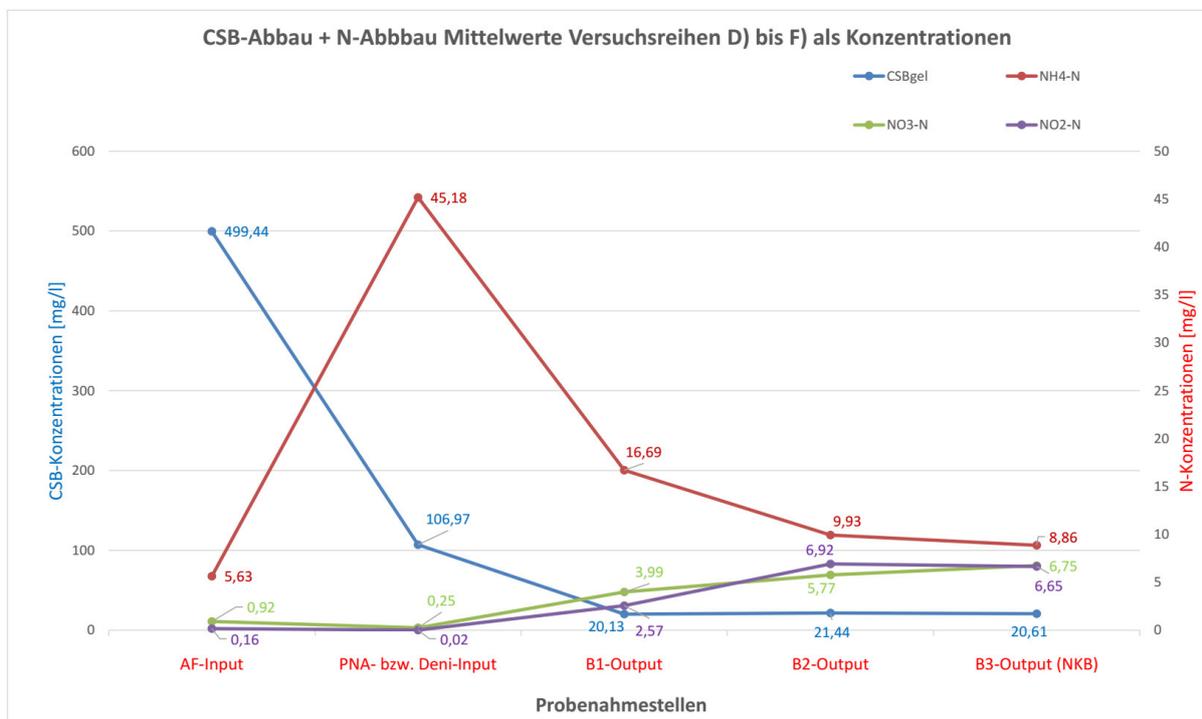


Abbildung 4.4.2: Mittelwerte CSB- und N-Konzentrationen als Verlauf in den Anlagenteilen

Im anaeroben Behälter B1 erfolgt ein starker Rückgang der CSB-Konzentrationen von rd. 110 mg/l auf rd. 20 mg/l, wodurch schon der CSB-Einleitewert eingehalten werden kann.

Die Konzentrationen des Ammoniumstickstoffs werden in der Belebtschlammanlage bis unter den geforderten Einleitewert reduziert. In welchem Behälter und aufgrund welches Stickstoffeliminierungsverfahrens dies geschah, zeigt sich an den Ablaufwerten des Nitratstickstoffes (NO₃-N) und des Nitritstickstoffes (NO₂-N).

Offensichtlich erfolgte im Mittel über alle Versuche der Versuchsreihen D bis F eine genauso starke Nitrifikation wie Nitritation im aeroben Milieu des belüfteten Behälters B2.

Die Elimination des Gesamtstickstoffes, d.h. vor allem des Nitrit- und Nitratstickstoffes, verlief im Mittel nicht wie anwünscht, was sich in den relativ hohen Ablaufwerten von fast 7 mg/l Nitratstickstoff und fast 7 mg/l Nitritstickstoff zeigt.

Die in Frage kommenden Verfahren Denitrifikation, Denitritation bzw. Anammox scheinen im Mittel über die Versuchsreihen D – F nur bedingt funktioniert zu haben.

Als Vergleich hierzu ist in Abbildung 4.4.3 der Verlauf des Messtages mit den besten Ergebnissen (Probenahme vom 25.05.2016) hinsichtlich der Stickstoffelimination gegenübergestellt. Hier erfolgt eine deutlich stärkere Reduktion des Ammoniumstickstoffs als im Mittel und vor allem zeigen sich im Ablauf wesentlich niedrigere Nitratstickstoff- und Nitritstickstoff-Konzentrationen mit rd. 2 bzw. 3 mg/l. Dies bedeutet, dass sowohl eine gute Nitrifikation bzw. eine gute Nitritation stattgefunden hat, als auch eine gute, weitergehende Stickstoffelimination durch Denitrifikation bzw. Denitritation.

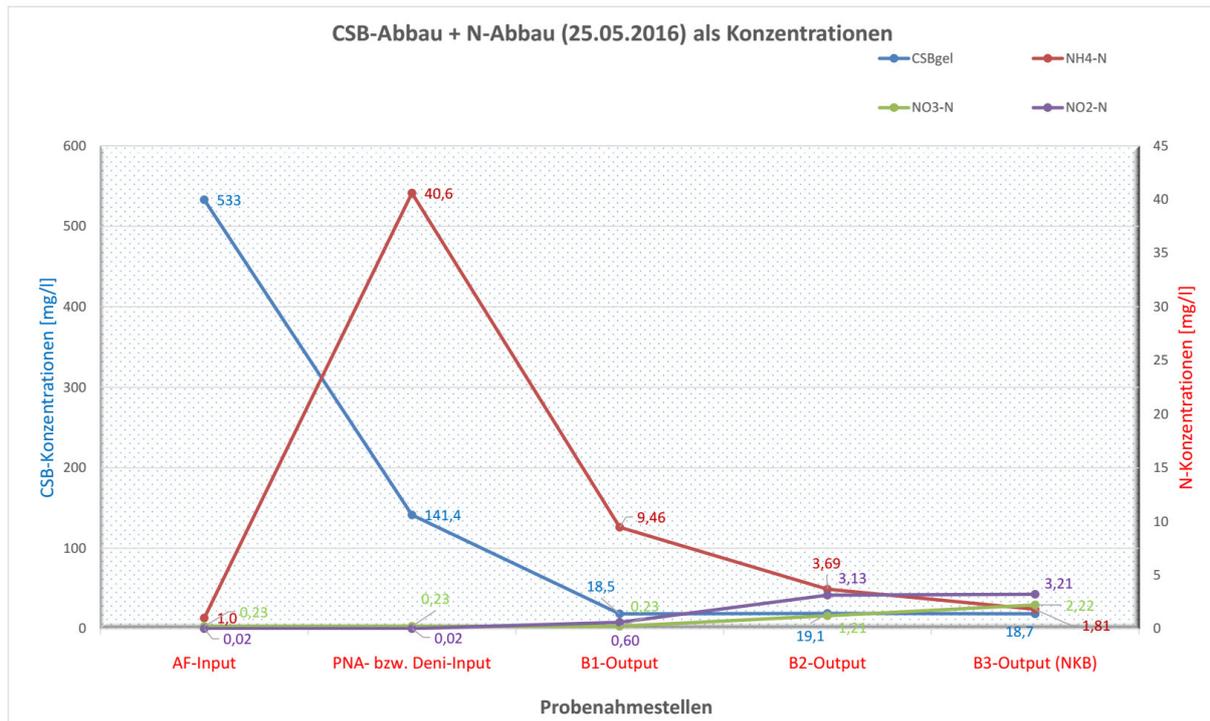


Abbildung 4.4.3 „Bestwerte“ CSB- und N-Konzentrationen als Verlauf in den Anlagen teilen (25.05.2016)

Die Gesamtentwicklung der Abbauvorgänge und Ablaufkonzentrationen (vgl. Anhang, Anlage VI) lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Versuchsreihe A:

Die Belebtschlammanlage wird zunächst ohne Vorbehandlung durch den AF betrieben und liefert sehr gute Ablaufwerte für CSB, NH₄-N und N_{ges}. Gründe hierfür sind die geringe Beschickung mit 0,51 l/h, was zu großen Verweilzeiten führt, eine sehr gute Sauerstoffversorgung und ein großes Angebot an organischem Material (CSB).

Durch die hohen Rezirkulationsverhältnisse (RV + RS = 6 bis 7) kann ein großer Rückhalt der Biomasse im System erzielt werden und das Schlammalter kann an die langsame Wachstumsgeschwindigkeit von AOB, NOB und AnAOB angepasst bzw. Belebtschlamm und Substrat können in großer Menge zurückgeführt werden, mit Verbesserung der Substratverhältnisse (z.B. CSB / NO₃-N). Da in dieser Phase noch keine intermittierende Belüftung durchgeführt wurde, kann mit den in AL-MEMO angegebenen Stichprobenwerten ein mittlerer Sauerstoffgehalt

von > 6 mg/l berechnet werden. Dieser Wert liegt weit über den in Belebungsbecken angestrebten Konzentrationen.

Versuchsreihe B: Bei der inzwischen gekoppelten Anlage, mit einer über doppelt so hohen Beschickung und geringeren Rezirkulationsverhältnissen ($RV + RS = 4 - 5$), werden aufgrund einer immer noch guten Sauerstoffversorgung (Belüftungskonzept 1) sehr gute Ablaufwerte für NH_4-N durch Nitrifikation erzielt. Aufgrund des geringen Angebotes an organischer Substanz und geringerer Verweilzeiten wird die Entfernung des Gesamtstickstoffs immer schlechter.

Versuchsreihe C: Die Beschickung wird leicht erhöht auf ca. 1,2 – 1,3 l/h bei gleichzeitiger Reduzierung der Rezirkulationsverhältnisse ($RV + RS = 3$). Die Sauerstoffversorgung wird reduziert, jedoch führt das ab dem 08.03.2016, 11:25 Uhr eingesetzte Belüftungskonzept 2 erst ab dem 17.03.2016 (Versuchsreihe D) zu einer starken Reduzierung des Sauerstoffgehalts im Behälter B2 (vgl. Abbildung 4.4.6) Dadurch bleibt es weiter bei einer guten Nitrifikation mit sehr niedrigen NH_4-N -Ablaufwerten. Die Entfernung des Gesamtstickstoffes liegt aufgrund der zu geringen Kohlenstoffversorgung und der niedrigeren Verweilzeiten auf vergleichbarem Niveau wie in Versuchsreihe B.

Versuchsreihe D: Die Beschickung und die Rezirkulationsverhältnisse bleiben auf ähnlichem Niveau wie in Versuchsreihe C, nämlich ca. 1,35 l/h ($RV + RS = 3 - 3,5$). Das Belüftungskonzept 2 führt zu einer Hemmung der Nitratation und Verstärkung der Nitritation. Die Entfernung des Gesamtstickstoffes liegt auf vergleichbarem Niveau wie in Versuchsreihe C. Eine Nitratanreicherung hat eingesetzt, die Nitrationshemmung ist allerdings nicht vollständig erfolgt.

Versuchsreihe E: Die Beschickung wird auf ca. 1,5 bis 1,75 l/h erhöht, die Rezirkulationsverhältnisse werden stark erhöht ($RV + RS = \text{ca. } 6 - 8,5$). Eine Nitratanreicherung funktioniert zum Teil, dagegen noch keine vollständige Nitrationshemmung (Belüftungskonzept 2). Im Vergleich zur Versuchsreihe D wird aber durch die größeren Rezirkulationsverhältnisse eine bessere Substratversorgung für die denitrifizierenden bzw. denitrierenden Mikroorganismen bewirkt, sowie ein größerer Biomassenrückhalt von AOB, NOB und AnAOB im System erzielt.

Versuchsreihen F und G: Die Messungen dieser Versuchsreihen bringen keine weiteren Erkenntnisse bis auf die Messung vom 20.07.2016 mit einer Beschickung von ca. 1,5 l/h und Rezirkulationsverhältnissen von $RV + RS = \text{ca. } 6,5$. Hier werden unter Berücksichtigung eines höheren NH_4-N -Ausgangsniveaus im Vergleich zu Versuchsreihe E relativ gute Ablaufwerte mit $N_{\text{ges}} = 21,8 \text{ mg/l}$ und $NH_4-N = 3,5 \text{ mg/l}$ erreicht.

Welches Eliminationsverfahren für die Abbauvorgänge der weitergehenden Stickstoffelimination verantwortlich war, wird über die Betrachtung der Frachten, vgl. Kapitel 4.4.2, beurteilt. Hier wird die gesamte Versuchsreihe E, die die besten Ergebnisse lieferte, nochmals im Detail analysiert.

Mit der Versuchsreihe E werden auch die Probenahmetage 27.04.2016 (aus Versuchsreihe D) und 22.06.2016 (aus Versuchsreihe F) verglichen, siehe dazu Abbildungen 4.4.4 und 4.4.5. Die Ergebnisse für den Probenahmetag 27.04. sind qualitativ ähnlich zu den besten Ergebnissen vom 25.05. (s.o.), allerdings bei allen Stickstoffwerten auf einem höheren Niveau, wodurch die Einleitewerte nicht eingehalten werden. Die Ursache hierfür ist voraussichtlich die niedrigere Rezirkulation von Behälter B2 in Behälter B1, vgl. Abbildung 4.4.2.

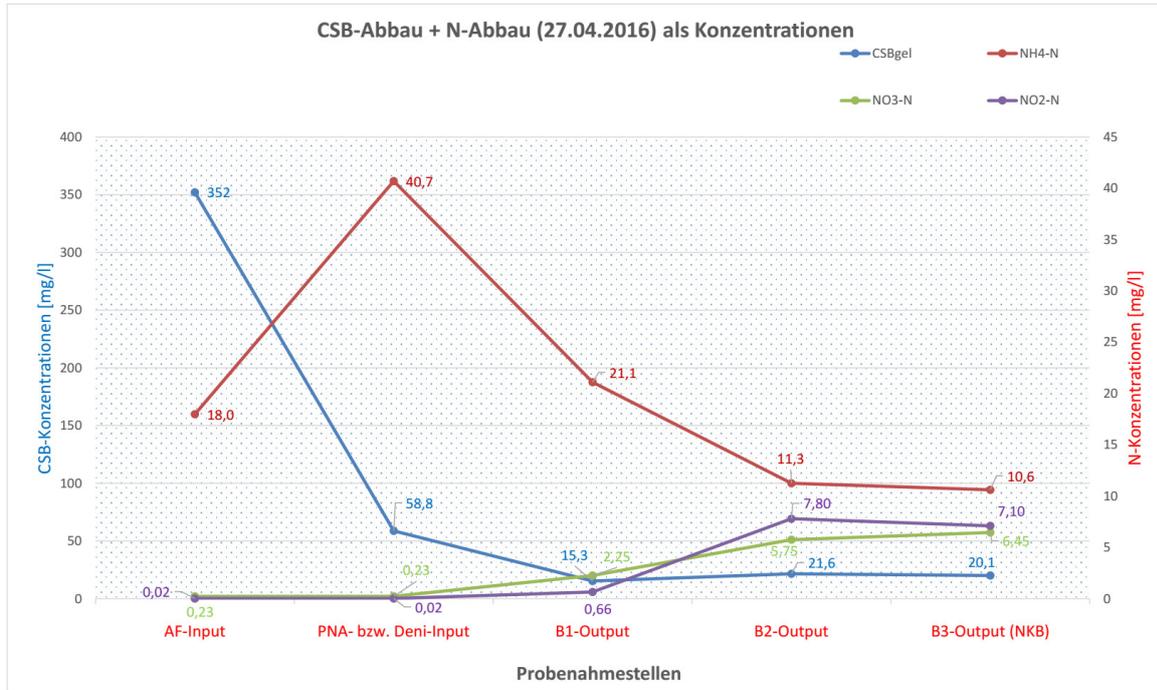


Abbildung 4.4.4 CSB- und N-Konz. als Verlauf in den Anlagenteilen (27.04.2016)

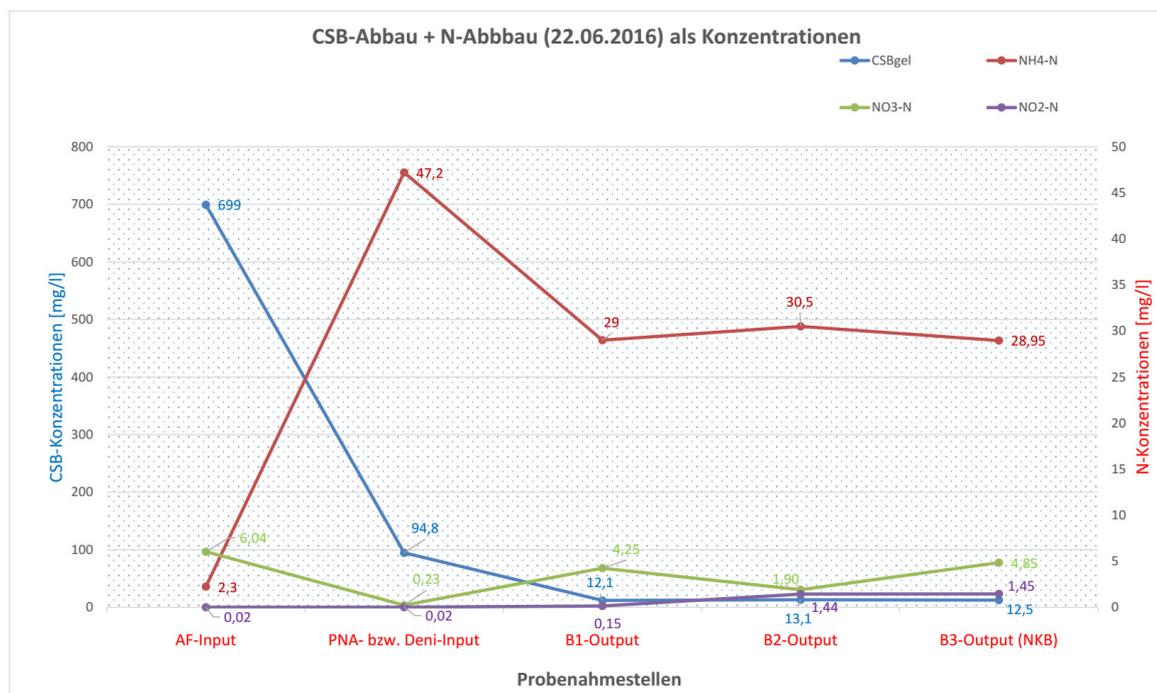


Abbildung 4.4.5 CSB- und N-Konz. als Verlauf in den Anlagenteilen (22.06.2016)

Am Probenahmetag 22.06. hat offensichtlich weder die Nitrifikation noch die Nitrifikation gut funktioniert, was sich im hohen Ammoniumstickstoffablaufwert und den niedrigen Nitrat-/ Nitritstickstoffablaufwerten zeigt. Eine mögliche Erklärung ist der Ausfall bzw. eine Störung der Belüftung von 0:00 bis ca. 10:00 Uhr in Kombination mit einer Probenahme am Morgen. (vgl. Anhang A VI „ALMEMO-Auswertung“). Da für diesen Tag nur ein Wert pro Stunde,- allerdings jeweils zur gleichen Minute und Sekunde -, vorliegt, kann die Angabe von 0,0 mg/l O₂ ein Zufall sein. Aufgrund der Ergebnisse kann von einer Störung der Belüftung ausgegangen werden. Störungsursache könnte eine Verschmutzung der O₂-Sonde gewesen sein.

4.4.2. Verläufe der Frachten

Die Frachten werden wie folgt ermittelt, beispielhaft für Ammoniumstickstoff (NH₄-N) an der Probenahmestelle „B2-Input“

Allgemein:

Formel 21

$$B_{h, \text{NH}_4\text{-N, B2in}} = Q_{\text{Zu, PNA/D+N}} * (1 + \text{RV}) * S_{\text{NH}_4\text{-N, B1out}} + Q_{\text{Zu, PNA/D+N}} * S_{\text{NH}_4\text{-N, B3out}}$$

mit:

- B_{h, NH₄-N, B2in} = stündliche Zulaufmengen Ammoniumstickstoff in mg/h an „B2-Input“
- Q_{Zu, PNA/D+N} = stündl. Zulaufabwassermenge zur Belebtschlammanlage (PNA/ D+N) in l/h
- RV = Rücklaufverhältnis (Rezirkulation von B2 in B1)
- RS = Rücklaufschlammverhältnis (Rezirkulation von B3 in B2)
- S_{NH₄-N, B1out} = Konzentration Ammoniumstickstoff im Auslauf B1 („B1-Output“)
- S_{NH₄-N, B3out} = Konzentration Ammoniumstickstoff im Auslauf B3 („B3-Output“)

Beispiel 25.05.2016, „B2-Input“:

$$B_{h, \text{NH}_4\text{-N, B2in}} = 1,56 \text{ l/h} * (1 + 7,44) * 9,5 \text{ mg/l} + 1,56 \text{ l/h} * 1,03 * 1,8 \text{ mg/l} \cong 128 \text{ mg/l}$$

Die Abbauvorgänge in den Behältern B1 und B2 lassen sich anhand des Verlaufes der Frachten (Abnahme, Zunahme, gleiches Niveau) zwischen den Probenahmestellen „B2-Input“ und „B1-Output“ (Behälter B1) und zwischen den Probenahmestellen „B2-Input“ und „B3-Output“ (Behälter B2) beschreiben.

Auf die Bildung von mittleren Verlaufskurven der Frachten wurde verzichtet, da die Versuchsverhältnisse auch innerhalb der Versuchsreihen mit ähnlicher Charakteristik, z.B. durch unterschiedliche Rezirkulationsverhältnisse (RV, RS), geändertes Belüftungskonzept bzw. Störungen bei der Belüftung doch stark voneinander abweichen.

Daher wurde zunächst das Hauptaugenmerk auf die Versuchsreihe E gelegt, die die besten Ablaufwerte lieferte. Darüber hinaus werden die Messungen der Versuchsreihe D unmittelbar vor der Versuchsreihe E betrachtet, um die Entwicklung bzw. Unterschiede zu erläutern.

● Versuchsreihe E, Messung 25.05.2016

Die Versuchseinstellungen können aus Tabelle 4.4.1 abgelesen werden, der Frachtverlauf aus Abbildung 4.4.6.

| Abwassermengen Q [l/h] | | Rezirkulationen [-] | | Substratverhältnisse (Verhältnis der Frachten) | | | | | Substratverhältnisse (Verhältnis der Konzentrationen) | | Stickstoff- Ablaufwerte [mg/l] | | |
|---------------------------|--------------------------|---------------------|----------------|--|---|-----------------------------------|---|---|--|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Probenstag | Q _{Zul,PNA/D+N} | RV (B2->B1) | RS (B3->B2) | Zulauf Behälter B1 ("B1-Input") | | | Behälter B2 ("B2-Input" u. "B2-Output gemittelt") | | | Ablauf Behälter B2 ("B2-Output") | | NH ₄ -N | N _{ges.} |
| | | | | CSB / NH ₄ -N | CSB / (NO ₃ -N+NO ₂ -N) | NO ₂ / NH ₄ | CSB / NH ₄ -N | CSB / (NO ₃ -N+NO ₂ -N) | NO ₂ / NH ₄ | NO ₂ / NH ₄ | | | |
| | | | | 1,4 | | 1,3 | 1,4 | | 1,3 | 1,3 | | | |
| Versuchsreihe D): | | | | | | | | | | | | | |
| 30.03.2016 | 1,32 | 2,14 | 1,18 | 2,12 | 5,79 | 0,43 | 1,3 | 2,1 | 0,68 | 1,34 | 12 | 25 | |
| 13.04.2016 | 1,35 | 1,93 | 1,34 | 3,02 | 2,28 | 2,20 | 5,9 | 1,3 | 0,10 | 50,90 | 1 | 30,5 | |
| 27.04.2016 | 1,37 | 1,88 | 1,25 | 1,61 | 3,87 | 0,60 | 1,3 | 1,9 | 0,90 | 1,75 | 11 | 24 | |
| Versuchsreihe E): | | | | | | | | | | | | | |
| 11.05.2016 | 1,72 | 5,35 | 0,83 | 2,33 | 4,27 | 0,75 | 1,7 | 2,7 | 0,70 | 1,50 | 6,5 | 16 | |
| 25.05.2016 | 1,56 | 7,44 | 1,03 | 4,17 | 8,72 | 0,86 | 3,1 | 6,6 | 0,82 | 2,14 | 1,8 | 7,2 | |
| 08.06.2016 | 1,70 | 7,40 | 0,36 | 1,76 | 5,43 | 0,07 | 2,3 | 5,4 | 0,05 | 0,13 | 4,6 | 10,3 | |
| Versuchsreihe F): | | | | | | | | | | | | | |
| 22.06.2016 | 1,74 | 7,93 | 0,40 | 0,69 | 7,42 | 0,10 | 0,4 | 3,2 | 0,07 | 0,12 | 29 | 35 | |
| 20.07.2016 | 1,50 | 6,01 | 0,37 | 5,20 | 3,71 | 1,74 | 3,1 | 1,7 | 2,08 | 4,84 | 3,5 | 21,8 | |

Tabelle 4.4.1: Versuchseinstellungen und Substratverhältnisse ausgewählter Probenahmetage

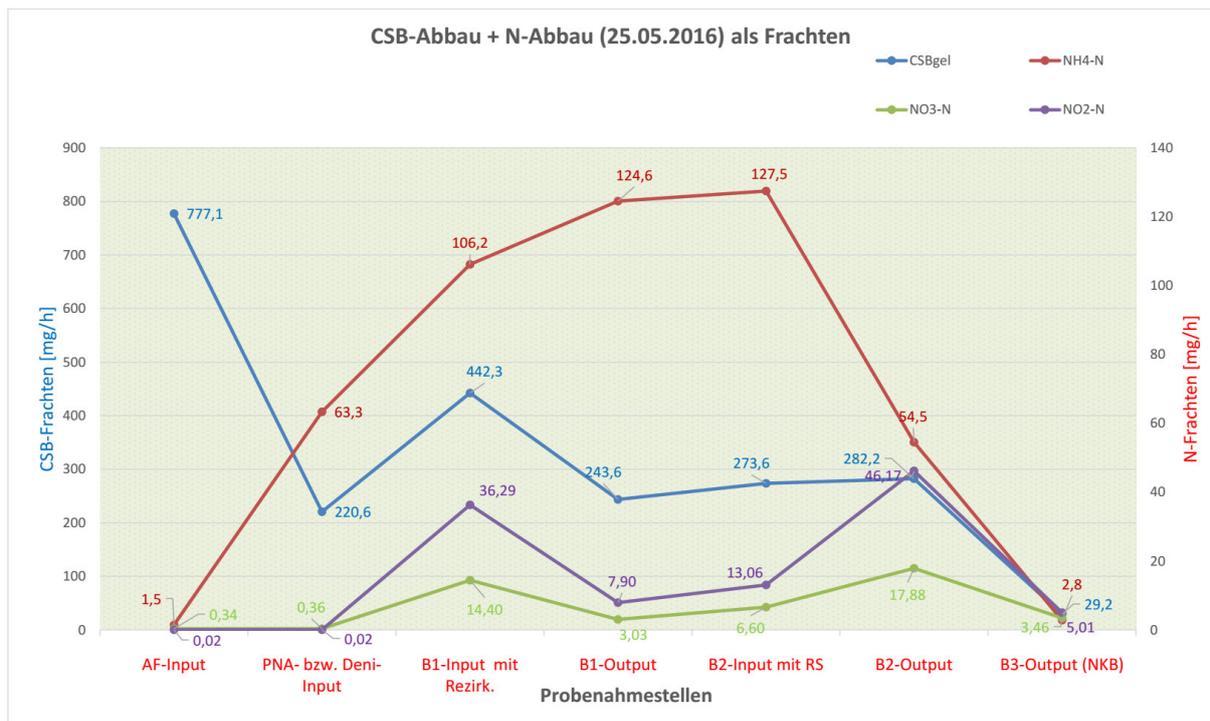


Abbildung 4.4.6 CSB- und N-Frachten als Verlauf in den Anlagenteilen (25.05.2016)

Im Behälter B1 kommt es zu einer leichten Erhöhung der Ammoniumstickstofffracht. Dies liegt in der Ammonifikation des organischen Stickstoffs zu Ammoniumstickstoff im anaeroben Milieu begründet.

Anammox ist nicht abgelaufen, da es zu keiner Reduzierung der NH_4 -Frachten kommt. Die in Kapitel 2.2.2 angegebenen Parameterabhängigkeiten der Anammoxbakterien werden zwar für den pH-Wert, die Temperatur und den O_2 -Gehalt (anaerobe Verhältnisse, keine Belüftung) eingehalten. Auch kommt es zu keinen Hemmungen durch eine zu hohe Nitritkonzentration, die mit ca. 9 mg/l deutlich unter dem kritischen Bereich von > 30 mg/l liegt. Mit Hemmungen durch die Bildung von Ammoniak oder salpetriger Säure ist aufgrund des pH-Wertes von 7,16 nicht zu rechnen.

Allerdings überschreitet das Substratverhältnis CSB / NH_4 -N mit 4,17 (vgl. Tabelle 4.4.1) das von [JENNI/JENNI / 2014] festgestellte CSB / NH_4 -N – Verhältnis von 1,4 bei dem Anammoxbakterien mit heterotropher Biomasse bei ausreichend hohem Schlammalter coexistieren können.

Das NO_2 / NH_4 – Verhältnis mit 0,86 ist ebenfalls im Vergleich zum Idealverhältnis von 1,32 nicht optimal; es herrscht Ammoniumüberschuss, der zum Einbruch der Umsatzleistung des Anammox-Prozesses führen kann.

Vor allem die Konkurrenzsituation zur denitrifizierenden bzw. denitrierenden Biomasse bei zu hohen Gehalten an biologisch abbaubarem CSB [SCHÄPERS et al. / 2016] verhindert Anammox bzw. schränkt es stark ein.

Aufgrund der großen Verfügbarkeit von gelöstem abbaubarem CSB, vgl. Substratverhältnisse CSB / NO_3 -N bzw. CSB / NO_2 -N, werden die langsam wachsenden Anammox-Bakterien von der denitrifizierenden bzw. denitrierenden Biomasse verdrängt.

Dies ist auch im Abbauverlauf von CSB, NO_3 -N und NO_2 -N im Behälter B1 eindeutig zu erkennen. Alle 3 Parameter werden sehr gut in B1 abgebaut, der CSB zu über 50% und NO_3 -N bzw. NO_2 -N zu ca. 80%. Dabei ist der NO_2 -N-Abbau für die absolute Fracht gesehen wesentlich stärker, da im Behälter B2 mehr Nitritstickstoff als Nitratstickstoff gebildet wird, der in B1 zurückgeführt wird.

Es kann somit überwiegend von einer Denitrifikation als Abbauprozess und z.T. von einer Denitrifikation im Behälter B1 ausgegangen werden.

Im Behälter B2 findet der Abbau des Ammoniumstickstoffs durch Nitrifikation (grüne Linie) und Nitritation (magenta Linie) statt mit Zunahme des Nitrat- bzw. Nitritstickstoffs, wobei die Nitritation wesentlich stärker ist.

Das Ziel der Nitritanreicherung durch das Belüftungskonzept wird erreicht, jedoch kann die Nitratation nicht vollständig unterdrückt werden.

Zur verbesserten Denitrifikation bzw. zur Ermöglichung von Anammox besteht hier noch Optimierungsbedarf, z.B. durch noch längere Belüftungspausen.

Die Betrachtung der Stickstoffbilanz für den Behälter B2 zeigt eine Differenz zwischen abgebautem Ammoniumstickstoff NH_4 -N und gebildetem NO_3 -N und NO_2 -N von 29,1 mg/l (vgl. Tabelle 4.4.2, S.79)

Es wird mehr Ammoniumstickstoff abgebaut als Nitrit- und Nitratstickstoff gebildet. Für diese nicht unerhebliche Differenz gibt es folgende Erklärungsansätze:

1. Bildung von NO_2 (Lachgas) und NO bei unvollständiger Umsetzung der Ammoniumoxidation
2. Einbau in Bakterienmasse
3. Denitrifikation in anaeroben Phasen, vgl. Kap. 3.3.3 „Belüftungskonzepte“

4. Denitrifikation in anaeroben Phasen, vgl. Kap.3.3.3 „Belüftungskonzepte“
5. Anammox in anaeroben Phasen

Mit den Prozessen (1) und (2) ist auf jeden Fall zu rechnen. Die Bildung von Lachgas hätte durch parallele Messungen abgeschätzt werden können, was allerdings nicht durchgeführt wurde. Der Einbau der Bakterienmasse kann [HARTMANN, 1992] bis zu 20% betragen, was im vorliegenden Fall aufgrund der geringen Schlammproduktion zu hoch gegriffen ist.

In den anaeroben Phasen im Behälter B2, die aufgrund der intermittierenden Belüftung (vgl. Kap. 3.3.3) wegen der starken O₂-Zehrung voraussichtlich über 40% der Zeitdauer vorgelegen haben, ist eine Denitrifikation bzw. Denitrifikation möglich.

Die mittleren Substratverhältnisse im Behälter B2 (s.o.) mit ≥ 5 zeigen, dass auch im Behälter B2 eine große Verfügbarkeit von organischer Substanz, ausgedrückt durch den CSB, vorliegt. Somit kann auch im Behälter B2 schon eine Umwandlung in elementaren Stickstoff, der in die Atmosphäre entweicht, erfolgen. Dass Anammox stattgefunden hat, wäre auch hier analog zum Behälter B1 nach den vorhandenen Parametern Temperatur mit ca. 25°C, pH-Wert 7,58 und keine hemmenden Konzentrationen von Nitrit, Ammoniak und salpetriger Säure theoretisch möglich, jedoch ist der Gehalt von CSB so hoch, dass es wahrscheinlicher ist, dass sich in den anaeroben Phasen eher denitrifizierende bzw. denitrifizierende Bakterien als Anammoxbakterien gebildet haben.

Inwieweit die Prozesse Denitrifikation, Denitrifikation oder Anammox in den Behältern B1 und B2 eine Rolle gespielt haben, hätte mit Hilfe der Gensondentechnologie zur Identifizierung und Quantifizierung von Bakterienarten (nitrifizierende-, denitrifizierende-, Anammox – Populationen) untersucht werden können. [vgl. SNAIDR J.; 2016] Auf diese Untersuchung musste aus Kostengründen verzichtet werden.

● Versuchsreihe E, Messung 11.05.2016

Die Versuchseinstellungen (vgl. Abbildung 4.4.7 bzw. Tabelle 4.4.1) sind vergleichbar mit denen vom 25.05.2016; die Unterschiede liegen in der höheren Zulaufwassermenge $Q_{Zul.} = 1,72$ l/h und den niedrigeren Rezirkulationsverhältnissen $RV = 5,35$ und $RS = 0,83$.

Die Ablaufwerte befinden sich auf einem doppelt so hohen Niveau bei $N_{ges.}$ und einem dreifachen Niveau beim NH_4-N im Vergleich zur Messung am 25.05., wobei die Einleitewerte nach deutschem Recht immer noch eingehalten werden.

Die Substratverhältnisse sind aus Tabelle 4.4.1 ersichtlich.
Der Abbau zeigt qualitativ einen ähnlichen Verlauf wie der vom 25.05.2016.

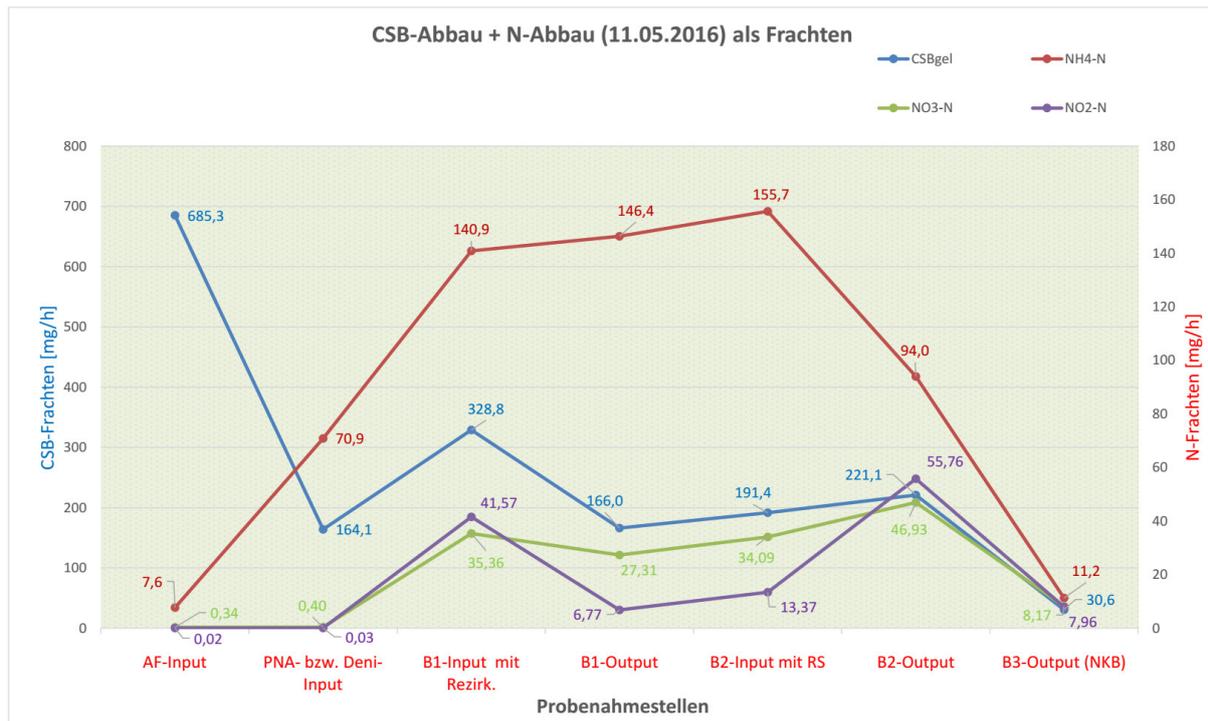


Abbildung 4.4.7 CSB- und N-Frachten als Verlauf in den Anlagenteilen (11.05.2016)

Im Behälter B1 findet schwerpunktmäßig Denitrifikation und teilweise Denitrifizierung zum Stickstoffabbau im Abwasser statt, mit einem Abbaugrad von über 80% für den Nitritstickstoff und rd. 20% für den Nitratstickstoff, der CSB-Abbau beträgt ca. 50%. Anammox hat aus den o.g. Gründen voraussichtlich nicht stattgefunden.

Im Vergleich zum 25.05.2016 liegen schlechtere Substratverhältnisse vor (vgl. Tabelle 4.4.1), resultierend aus einer niedrigeren CSB-Zulaufkonzentration („PNA – bzw. Deni- Input“) und einer insgesamt niedrigeren Rezirkulationsrate, wodurch insbesondere die Denitrifikation schlechter funktioniert.

Hier wird ein Dilemma der Verfahrenskombination „Anaerobfilter (AF) + Denitrifikation/ Nitrifikation“ bzw. „Denitrifikation/ Nitrifikation“ deutlich:

Je mehr Biogas im Anaerobfilter (AF) entsteht, d.h. Energie erzeugt wird, wird der CSB dort abgebaut und steht in der Belebtschlammanlage (hier als D + N) nicht mehr für die Denitrifikation bzw. Denitrifikation zur Verfügung. Dadurch steigen die Ablaufwerte für den Gesamtstickstoff und bei unvollständiger Nitrifikation bzw. Nitrifikation auch für den Ammoniumstickstoff. Dies kann nur durch größere Rezirkulationen bzw. Volumenvergrößerungen mit dem Ziel der Verlängerung der Verweilzeiten bzw. der Verbesserung der Substratverhältnisse korrigiert werden. Damit sind dann wiederum höhere Investitionskosten und/oder Energiekosten verbunden. Im Zwischenfazit für die Versuchsdurchführung wird hieran nochmals angeknüpft.

Im Behälter B2 erfolgt der Abbau des Ammoniumstickstoffes in erster Linie durch Nitrifikation. Die Nitrifikation läuft schwächer ab, aber qualitativ vergleichbar zum Probenahmetag 25.05.2016. Da in Behälter B1 die Denitrifikation, wie oben beschrieben, unvollständig abläuft, kommt es durch die Rezirkulationen zu einer Nitratanreicherung, was dann zu einer relativ hohen Nitratlaufkonzentration führt.

Die Stickstoffbilanz für den Behälter B2 zeigt eine Differenz zwischen abgebautem NH₄-N und gebildetem NO₃-N und NO₂-N von 6,5 mg/h (vgl. Tabelle 4.4.2), somit wesentlich weniger als am 25.05.2016.

| Probentag | Stickstoffart | Stickstofffrachten [mg/h] | | | | | | Überschuss: NH ₄ - Abbau - NO ₃ - bzw. NO ₂ - Bildung + |
|--------------------------|--------------------|---------------------------|------------|------------------------------------|-------------|------------|------------------------------------|---|
| | | Behälter B1 | | | Behälter B2 | | | |
| | | "B1-Output" | "B1-Input" | Differenz: Abbau - Bildung + | "B2-Output" | "B2-Input" | Differenz: Abbau - Bildung + | |
| Versuchsreihe D): | | | | | | | | |
| 30.03.2016 | NH ₄ -N | 87,5 | 99,4 | -11,9 | 64,6 | 106,1 | -41,5 | -1,9 |
| | NO ₂ -N | 10,6 | 19,4 | -8,8 | 38,5 | 21,3 | 17,2 | |
| | NO ₃ -N | 2,5 | 17,0 | -14,5 | 34,2 | 11,8 | 22,4 | |
| 13.04.2016 | NH ₄ -N | 55,0 | 60,4 | -5,4 | 5,8 | 56,8 | -51,0 | 12,4 |
| | NO ₂ -N | 18,9 | 27,2 | -8,3 | 59,1 | 37,4 | 21,7 | |
| | NO ₃ -N | 39,3 | 52,5 | -13,2 | 116,0 | 74,3 | 41,7 | |
| 27.04.2016 | NH ₄ -N | 83,3 | 84,7 | -1,4 | 63,7 | 101,4 | -37,7 | 4,2 |
| | NO ₂ -N | 8,9 | 15,1 | -6,2 | 32,5 | 19,9 | 12,6 | |
| | NO ₃ -N | 2,6 | 20,1 | -17,5 | 44,1 | 14,8 | 29,3 | |
| Versuchsreihe E): | | | | | | | | |
| 11.05.2016 | NH ₄ -N | 146,4 | 140,9 | 5,5 | 94,0 | 155,7 | -61,7 | -6,5 |
| | NO ₂ -N | 27,5 | 35,4 | -7,9 | 46,9 | 34,1 | 12,8 | |
| | NO ₃ -N | 6,8 | 41,6 | -34,8 | 55,8 | 13,4 | 42,4 | |
| 25.05.2016 | NH ₄ -N | 124,6 | 106,2 | 18,4 | 54,5 | 128,0 | -73,5 | -29,1 |
| | NO ₂ -N | 3,0 | 14,4 | -11,4 | 17,9 | 6,6 | 11,3 | |
| | NO ₃ -N | 7,9 | 36,3 | -28,4 | 46,2 | 13,1 | 33,1 | |
| 08.06.2016 | NH ₄ -N | 175,1 | 158,7 | 16,4 | 99,9 | 177,9 | -78,0 | -74,1 |
| | NO ₂ -N | 52,8 | 46,9 | 5,9 | 55,1 | 55,9 | -0,8 | |
| | NO ₃ -N | 0,2 | 4,5 | -4,3 | 5,3 | 0,6 | 4,7 | |
| Versuchsreihe F): | | | | | | | | |
| 22.06.2016 | NH ₄ -N | 450,6 | 503,0 | -52,4 | 495,1 | 470,8 | 24,3 | 5,7 |
| | NO ₂ -N | 66,0 | 26,6 | 39,4 | 30,8 | 69,4 | -38,6 | |
| | NO ₃ -N | 2,4 | 20,0 | -17,6 | 23,4 | 3,4 | 20,0 | |
| 20.07.2016 | NH ₄ -N | 127,2 | 119,9 | 7,3 | 52,9 | 129,2 | -76,3 | -2,8 |
| | NO ₂ -N | 78,3 | 85,6 | -7,2 | 104,6 | 83,8 | 20,8 | |
| | NO ₃ -N | 43,9 | 82,6 | -38,6 | 101,3 | 48,6 | 52,7 | |

Tabelle 4.4.2: Stickstoffbilanz Behälter B1 und B2

Die Substratverhältnisse CSB : NO_x-N im Behälter B2 sind auch deutlich ungünstiger als am 25.05.2016, woraus zu schließen ist, dass in den anaeroben Phasen keine bzw. nur geringe Denitrifikation bzw. Denitritation stattgefunden hat.

Im Vergleich zu den Ergebnissen vom 25.05.2016 ist festzuhalten, dass am 11.05.2016 niedrigere CSB / N – Verhältnisse im anaeroben Behälter B1 sowie in den anaeroben Phasen des Behälters B2 vorgelegen haben, was in den kleineren Zulaufmengen der organischen Substanz (CSB) und kleineren Rezirkulationsraten begründet liegt.

Die niedrigeren Rezirkulationsverhältnisse bewirken außerdem einen geringeren Rückhalt der Biomasse im System, insbesondere der langsam wachsenden AOB, NOB und AnAOB. Dadurch haben die Abbauvorgänge durch D + N nicht so gut funktioniert wie am 25.05.2016, allerdings noch ausreichend, um die Einleitewerte für die Größenklassen 3 und 4 einzuhalten.

● Versuchsreihe E, Messung 08.06.2016

Bei dieser Messung (vgl. Abbildung 4.4.8 bzw. Tabelle 4.4.1) zeigt sich eine überraschende Entwicklung. In Behälter B2 kommt es nur zu einer geringen Nitritstickstoffbildung (Nitritation), dafür liegen hohe Nitratstickstofffrachten vor, d.h. die Nitrifikation muss offensichtlich funktioniert haben. Allerdings kommt es in Behälter B1 zu keiner Reduzierung des Nitratstickstoffes durch Denitrifikation. Wahrscheinlich hat in den anaeroben Phasen in Behälter B2 Denitrifikation stattgefunden, da es hier auch zu einer Reduzierung des CSB kommt.

Im Behälter B1 kommt es zu einem Anstieg der CSB-Fracht, was zunächst nicht zu erklären ist. Ein Erklärungsversuch wäre eine fehlerhafte Analyse (Probenverunreinigung o.ä.) des CSB im „PNA- bzw. Deni-Zulauf“.

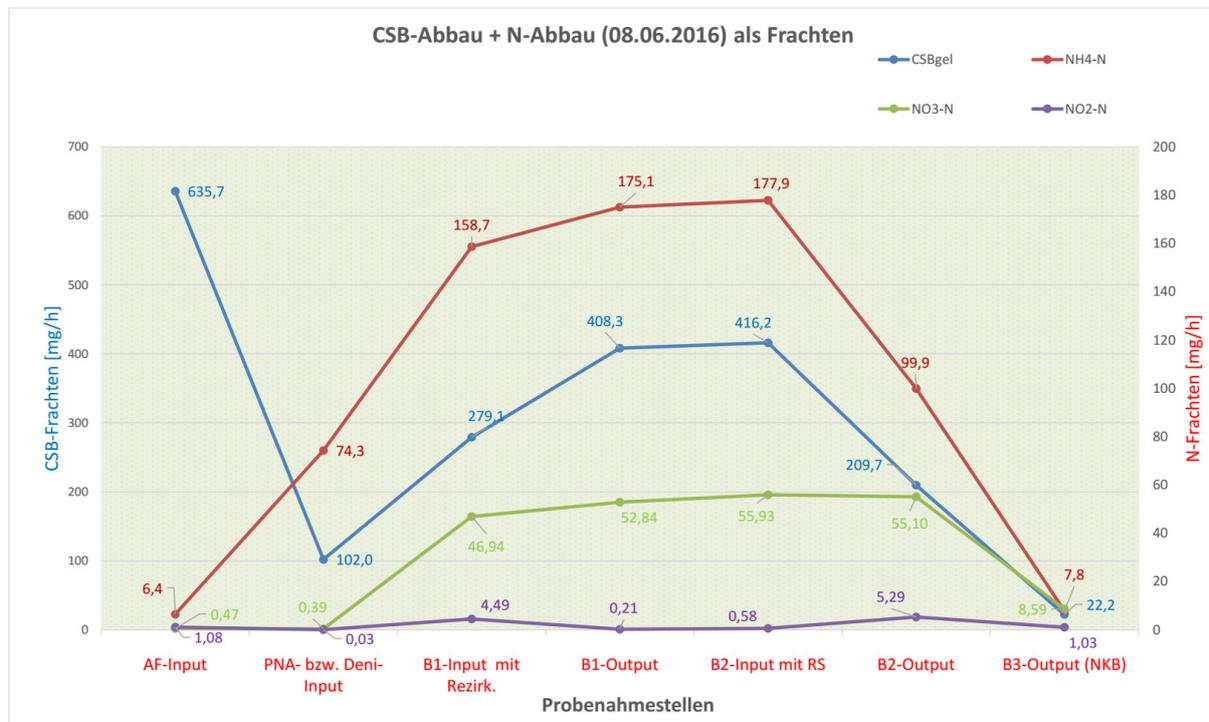


Abbildung 4.4.8 CSB- und N-Frachten als Verlauf in den Anlagenteilen (08.06.2016)

● Versuchsreihe D, Messung 27.04.2016

(vgl. Anhang, Anlage A VI und Tabelle 4.4.1) Der entscheidende Unterschied zur Versuchsreihe E liegt in den Substratverhältnissen. Diese sind bei den Messungen vom 13.04.2016 und vom 27.04.2016 in den Behältern B1 und B2 ungünstiger, in erster Linie wegen der niedrigeren Rezirkulation.

Bei der Messung vom 30.03.2016 stellen sich die Substratverhältnisse ähnlich zur Versuchsreihe E ein. Der Grund, dass die Ablaufwerte höher sind, liegt in der höheren $\text{NH}_4\text{-N}$ -Zulaufkonzentration.

4.5 Zwischenfazit: Versuchsergebnisse / Prozesssteuerungsstrategien

4.5.1 Anaerobfilter (AF)

In den durchgeführten Versuchen wurden folgende Ergebnisse erzielt bzw. Erkenntnisse gewonnen:

- Stabile Funktion (Reinigungsleistung, Gaserzeugung) über die Versuchsdauer,
- CSB-Abbaugrad i.M. 62%, trotz Störungen z.B. durch Luftertrag (O_2),
- Hohe Empfindlichkeit des CSB-Abbaugrades gegenüber Temperaturreduzierung
- Tendenzieller Anstieg des CSB-Abbaugrades über die Versuchsdauer nach Einarbeitung der Biozönose
- Tendenzieller Anstieg der Abbauleistung durch höhere CSB-Raumbelastung

⇒ Es ist aufgrund der Gesamtentwicklung im Versuchsverlauf, sofern Störungen vermieden werden können, ein Potential zu höheren CSB-Abbaugraden über 70% vorhanden, jedoch ist die Temperaturabhängigkeit offenkundig und starke Temperaturabsenkungen stören die Abbauprozesse empfindlich.

■ Empfehlungen:

- Wärmedämmung beim Einsatz in der Praxis bei großtechnischen Anlagen
- Nutzung von gewonnener Wärmeenergie zur Abwasser- bzw. Anlagenerwärmung (Aufheizung)
- Bei nachfolgender Stufe sollten auch Möglichkeiten zum Abbau der organischen Substanz (CSB) durch Denitrifikation bzw. Denitrifizierung vorgesehen werden.

4.5.2 Belebtschlammanlage (PNA bzw. D + N)

Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse der durchgeführten Versuche sind:

- Die Umwandlung vom klassischen Belebungsverfahren in eine Deammonifikationsanlage hat nur in Ansätzen funktioniert.
- Guter Ammoniumabbau durch Nitritation bzw. Nitrifikation
- Nitritation läuft ab April 2016 mit dem Belüftungskonzept 2 besser ab als die Nitrifikation
- Vollständige Unterdrückung der Nitratbildung (Nitratation) nicht gelungen
- Denitrifikation und z.T. auch Denitrifizierung funktionieren bei Substratverhältnissen CSB zu $(NO_3-N + NO_2-N) > 4$ mit guten Ablaufwerten im anaeroben Behälter 1 sowie in den anaeroben Phasen des Behälters 2

- ⇒ Dilemma: hoher CSB-Abbaugrad im AF
- ungünstige Substratverhältnisse für Denitrifikation und insbesondere für Denitrifizierung
 - Schlechter Abbau von Nitrit- und Nitratstickstoff
 - Hohe Ablaufwerte von N_{ges}

■ Ursachen:

- Anammox fand nicht statt:
 - Anammox-Bakterien konnten nicht beschafft werden bzw. konnten sich nicht entwickeln. Aufgrund der zu hohen CSB / NH₄-N-Verhältnisse wurden sie von denitrifizierenden / denitrierenden Bakterien verdrängt. (vgl. Tabelle 4.4.1)
 - NO₂ / NH₄- Verhältnis von 1,3 wurde nicht erreicht (vgl. Tabelle 4.4.1)
- Nitritanreicherung noch nicht vollständig gelungen

■ Empfehlungen:

⇒ Anammox

- Etablierung von Anammoxbakterien durch „Animpfen“ mit Bakterien aus anderen Anlagen
- Verwendung sessiler Mikroorganismen auf Trägermaterialien, die länger im System bleiben können
- Einsatz von Sensortechnologie zur Identifizierung und Quantifizierung der Anammoxbakterien zur Verbesserung der Prozessführung

⇒ Nitritation:

- Optimierung Belüftungskonzept:
 - Geringere Belüftungsintensität → O₂-Gehalte 0,3 – 0,5 mg/l
 - Längere Belüftungspausen
- Vermeidung von Störungen bei der Belüftung: Wartung und Kontrolle

5.VERFAHRENSBEWERTUNG / PROZESSSTEUERUNG

In diesem Kapitel werden zunächst auf Grundlage der Ergebnisse von Kapitel 4 die Verfahrenskombinationen aus Kapitel 2.4 weiterentwickelt und hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit eingeschätzt (Kapitel 5.1 und 5.2). Dabei werden energetische und umweltrelevante (Emissionen) Aspekte sowie insbesondere die Sicherstellung der Reinigungsleistung berücksichtigt.

Die Verfahrenskombinationen gehen von einer kommunalen Kläranlage von 10.000 EW aus, d.h. auf der Schwelle zwischen Größenklasse 3 und 4 mit den entsprechenden Grenzwerten für Ammoniumstickstoff und Gesamtstickstoff (vgl. Tabelle 2.1)

Im Verfahrenvergleich (s. Kapitel 5.3) werden die Verfahrenskombinationen aus Kapitel 2.4 sowie eine weitere Variante mit der „konventionellen Kläranlage“ (Grundvariante, Abbildung 5.1.1) als Basisvariante verglichen. Dabei wird zunächst eine Systemgrenze zur Abgrenzung des Untersuchungsprogrammes definiert und dann hierfür eine Energiebilanz und eine Treibhausgasbilanz als Ersteinschätzung aufgestellt.

Im Kapitel 5.4 wird für die Vorzugsvariante ein Konzept zur Steuerung und Regelung vorgeschlagen.

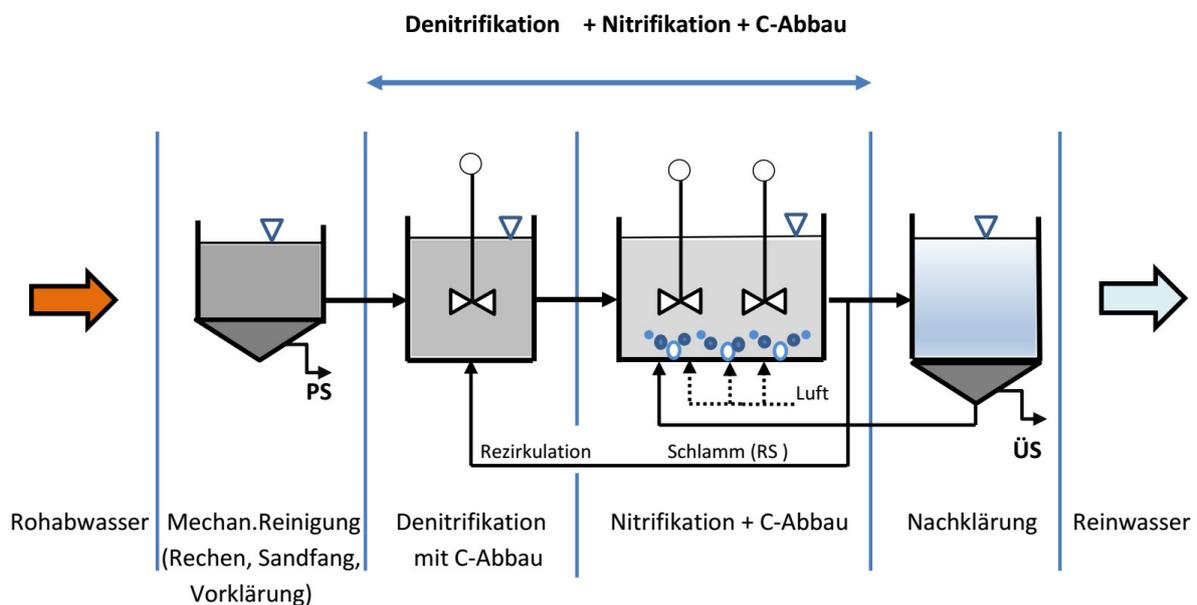


Abbildung 5.1.1: Grundvariante „Konventionelle Kläranlage“ - Belebtschlammverfahren (Variante V0)

5.1 Ergebnisse Versuchsreihen

Mit den Versuchsreihen und der Versuchsanlage wurde das Hauptziel der Etablierung einer AF– PNA- Verfahrenskombination zwar nicht erreicht, dennoch wurden Erkenntnisse gewonnen im Hinblick auf realisierbare Verfahrenskombinationen:

1. Der Anaerobfilter (AF) ist für kommunales Abwasser einsetzbar und zeigt einen stabilen Kohlenstoffabbau (CSB), der allerdings in Abhängigkeit von der Temperatur schwanken kann.
2. Eine Denitrifikation mit Nitrifikation macht nur Sinn, wenn ein CSB- Nitratstickstoff-Verhältnis > 5 vorliegt, was bei einem CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter (AF) von bis zu 60% als möglich erscheint. Es werden aber größere CSB-Abbaugrade anvisiert, so dass daher eine dem AF nachgeschaltete Denitrifikation nicht das Verfahren der Wahl sein sollte. Beim Variantenvergleich wird diese Variante trotzdem betrachtet, um die energetischen und umweltrelevanten Aspekte bewerten zu können.
3. Eine Nitritanreicherung ist möglich mit einem maximalen oberen O_2 -Grenzwert und Belüftungspausen. Das eingesetzte Belüftungskonzept muss zur vollständigen Nitrationshemmung mit Hilfe der Mess-/ Steuer- /Regeltechnik optimiert werden. Dadurch ist die Anwendung der Verfahren Denitrifikation und/ oder Anammox möglich. Diese Verfahren, kombiniert mit der Nitritation, sollen deshalb als getrennte Verfahrenskonzepte untersucht werden.
4. Ein vorgeschaltetes Anammox konnte nicht nachgewiesen werden. Es erscheint auch aufgrund zu hoher CSB- / NH_4 -N- Verhältnisse $> 1,4$ (vgl. Tabelle 4.4.1) schwer beherrschbar. Es wird daher im Variantenvergleich von einer Deammonifikation mit nachgeschaltetem Anammox (vgl. Variante 2a) ausgegangen. In einer Beispielrechnung wird dennoch aufgezeigt, wie sich ein CSB-Abbaugrad von ca 85% im AF, wodurch das CSB- / NH_4 -N- Verhältnis von ca. 1,4 erreicht werden kann und vorgeschaltetes Anammox möglich wäre, energetisch und emissionstechnisch auswirken würde.
5. Bei den Versuchen mit den besten Ablaufwerten (Versuchsreihe E) war die Kombination Denitrifikation / Nitritation am erfolgreichsten. Dennoch wurden noch höhere Nitritkonzentrationen, insbesondere bei geringeren Rezirkulationsverhältnissen festgestellt. Zum anderen wurden für Anammox günstige NO_2/NH_4 -Verhältnisse im Ablauf des Nitrationsbehälters (Behälter 2) ermittelt. (vgl. Tabelle 4.4.1) Es wird daher vorgeschlagen, eine zusätzliche Variante 3 mit größerer Sicherheit bezüglich der Einhaltung der Stickstoffablaufwerte (insbesondere des Nitritstickstoffes) miteinzubeziehen. Dadurch kann auch besser auf den Fall, dass ein geringeres Kohlenstoffangebot wegen hoher Abbauleistung des AF für die Denitrifikation vorliegt, reagiert werden.

5.2 Verfahrensvarianten

Bei allen im Folgenden betrachteten Varianten wird ein anaerober Festbettreaktor mit dem Reinigungsziel Kohlenstoffabbau (CSB-Elimination) und dem Ziel der Biogasgewinnung als erste Verfahrensstufe eingesetzt.

In den nachgeschalteten Komponenten erfolgt die Stickstoffelimination und der Rest-CSB-Abbau alternativ oder kombiniert durch Nitrifikation/ Denitrifikation, Nitritation / Denitrifikation und Nitritation / Anammox (= PNA oder Deammonifikation).

Als **anaerober Reaktor** für den schwerpunktmäßigen Kohlenstoffabbau wurde ein von unten durchströmter Festbettreaktor (**Anaerober Filter: „AF“**) gewählt mit ortsfesten Trägermaterialien, die über hohe spezifische Oberflächen verfügen (Kunststoffmaterialien), somit große Besiedlungsflächen bieten und einen hohen Biomassegehalt aufweisen. Zur Vermeidung von Stör-/Feststoffen werden vor den AF ein **Sandfang** und ein **Separator** vorgeschaltet. Es wird bei der anaeroben Behandlung von einer einstufigen Betriebsweise ausgegangen, da die organischen Abwasserinhaltsstoffe weitgehend während der Abwasserableitung in der Kanalisation hydrolysiert werden.

Die nachgeschalteten Verfahrensstufen, sowohl Nitritation / Anammox als auch Nitrifikation / Denitrifikation bzw. Nitritation / Anammox sollen **zweistufig** in 2 bzw. 3 Behältern getrennt ablaufen.

Die **Energiegewinnung mit Hilfe von Biogas** erfolgt mit Hilfe des Anaeroben Filters (AF) und der anaeroben Stabilisation (Faulung) des Primär-/ Überschussschlammes.

■ **Variante 1a / 1b:**

Kombination Anaerobfilter (AF) mit Nitrifikation / Denitrifikation bzw. Nitritation / Denitritation (vgl. Abbildung 2.4.2, Seite 36)

Die Verfahrenskombination beinhaltet den Anaerobfilter (AF) zum Kohlenstoffabbau, eine vorgeschaltete Denitrifikation / Denitritation als anaerobe Stufe und eine Belebungsstufe (mit künstlicher Belüftung), in der eine Nitrifikation / Nitritation erfolgt. Bei dieser Variante muss das in der Nitrifikation gebildete Nitrat, bzw. das in der Nitritation gebildete Nitrit, rezirkuliert werden, mit einem Rückführverhältnis entsprechend der geforderten Ablaufwerte. Der Abbau des Rest-CSB erfolgt im Rahmen der Denitrifikation / Denitritation bzw. im belüfteten Behälter.

Im Variantenvergleich wird bei Variante 1a mit Nitrifikation / Denitrifikation von einem CSB-Abbaugrad von 60% im AF ausgegangen, da diese Stufe dann noch möglich erscheint, während bei der Nitritation / Denitritation 70% CSB-Abbaugrad im AF angesetzt wird.

■ **Variante 2a / 2b**

Kombination Anaerobfilter (AF) mit Deammonifikation (PNA) (vgl. Abbildungen 2.4.3 und 2.4.4)

In dieser Verfahrenskombination dient der Anaerobfilter (AF) ebenfalls dem Kohlenstoffabbau, die nachgeschaltete zweistufige Deammonifikation (Nitritation und Anammox) in zwei Behältern dem Stickstoffabbau und dem Abbau des Rest-CSB. Dabei müssen sowohl Nitritationsbehälter als auch Anammox-Behälter mit Ammonium gespeist werden. Im Anammox-Behälter muss das stöchiometrisch erforderliche Verhältnis von Nitrit / Ammonium (= 1,3 / 1) vorliegen.

Aufgrund des in 5.2 erwähnten ungünstigen CSB- / NH₄-N-Verhältnis im Zulauf zur Deammonifikationsstufe wird von einem nachgeschalteten Anammox (Abbildung 2.4.3, Variante 2a) ausgegangen.

■ **Variante 3**

Kombination Anaerobfilter (AF) mit Denitrifikation, Nitritation und Anammox (PNA)

Die Variante stellt eine Kombination der Varianten 1b „Nitritation / Denitritation“ und 2a „Anammox nachgeschaltet“ dar (vgl. Abbildung 5.2.1).

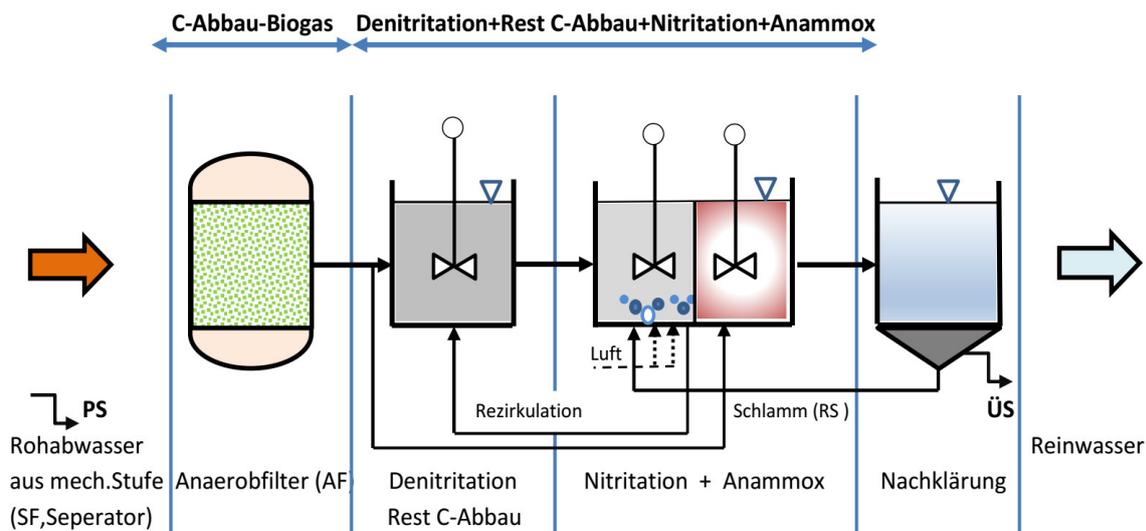


Abbildung 5.2.1: Variante 3: Anaerobfilter (AF) + Denitritation + Nitritation + Anammox

Das in der Nitritation gebildete Nitrit wird zur Denitritationsstufe rezirkuliert. Zusätzlich ist eine Anammoxstufe nachgeschaltet, mit deren Hilfe das verbleibende Nitrit, insbesondere bei schlechterer Leistung der Denitritation, mit Ammonium zu elementarem N_2 abgebaut werden kann. Eine Möglichkeit der zusätzlichen Speisung mit Ammonium vom Ablauf des AF zur Einstellung des optimalen Nitrit-Ammonium-Verhältnisses ist vorhanden.

5.3. Variantenvergleich

Der Variantenvergleich soll eine Ersteinschätzung für die in 5.2 beschriebenen Verfahrenskombinationen hinsichtlich der energetischen und ökologischen Auswirkungen geben.

Eine Ökobilanz nach ISO 14040/44 wäre ein geeigneter methodischer Ansatz für eine ganzheitliche Betrachtungsweise. [REMY et al./ 2011] zur **Beurteilung der ökologischen Auswirkungen der Abwasserreinigung auf einer Kläranlage**.

Im Rahmen einer Ökobilanz wird zunächst die Energiebilanz, d.h. Strom- und Wärmebilanz, als sogenannter **direkter Energieverbrauch** betrachtet. Darüber hinaus wird auch der **indirekte Energieverbrauch** des Kläranlagenbetriebs, z.B. vor- und nachgelagerte Prozesse, erfasst: [REMY et al./ 2011]

- Chemikalien (Produktion und Bereitstellung)
- Transport von Klärschlamm
- Nutzung fossiler Energieträger (Heizöl, Erdgas) zur Faulraumheizung etc.

Bei einer Ökobilanz können auch die **indirekten Energieeinsparungen** bei der Rückgewinnung von Nährstoffen aus dem Abwasser bzw. Klärschlamm (N, P als Mineraldünger) und der thermischen Klärschlammmentsorgung durch die Substitution von Brennstoffen berücksichtigt werden.

Es besteht auch die Möglichkeit im Rahmen der Ökobilanz **andere Umweltindikatoren**, wie z.B. den Ausstoß an klimaschädlichen Treibhausgasen (THG) wie CO_2 („carbon footprint“) mit zu bewerten.

Die Vorgehensweise im Rahmen vorliegender Arbeit orientiert sich an der Methodik der Ökobilanz nach ISO-Norm 14040/44 mit folgenden 4 Arbeitsschritten:

1. Definition des Untersuchungsziels bzw. -rahmens
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Interpretation.

Dabei werden aussagekräftige Parameter und Bilanzen für den Verfahrensvergleich ausgewählt, indirekter Energieverbrauch und indirekte Energieeinsparungen werden nicht berücksichtigt.

Auf einen **ökonomischen Vergleich**, z.B. nach den „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen“, ausgearbeitet vom Arbeitskreis „Nutzen- /Kosten- Untersuchungen in der Wasserwirtschaft“ der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), wurde verzichtet. Dieser ist **erst zu einem späteren Planungszeitpunkt sinnvoll**, denn bei einer Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte müssten Investitions-, Reinvestitions- und Instandhaltungskosten, sowie Betriebskosten (Energie, Personal, Labor) und Kapitalkosten realistisch abgeschätzt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit sind lediglich qualitative Aussagen, z.B. hinsichtlich der Energiekosten, möglich.

5.3.1. Zieldefinition - Untersuchungsrahmen

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse von Kapitel 4 (vgl. auch 5.1) und des Stands der Forschung wurden drei Verfahrenskombinationen entwickelt, die bezüglich ihrer **Energiebilanzen (hier: Strombilanzen)** und ihrer **Treibhausgaspotentiale** untereinander und vor allem mit einer „konventionellen Kläranlage“ verglichen werden. Kriterien, wie Prozessstabilität, Schlamm-entsorgung, etc., werden qualitativ im Zuge der Interpretation der Ergebnisse erörtert.

Folgende **Varianten** werden untersucht:

Variante 1: „**Konventionelle Kläranlage (KA)**“- Belebungsverfahren,
(vgl. Abbildung 5.1.1)

Variante 2a/2b: „**Anaerobfilter (AF) mit Denitrifikation und Nitrifikation bzw. Denitritation und Nitritation**“
(vgl. Abbildung 2.4.2)

Variante 3: „**Anaerobfilter (AF) mit Deammonifikation (PNA – Anammox nachgeschaltet)**“
(vgl. Abbildung 2.4.3)

Variante 4: „**Anaerobfilter (AF) mit Denitritation, Nitritation und Anammox (PNA)**“
(vgl. Abbildung 5.2.1)

Die Untersuchung bezieht sich auf den Abwasserreinigungsprozess der Kläranlage, der die „primäre Systemfunktion“. [REMY et al./ 2011] darstellt. Die Grenze des Systems Kläranlage mit Stoff-/ Energieflüssen ist in Abbildung 5.3.1 ersichtlich. Die In-/ Outputs an der Systemgrenze sind farblich dargestellt, wobei es sich um die Zulauf-/ Abflaufmengen, die CO₂-Emissionen und den Strombedarf bzw. den Stromüberschuss handelt.

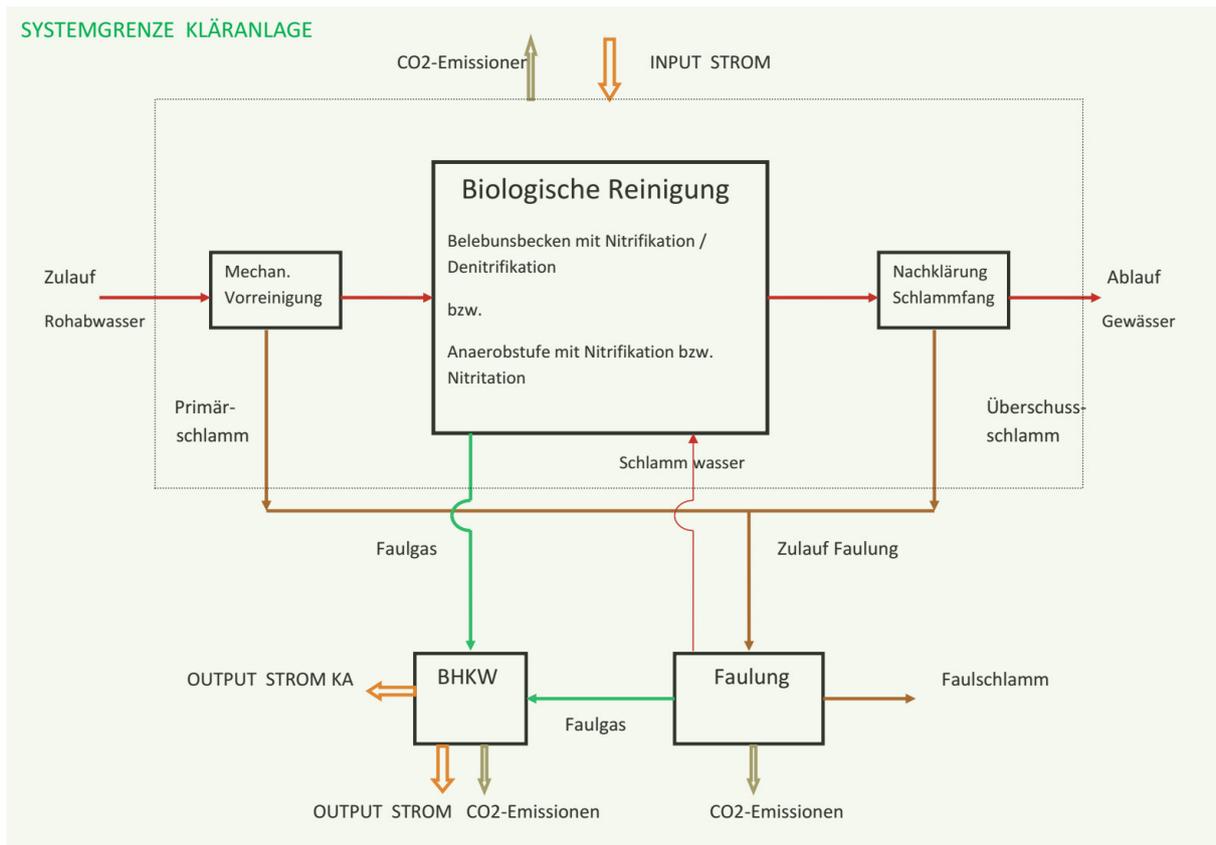


Abbildung 5.3.1: Systemgrenze - Untersuchungsraum

5.3.2. Sachbilanz

Folgende Bilanzen werden aufgestellt:

- ▶ CSB-Bilanz
- ▶ Energiebilanz
- ▶ Treibhausgasbilanz

Grundlage aller Bilanzen ist die **CSB-Bilanz**, da aus ihr die chemisch gebundene Energie im Abwasser abgeschätzt werden kann.

Bei der Energiebilanz handelt es sich um eine **Strombilanz**, die den Stromverbrauch und die Produktion von Strom aus Faulgas im BHKW (Energieausbeute) bilanziert. Wärmebedarf und der Wärmegewinn werden nicht bilanziert, da Wärme z.B. gegenüber Strom keine hochwertige Energieform darstellt und saisonal ungleichmäßig verfügbar bzw. benötigt wird.

Die Wärmeenergie auf der Kläranlage wird in der Regel für Gebäudeheizungen und zur Prozessbeschleunigung der anaeroben Reaktoren verwendet. [WARTHMAN et al. / 2010]

Der Verbrauch von Chemikalien und zusätzlichem Brennstoff sowie die Klärschlamm Entsorgung/ -verwertung (stofflich/ thermisch) werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

■ Berechnungsgrundlagen

→ Allgemeine Parameter:

- Einwohnerwert EW: 10.000 EW \cong Größenklasse 4
- spez. Wasserverbrauch w_s : 120 l/ (E * d)
- Fremdwasserzuschlag FWZ: 20%
- Zuflüsse, vgl. Anhang: Anlage AVIII-1
- Abwassertemperatur: 20° - 25°C, gewählt 20°C

→ Biologische Parameter:

- CSB-, BSB₅, N-Frachten, vgl. Anhang Anlage AVIII-1
- CSB-Ablaufwert: 90 mg/l, vgl. Tab. 2.1 und Anlage AVIII-2
- NH₄-N-Ablaufwert: 10 mg/l, vgl. Tab. 2.1 und Anlage AVIII-2
- N_{ges.}-Ablaufwert: 18 mg/l, vgl. Tab. 2.1 und Anlage AVIII-2
- CSB-Abbaugrad Anaerobfilter (AF): 60% für Denitrifikation und 70% für Denitrifikation / Anammox
- CSB / Nitrat-N ≥ 5
- CSB / Nitrit N gewählt 60% von 5 ≥ 3
- Überschussschlammfall aerob: 50% des abgebauten CSB
- Überschussschlammfall anaerob: 5% des abgebauten CSB
- Primärschlammfall: vgl. Anhang, Anlagen AVIII-1 u. AVIII-2
- Biogasertrag Schlammfäulung: Primärschlamm 60% / Überschuss-schlamm: 30%, vgl. Anlage AVIII-2

→ Physikalische / Technische Parameter:

- Spez. Sauerstoffbedarf/ -eintrag: vgl. Anhang, Anlage A VIII-4
- Elektrischer Wirkungsgrad BHKW_{el.}: 40%
- spez. Energiegehalt pro CSB: 3,38 kWh/kgCSB bzw. 148,2 kWh/ (E*a), vgl. Anhang, Anlage AVIII-3

■ CSB-Bilanz

Die CSB-Bilanz ist in Anlage AVIII-2 im Anhang tabellarisch für einwohnerspezifische Frachten in g/ (E * d) bzw. kg/ (E * a) und für absolute Frachten in kg/d bzw. kg/a ermittelt worden. Die CSB-Bilanz ist die Grundlage für die Ermittlung der Energieausbeute.

Aus der CSB-Bilanz ablesbar ist, dass bei der Grundvariante V0, der konventionellen Kläranlage, sich im Vergleich zu den anderen Varianten fast 2-mal so viel CSB im ausgefaulten Schlamm befindet und dass zur energetischen Verwertung im BHKW bei Variante V0 nur ca. 35 – 40% der CSB-Menge im Vergleich zu den anderen Varianten gelangen. Auf die Ausgangs-CSB-Fracht bezogen, werden bei Variante V0 ca. 25 % und bei den anderen Varianten ca. 60 – 70 % energetisch verwertet.

■ Energiebilanz

Bei der Energiebilanz handelt es sich um eine Strombilanz. Es werden zunächst Stromverbräuche ermittelt und mit der Energieausbeute (hier: elektr. Strom) bilanziert.

● Energieverbrauch (Stromverbrauch)

Die **Belüftung** (vgl. Kapitel 1.1) macht bis zu **50% des Gesamtstromverbrauches** einer Kläranlage aus, deshalb wird der Sauerstoffbedarf genau ermittelt.

Die **sonstigen Verbraucher** (Pumpen, Rührwerke, etc.) können im Rahmen dieses theoretischen Vergleichs nicht genau erfasst werden. Hierfür sind die individuellen örtlichen Gegebenheiten wie Topographie, Höhen, Gelände- und Grundstücksverhältnisse, Lage zum Vorfluter, Abwassercharakteristik etc. entscheidend.

Desweiteren wurde der Energieverbrauch einer Strippung des im Anaerobfilter rückgelösten Methans nicht explizit berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass der zusätzliche Energieertrag der energetischen Verwertung des Methans den Energiebedarf der Strippung zumindest kompensiert. [ROSENWINKEL et al./ 2015]

Es wird für die sonstigen Verbraucher zusammen ebenfalls von ca. 50% des Gesamtverbrauches (vgl. Abbildung 2.1.5) für eine konventionelle Kläranlage (Variante 0) ausgegangen. Bei den anderen Varianten werden für die sonstigen Verbraucher die gleichen absoluten Werte wie bei Variante 0 angesetzt.

Bei der Ermittlung der Stromverbräuche werden **2 Szenarien** berücksichtigt, zum Einen mit durchschnittlichem Verbrauch von gesamt ca. 34 kWh/ (E*a) und zum Anderen energetisch optimiert (z.B. drehzahlgeregelte Pumpen, Modernisierung Belüftungstechnik) mit 25 kWh/ (E*a).

● Sauerstoffverbrauch

Der Sauerstoffverbrauch besteht aus dem Sauerstoffverbrauch zur **Kohlenstoffelimination** und dem zur **Stickstoffelimination**.

Die Ermittlung erfolgt auf Grundlage des technischen Regelwerks [ATV-DVWK-A131 / 2000] zunächst in kgO₂/d, vgl. *Anhang, Anlage AVIII-4*. Mit Hilfe des Sauerstoffertrages wurde die Sauerstoffmenge in einen Stromverbrauch umgerechnet.

Die Berechnungsformeln sind im *Anhang in der Anlage A X* zu finden.

Es ergeben sich folgende **Sauerstoffverbräuche**:

| | |
|--------------|---|
| Variante 0: | 670 kg O ₂ /d |
| Variante 1a: | 391 kg O ₂ /d \cong - 42 % zur konventionellen Kläranlage (V1) |
| Variante 1b: | 343 kg O ₂ /d \cong - 49 % zur konventionellen Kläranlage (V1) |
| Variante 2: | 337 kg O ₂ /d \cong - 50% zur konventionellen Kläranlage (V1) |
| Variante 3: | 341 kg O ₂ /d \cong - 49 % zur konventionellen Kläranlage (V1) |

Alle Varianten zeigen eine deutliche Einsparung des Sauerstoffverbrauchs von über 40% gegenüber einer konventionellen Kläranlage (V0) auf, was zunächst auf dem CSB-Abbau im Anaerobfilter unter anaeroben Bedingungen zurückzuführen ist.

Desweiteren wird sowohl durch die Deammonifikation Sauerstoff eingespart (partielle Nitritation) als auch durch die anoxischen Prozesse Denitrifikation und Denitritation beim C-Abbau.

● Energieausbeute (Stromausbeute)

Bei den Varianten erfolgt die Energiegewinnung durch den Biogasgewinn in der anaeroben Schlammstabilisierung (Faulung) bzw. bei den Varianten 1 bis 3 im Anaerobfilter. Im Anhang, *Anlage AVIII-3*, ist die elektrische Energieausbeute ermittelt auf Basis der Berechnungsgrundlagen, vgl. Kapitel 5.3.2.

Das spezifische Energiepotential im Zulauf der Kläranlage beträgt jeweils rd. 148 kWh/ (E*a). Bei der konventionellen Kläranlage (V0) beträgt die Stromausbeute rd. 15 kWh / (E * a), d.h. rd. 10% des Energiepotentials,
bei Variante 1a rd. 37 kWh / (E * a), somit rd. 25% des Energiepotentials,
bei Variante 1b rd. 41 kWh / (E * a), somit rd. 28% des Energiepotentials,
bei Variante 2a rd. 41 kWh / (E * a), somit rd. 28% des Energiepotentials und
bei Variante 3 rd. 41 kWh / (E * a), somit rd. 28% des Energiepotentials.

Bei der Basisvariante V0 wird das Energiepotential nur zu einem relativ kleinen Teil ausgenutzt, da im ausgefaulten Schlamm (organische Trockenmasse) noch Energie enthalten ist und ein Teil des CSB aerob zur Kohlenstoff- und Stickstoffelimination abgebaut (veratmet) wird.

Die Energieerzeugung erfolgt bei den anderen Varianten im Wesentlichen im Anaerobfilter und korrespondiert mit dem CSB-Abbau, der bei den Varianten 1b, 2a und 3 mit 70% angenommen wurde, bei Variante 1a mit 60%.

● Energiebilanz

Die Berechnungsergebnisse sind im Anhang in *Anlage A VIII-5* farbig veranschaulicht. Es kommt bei allen Varianten mit Anaerobfilter zu **Stromüberschüssen**, die in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden können.

Der **Eigenversorgungsgrad** ist auch bei „durchschnittlicher“ Betriebsführung > 1, d.h. es würde sich um **energiepositive** Kläranlagen im Falle der Varianten 1, 2 und 3 handeln.

■ Treibhausgasbilanz

Zum Treibhauseffekt tragen die Emissionen der klimawirksamen Gase CO₂, CH₄ und N₂O bei, die in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt werden.

In der Treibhausgasbilanz Berücksichtigung finden sollen:

- ▶ Input / Output: Netzstrombezug bzw. Netzstromeinspeisung
- ▶ CO₂-Emissionen der Biologischen Reinigungsstufe
- ▶ Faulgasverwertung im BHKW mit CO₂-Emissionen
- ▶ Faulgasproduktion in der Anaerobstufe bzw. Faulung mit CO₂-Emissionen
- ▶ Distickstoffmonoxid-Emissionen bei der Stickstoffelimination.

Die Treibhausgasbilanz wurde in *Anlage AVIII-7, Anhang* aufgestellt mit den im Anhang, Anlage A XI, beschriebenen Grundlagen.

5.3.3. Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung werden für alle Varianten die Ergebnisse der Sachbilanzen

- Energiebilanz,
- Treibhausgasbilanz

zusammengefasst beschrieben und Wirkungsindikatoren gewählt.

Bei der Energiebilanz werden der Energieeigenversorgungsgrad und der Energiebedarf / Energieüberschuss der Varianten aufgezeigt. Der Verbrauch von Primärenergie ohne erneuerbare Energiequellen wird für die Energiebilanz als Wirkungsindikator angegeben, für den Treibhauseffekt wird die jährliche Freisetzung von CO₂- (CO₂-äquiv.)-Emissionen als Wirkungsindikator gewählt, vgl. Abbildungen 5.3.2 bis 5.3.4

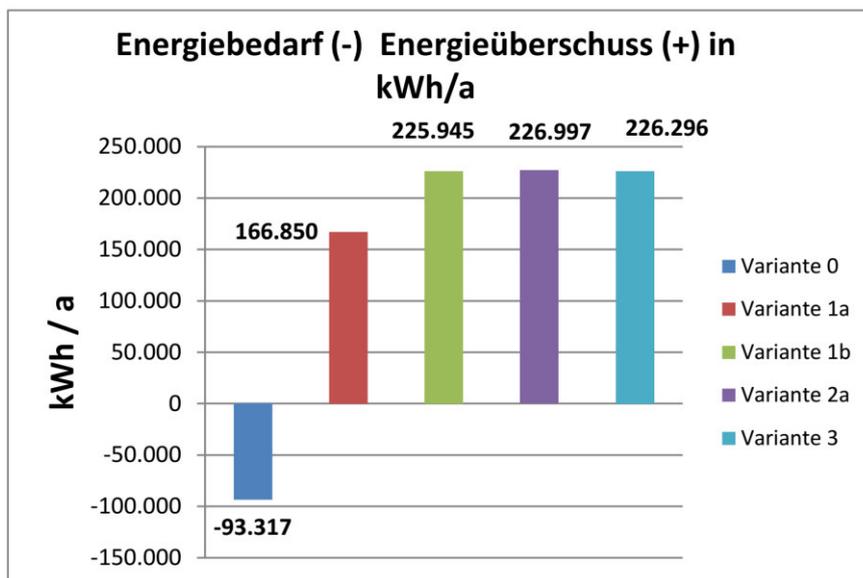


Abbildung 5.3.2: Energiebedarf / Energieüberschuss der Varianten – optimierte Betriebsweise –

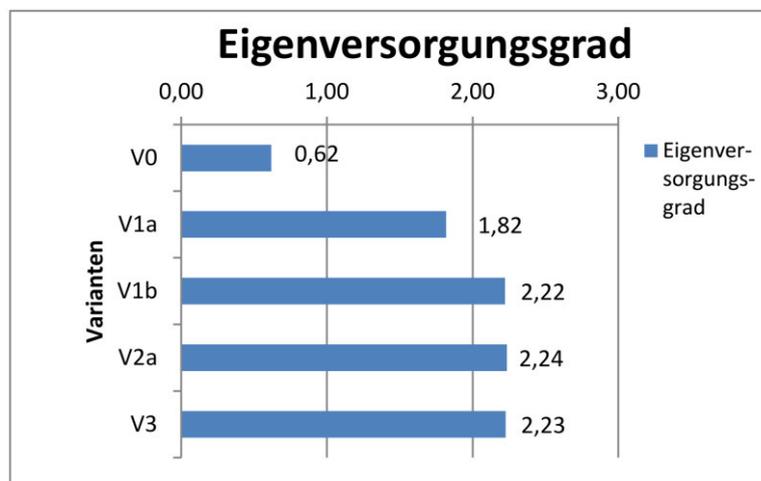


Abbildung 5.3.3: Eigenversorgungsgrad der Varianten – optimierte Betriebsweise –

■ Energiebilanz

Aus den Abbildungen 5.3.2 und 5.3.3, die auf den Tabellen des Anhangs, insbesondere Tabellen AVIII-4, AVIII-5 aufbauen, ist ersichtlich, dass alle **Varianten mit Anaerobfilter (AF)** einen **Energieüberschuss** vorweisen können.

Bei der Grundvariante V0 muss Energie (hier: Strom) aus dem öffentlichen Stromnetz (Strommix), überwiegend Primärenergie ohne erneuerbare Energien bezogen werden. Alle Varianten mit Anaerobfilter (AF) decken den Eigenbedarf komplett aus selbsterzeugtem Strom aus erneuerbaren Energien (hier: Abwasser, Faulschlamm) und erwirtschaften sogar einen Energieüberschuss, der in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden kann.

Bei einem Abbaugrad > 80% des Anaerobfilters werden nur noch die Varianten mit Anammox (V2 und V3) realisierbar sein, da aufgrund des zu niedrigen Kohlenstoffgehalts die Denitrifikation alleine (CSB- / Nitrit-N < 3) nicht mehr funktionieren wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass auf die Zugabe externer C-Quellen (Methanol, etc.) verzichtet wird und die internen C-Quellen (Trübwasser o.ä.) nicht ausreichen. In einem solchen Fall würde sich der Energieüberschuss noch deutlich auf rd. 275 MWh/a steigern.

Der Eigenversorgungsgrad ist mit 1,9 bis 2,2 deutlich größer 1, d.h. bei diesen **Varianten** kann man von **energiepositiven Verfahrenskonzepten** sprechen, während dies bei der Grundvariante V0 trotz der optimierten Betriebsweise nicht der Fall ist.

Bei der durchschnittlichen Betriebsweise sind die Werte von Energiebedarf/ -überschuss und Eigenversorgungsgrad tendenziell ungünstiger, die Aussagen bezüglich der Varianten bleiben qualitativ gleich.

■ Treibhausgasbilanz

Aus der Abbildung 5.3.4 die aus Tabelle *AVIII-7 des Anhangs* resultieren, ist zunächst zu erkennen, dass die Varianten mit Anaerobfilter ohne Berücksichtigung der Lachgasemissionen das geringste Treibhausgaspotential, ausgedrückt in emittierten CO₂-Äquivalent-Mengen in Tonnen pro Jahr, haben.

Da das größte Lachgasbildungspotential bei der Nitrifikation gesehen wird, schneiden die Varianten mit diesem Verfahrensschritt jedoch in der Gesamtbilanz auf dem Niveau des Belebungsverfahrens ab.

Bei der durchschnittlichen Betriebsweise bleiben die Aussagen qualitativ gleich.

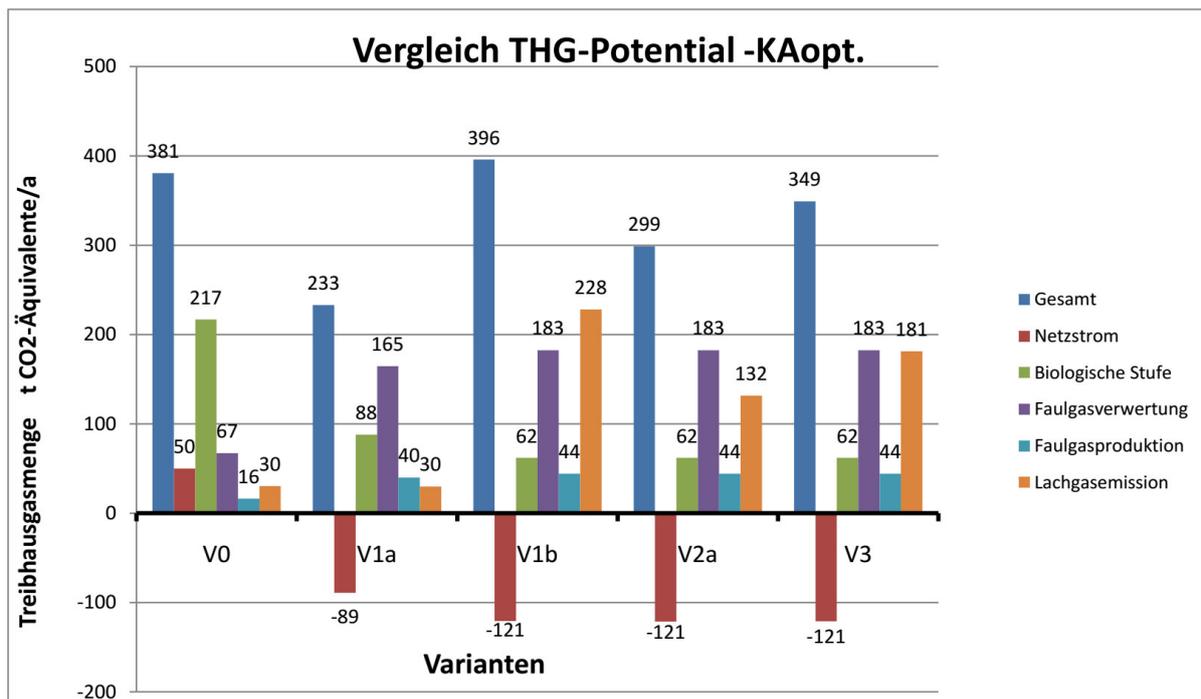


Abbildung 5.3.4: Treibhausgaspotential der Varianten – optimierte Betriebsweise –

5.3.4. Interpretationen und Diskussion der Ergebnisse

■ Energiebilanz

Alle Varianten zeigen (vgl. *Anlage AVII* und Abb. 5.3.5) bei der **Energieausbeute** durch die anaerobe Abwasserbehandlung mit der Gewinnung von Biogas sehr gute Ergebnisse, über 100% besser als Variante 0.

Variante 1a scheidet schlechter ab, da von einem geringeren CSB-Abbaugrad im Anaerobfilter ausgegangen werden muss, damit eine Denitrifikation noch funktioniert.

Die angesetzten CSB-Abbaugrade bei den Varianten mit Anaerobreaktor sind auf das Jahr gesehen für deutsche Verhältnisse ($T = 20^{\circ}\text{C}$) ambitioniert, können aber in südeuropäischen und noch wärmeren Klimaten bestimmt erreicht werden.

Die Möglichkeit der Aufheizung des Anaerobreaktors mit Hilfe der gewonnenen Wärme sollte zwar aufgrund des Hauptstrombetriebs nicht berücksichtigt werden, könnte aber durchaus für die Wintermonate bei sehr niedrigen Temperaturen, evtl. auch bei der Deammonifikation in weitere Überlegungen / Untersuchungen mit einbezogen werden. Der mesophile Temperaturbereich ist wegen der zu großen Wassermengen voraussichtlich nicht wirtschaftlich zu erreichen, aber selbst eine geringe Temperaturerhöhung könnte die CSB-Abbaugrade im Aerobfilter und somit die Biogas- und Energieausbeute noch verbessern.

Dabei sollte auch die Nutzung von Solarenergie mit angepassten Speicherkonzepten sowie eine optimierte Wärmedämmung in die Überlegungen mit einbezogen werden.

Mit allen Varianten 1 - 3 kann eine energiepositive Kläranlage mit einer **Eigendeckung von über 180%** (optimierte Betriebsweise) realisiert werden, die gleichzeitig Quelle erneuerbarer

Energien ist, evtl. zur Einspeisung in das öffentliche Stromnetz oder zur Deckung des erweiterten eigenen Bedarfs. (Heizung o.ä., s.o.).

Auch was den **Energieverbrauch** angeht, weisen die **Varianten 1 – 3 ca. 15 – 25% bessere Werte** (vgl. Abbildung 5.3.5) als die Grundvariante V0 auf. Dies liegt zunächst an dem reduzierten Sauerstoffbedarf für den Kohlenstoffabbau im AF und bei den Varianten 1b, 2a und 3 daran, dass Ammonium nur bis zum Nitrit oxidiert wird.

Die Varianten 1b und 3, die die Denitrifikation beinhalten, schneiden im Vergleich zur Deammonifikation, was den Energieverbrauch angeht, in etwa gleich ab, weil durch die Denitrifikation auch Kohlenstoffabbau erfolgt, für den keine Belüftung erforderlich ist.

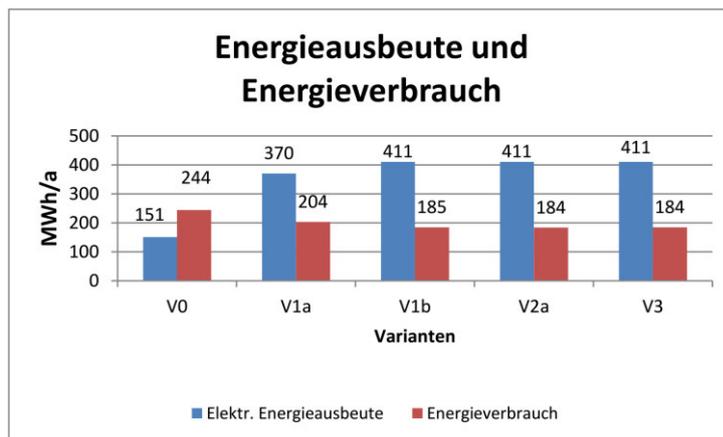


Abbildung 5.3.5: Energieausbeute und Energieverbrauch der Varianten – optimierte Betriebsweise –

■ Treibhausgasbilanz

Bei der Treibhausgasbilanz liegen alle Varianten relativ dicht zusammen. Entscheidend sind hier die Kriterien **Netzstrombezug**, der von der Energieausbeute auf der Kläranlage abhängt, (vgl. Abbildung 5.3.4) und die **Lachgasemissionen**.

Die Lachgasemissionen erscheinen bei der Treibhausgasbilanz der zurzeit unsicherste Faktor zu sein, was auch die große Bandbreite der Literaturwerte zeigt. Entscheidend für die Emissionsrate ist die tatsächliche Freisetzung (Gastransferrate) des gebildeten N₂O als Zwischenprodukt im Denitrifikations- / Denitritions- / Deammonifikationsprozess und der Einfluss von Betriebseinstellung und Milieubedingungen auf dessen Bildung, was Gegenstand aktueller Forschung ist. [ROSENWINKEL et al. /2015]

Nach [BEIER et al. / 2015] können N₂O-Emissionen durch die Minimierung der N₂O-Bildung mit einer an die Leistungsfähigkeit der Mikroorganismen angepassten Beschickung und einer Vergleichmäßigung der Konzentrationen reduziert werden.

Desweiteren ist eine Reduzierung der N₂O-Konzentration,- und damit der Emissionen im Gasstrom -, durch Rückführung in einen vorgeschalteten Denitrifikationsbereich / -phase möglich und in der Flüssigphase in einer nachgeschaltet angeordneten anoxischen Zone / Phase.

■ Sonstige Kriterien

Zu folgenden Kriterien können im Rahmen vorliegender Arbeit nur qualitative Aussagen getroffen werden:

1. Prozessstabilität
2. Schlammensorgung
3. Kosten / Wirtschaftlichkeit.

Zu 1) Prozessstabilität

Die Prozessstabilität ist ein sehr wichtiger Parameter, um die sichere Einhaltung von Einleitengrenzwerten gerade bei kommunalen Kläranlagen als Direkteinleiter in Gewässer beurteilen zu können. Hierbei spielt der Einfluss von Temperatur, Stoßbelastungen (hydraulisch, stofflich), Konzentrationen oder Hemmstoffen eine große Rolle.

Bei der Grundvariante 0 handelt es sich um ein lang erprobtes Verfahren, für das es große Betriebs-erfahrungen und solide Regelwerke gibt, ebenso für die klassischen Verfahren der Stickstoffelimination Nitrifikation und Denitrifikation.

Für Anaerobreaktoren, z.B. UASB-Reaktoren, gibt es zwar auch Bemessungsansätze, die aber noch nicht so ausgereift sind, im Vergleich zu konventionellen Belebungsverfahren (Varianten 1 - 3).

Anaerobreaktoren werden zurzeit meistens in Ländern in wärmeren Klimazonen eingesetzt, in Deutschland wird die Technologie noch selten genutzt, weil die jahreszeitlich stark schwankenden Temperaturen die Abbauleistung stark beeinflussen.

Zur Deammonifikation im Hauptstrom von Kläranlagen gibt es noch wenig Betriebserfahrung. Gerade bei der Deammonifikation sind Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme (langsam wachsende Anammox-Organismen) und Unsicherheiten bzgl. der Nitrit-Anreicherung möglich.

Bezüglich der Prozessstabilität sind die klassischen Verfahren die sichersten. Die anderen Varianten sollten daher noch weiter erprobt werden (Labor, halbtechnischer / technischer Maßstab) und mit einer modernen Mess- / Steuer- und Regeltechnik ausgestattet werden.

Zu 2): Schlammensorgung

Bei den Varianten 1 - 3 ist aufgrund des Anaerobfilters die weitaus geringste Schlammmenge zu verwerten bzw. zu entsorgen. Bei der Schlammensorgung können zwar auch z.B. bei der thermischen Verwertung Energie oder andere Ressourcen (Mineraldünger) zurückgewonnen werden. Voraussichtlich werden aber die negativen Aspekte, wie erhöhter CO₂-Ausstoß und höhere Kosten für Transporte, Klärschlamm-trocknung und -verwertung (z.B. Verbrennung) überwiegen. Zur genaueren Beurteilung müsste der Bilanzrahmen (Systemgrenze) erweitert werden.

Aufgrund der geringeren Faulschlamm-mengen sind die Varianten 1 - 3 bzgl. der Klärschlammensorgung der konventionellen Abwasserreinigung überlegen.

Zu 3): Kosten / Wirtschaftlichkeit

Bezüglich der Betriebskosten liegt bei den Varianten 1 - 3 aufgrund der Ersparnisse bei den Stromkosten mit der Möglichkeit der Einspeisung in das Stromnetz, des geringen Schlammanfalls und nicht erforderlicher Kohlenstoffquellen für die Stickstoffelimination das größte Einsparpotential.

Allerdings ist, - zumindest bis die Verfahrenskomponenten Deammonifikation und Anaerobtechnik sich etabliert haben -, mit höheren Personalkosten (Betrieb, Überwachung, Wartung) bei den Varianten 2 und 3 zu rechnen.

Zu den Investitionskosten kann noch keine Aussage getroffen werden. Diese sind grundsätzlich davon abhängig, ob es sich um einen Neubau, Umbau oder eine Erweiterung einer bestehenden Kläranlage handelt und müssten deshalb für jeden Fall individuell ermittelt werden.

Zur Wirtschaftlichkeit der Verfahrensvarianten kann daher insgesamt keine Gesamttendenz angegeben werden. Dies könnte im Rahmen z.B. einer dynamischen Kostenvergleichsrechnung für einen konkreten Anwendungsfall individuell erfolgen.

■ Wahl der Vorzugsvariante

Energetisch haben die Varianten (2a und 3) mit dem Verfahrensbaustein Anammox das größte Potential, da sie eine größtmögliche CSB-Elimination mit Anaerobfilter zulassen. Bezüglich der Treibhausgasemissionen besteht einerseits noch Forschungsbedarf, andererseits ist bei den Varianten 2a und 3 eine anoxische Zone der Nitrifikation nachgeschaltet, was, wie oben erwähnt, zu einer Reduzierung der N_2O -Konzentrationen beiträgt.

Die Einhaltung der Einleitgrenzwerte erscheint durch die Kombination Denitrifikation mit Anammox der Variante 3 in Anbetracht der zu erwartenden unterschiedlichen CSB-Abbaugrade im AF aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit am besten möglich zu sein. Deshalb sollte diese weiter untersucht werden und wird bei dem Konzept zur Steuerung und Regelung in Kapitel 5.4 berücksichtigt.

5.4 Steuer- / Regelkonzept

Der Anaerobfilter (AF) ist in sich baulich zu optimieren (z.B. Füllkörper) und mit einer mechanischen Vorreinigung, z.B. durch einen Separator (Siebschnecke o.ä.) auszustatten. Ansonsten sind für das Funktionieren des AF die Milieubedingungen, insbesondere die Temperatur, mitentscheidend, die nur mit großem technischem Aufwand verändert werden können.

Das Steuer- / Regelkonzept bezieht sich deshalb fast ausschließlich auf den Teil der Belebtschlammanlage für die gewählte Variante 3.

Für die einzelnen Prozesse sind folgende Parameter relevant:

Denitrifikation:

- Nitritgehalt: Voraussetzung für Denitrifikation
- Kohlenstoffgehalt (CSB): Aktivierung der für die Denitrifikation verantwortlichen Mikroorganismen
- Anaerobes / anoxisches Milieu
- Günstiges Substratverhältnis $CSB / NO_2-N > 3$
- Aufenthaltszeit (Verweilzeit): Kontakt- / Reaktionszeit für Mikroorganismen
- Feststoffgehalt: ausreichende Anzahl von denitrifizierenden Organismen

Nitrifikation:

- Ammoniumzufuhr
- O_2 -Versorgung, allerdings nur auf einem Niveau, dass AOB bevorzugt werden und dass es zu einer Nitrationshemmung kommt
- Aufenthaltszeit / Feststoffgehalt (ausreichende Anzahl von Mikroorganismen für die Nitrifikation)

Anammox:

- Verhältnis NO_3 / NH_4 ca. 1,3
- CSB-Anteil niedrig
- Aufenthaltszeit / Feststoffgehalt (ausreichende Anzahl von Mikroorganismen für Anammox)
- Anaerobes / anoxisches Milieu

Die Regelgrößen sollten grundsätzlich online gemessen werden.

Es wird vorgeschlagen, folgende Regelgrößen bzw. Stellglieder steuer- bzw. regeltechnisch für die einzelnen Prozesse zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 5.4.1)

■ Denitrifikation

Regelgrößen:

→ NO_2 -Konzentration im Ablauf der Denitrifikationsstufe (B1)

→ CSB-Konzentration im Zulauf Denitrifikationsstufe B1

Als **Stellglieder** kommen die Rezirkulation von nitritreichem Abwasser aus dem Nitrifikationsbehälter (B2a) in den Denitrifikationsbehälter (B1) und eine Umgehung des Anaerobfilters in Frage.

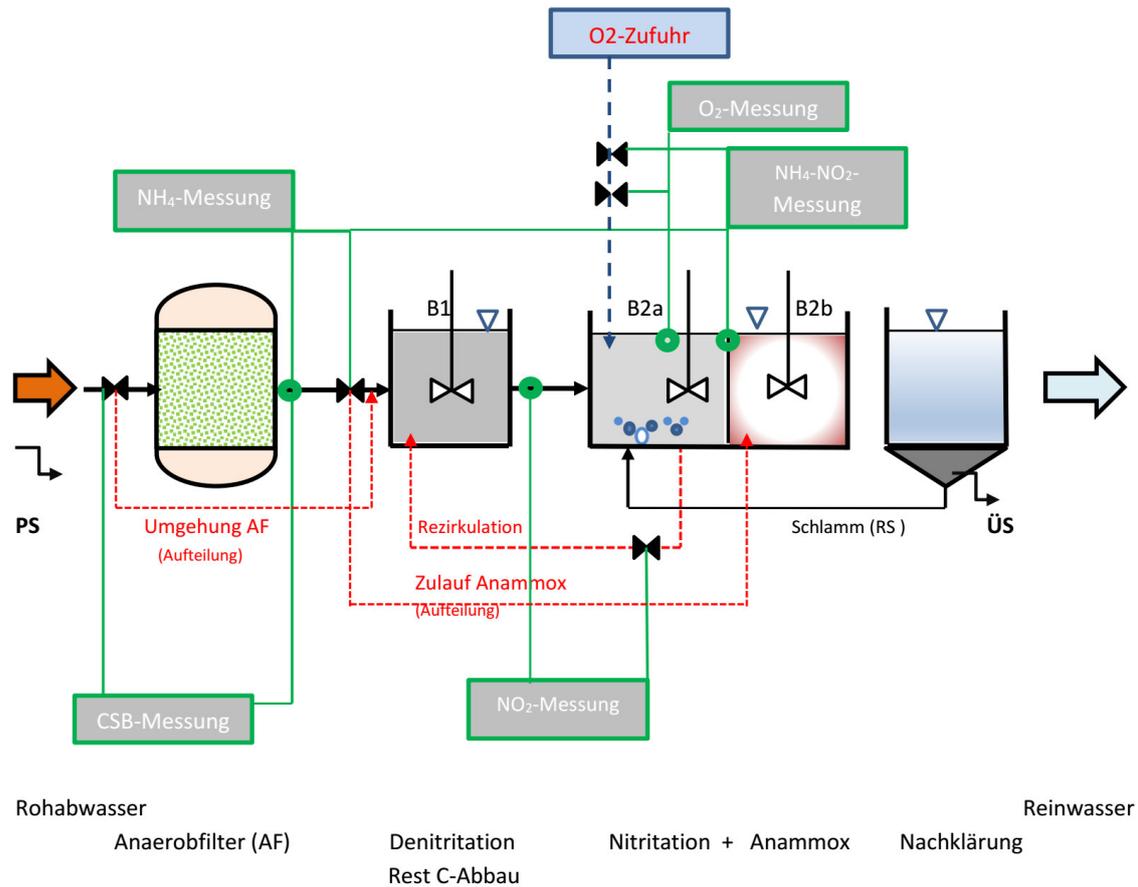


Abbildung 5.4.1: Steuer-/Regelkonzept Variante 3 Anaerobfilter (AF) + Denitrifikation + Nitritation + Anammox (PNA)

Durch die Einstellung des optimalen Rezirkulationsverhältnisses soll die Menge an rückgeführtem Nitrit der Menge des zufließenden Substrat (CSB) optimal angepasst werden. Die Nitritkonzentration wird im Ablauf des Denitrifikationsbehälters kontinuierlich gemessen und der Volumenstrom der Rezirkulation wird in Abhängigkeit des Nitritgehaltes geregelt. Bei Nitritgehalten größer 0 wird die Rezirkulation verringert, bei Nitritgehalten von 0 wird der Volumenstrom erhöht. Es sollen stufenlos regulierbare Pumpen eingesetzt werden.

Die Möglichkeit einen Teilstrom des Zulaufs zum Anaerobfilter in den Denitrifikationsbehälter zu leiten, zur Verbesserung des Kohlenstoffangebotes, kann für den Fall eines zu hohen Wirkungsgrades des Anaerobfilters (AF) interessant werden. Alternativ zur Aufteilung des Volumenstroms wäre das Denitrifikationsbecken intermittierend zum C-Abbau zu belüften.

■ Nitritation

Regelgrößen sind die O_2 -Konzentration im volldurchmischten Nitritationsbehälter und die NH_4 - und NO_2 -Konzentration im Ablauf des Nitritationsbehälters B2a. Das in der Versuchsdurchführung gewählte Belüftungskonzept 2 sollte insoweit modifiziert werden, dass die Belüftungspause auf z.B. 20 min vergrößert wird und dass eine Höchstgrenze für die Sauerstoffkonzentration von 0,5 mg/l einzuhalten ist.

Möglich wäre auch den O_2 -Gehalt durch einen kontinuierlichen Regler auf konstantem Niveau von z.B. 0,3 mg/l zu halten.

Stellglied ist die O_2 -Zufuhr.

■ Anammox

Der Anammox-Behälter B2b soll nachgeschaltet werden, um die Nitritstickstoffablaufwerte, insbesondere bei für die Denitrifikation ungünstigen Substratverhältnissen, zu verbessern, so dass die Einleiteanforderungen eingehalten werden, z.B. bei einem hohen Wirkungsgrad des AF von über 75%.

Hierfür ist es erforderlich ein optimales $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^-$ Verhältnis von 1,3 zu erzielen und das CSB-Angebot so zu gestalten, dass es nicht zu einer Verdrängung der Anammoxbakterien durch denitrifizierende Mikroorganismen im Behälter B2b kommt.

Regelgrößen wären die NH_4^- - und NO_2^- -Konzentrationen im Ablauf des Nitrifikationsbehälters B2a und die NH_4^- -Konzentration im Zulauf zum Denitrifikationsbehälter B1.

Stellglied wäre ein Regelventil vor dem Denitrifikationsbehälter B1, das die Zulaufmenge zum Anammoxbehälter entsprechend des erforderlichen Verhältnisses von $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^- = 1,3$ regelt.

Folgende Abwasservolumenströme müssen ebenfalls gemessen werden:

- Zulaufwassermengen AF und Denitrifikationsbehälter
- Rezirkulationsabwassermenge
- Zulaufwassermenge Anammox (Umgehung Denitrifikationsbehälter)
-

Durch diese Regelung kann auf unterschiedliche Substratangebote und CSB-Abbaugrade aufgrund von Temperaturschwankungen im AF reagiert werden.

Ein Vorteil dieses Verfahrenskonzepts wäre die Möglichkeit einer sukzessiven Umstellung eines klassischen Belebungsverfahrens mit Nitrifikation und Denitrifikation bei Beibehalt bzw. teilweiser Umnutzung vorhandener Behälter.

6. Resümée / Ausblick

Die Verfahrenskombinationen **Anaerobfilter mit nachgeschalteter zweistufiger Deammonifikation auch in Kombination mit einer Denitrifikation** verfügt über ein energetisch sehr großes Potential im Vergleich zum konventionellen Belebungsverfahren in der Abwasserreinigung.

Die Kombination aus der anaeroben Abwasserbehandlung zur Biogaserzeugung mit innovativen Verfahren der Stickstoffelimination verbessert die Energiebilanz einer Kläranlage wesentlich. Eine Kläranlage könnte **energieautark** betrieben werden, sogar Energie ins öffentliche Stromnetz einspeisen oder auf der Kläranlage, z.B. für eine Abwassererwärmung zur Verbesserung der biologischen Reinigungsleistung, einsetzen.

Die Verfahrenskombinationen mit einem **Anaerobfilter** und der **Deammonifikation** hat auch eine große Bedeutung für die Praxis hinsichtlich der Problematik der Klärschlamm Entsorgung /-verwertung aufgrund des geringeren Schlammanfalls im Vergleich zu herkömmlichen Abwasserreinigungsverfahren.

Aufgrund der Versuchsdurchführung und der Versuchsergebnisse sollten bei der **weiteren praktischen Erprobung**, Umsetzung und Verbreitung der Verfahrenskombination folgende Aspekte beachtet bzw. geklärt werden:

- Entwicklung / Anreicherung Anammoxbakterien
Es wird empfohlen, sich Anammoxbakterien von anderen Kläranlagen zu beschaffen und während des Betriebes Schlammuntersuchungen durch die Gensondentechnologie durchzuführen.
- Temperaturen
Es muss untersucht werden, ob sich die einzelnen Verfahrensprozesse, insbesondere der Anaerobfilter und Anammox, bei tieferen Temperaturen noch beherrschen lassen und die energetischen Vorteile auf das gesamte Jahr bestehen. In diesem Zusammenhang sollten alle Möglichkeiten, konstante Abwassertemperaturen ($\geq 20^\circ\text{C}$) zu erzielen, wie Aufwärmung des Abwassers unter Nutzung von Solarenergie, Speicherung von Energie (evtl. im Boden), Nutzung der Wärme aus der Schlammfäulung und Einsatz modernster Dämmtechnik beim Anaerobfilter, miteinbezogen werden.
- Fremdwasser
Die Funktionalität des Anaerobfilters bei noch geringeren Abwasserkonzentrationen durch Fremdwasser, was im kommunalen Abwasser sehr häufig zu beobachten ist, muss weiter untersucht werden.
- Mess-, Steuer- und Regeltechnik
Schwankende Abwassermengen (Tagesgang), unterschiedliche Fremdwassermengen und Temperaturen, vor Allem im Jahresgang, müssen durch entsprechende Prozessführung unter Berücksichtigung einer abgestimmten Mess-, Steuer- und Regeltechnik beherrscht werden. Online-Messungen sind hierfür Voraussetzung.

Insgesamt wird empfohlen, die favorisierten Verfahrenskonzepte 3 und 2 in einer Versuchsanlage im **halbtechnischen Maßstab**, die auf einer Kläranlage positioniert werden sollte, zu erproben. Dabei sollte diese Versuchsanlage mit dem auf der Kläranlage anfallenden Abwasser beschickt werden, damit realistische, keine optimierten Bedingungen bzgl. Temperaturen, Schwankungen und Fremdwasser erforscht werden können. Im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtungsweise sollten Biogasmessungen und Messungen der emissionsrelevanten Gase

(Lachgas, CO₂, CH₄) parallel erfolgen. Gerade auf die Problematik der **tatsächlichen Lachgasemissionen** sei an dieser Stelle nochmals hingewiesen.

Als Grundsatz muss gelten, dass die **vordringlichste Aufgabe einer kommunalen Kläranlage** zunächst der **Gewässerschutz** ist, d.h. eine Reduzierung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen darf nicht zu Lasten der sicheren Einhaltung der Einleitewerte gehen.

Literaturverzeichnis

- Abeling, U., 1994. "Stickstoffelimination aus Industrieabwässern. – Denitrifikation über Nitrit -", Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 86
- ATV-DVWK-A131, 2000. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall: „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“
- ATV-DVWK-A198, 2003. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall: „Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen“
- Austermann-Haun, U., 1997. „Inbetriebnahme anaerober Festbettreaktoren“ – Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 93
- Beier, M./Rosenwinkel K.-H., 2015. „Lachgasemissionen auf Kläranlagen“. Energieeffiziente Verfahren der Stickstoffelimination; Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft TU München
- Benningshaus, H., 2005: „Deskriptive Statistik – Eine Einführung für Sozialwissenschaftler“, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 10 durchgesehene Auflage, Juni 2005, Wiesbaden, ISBN 3-531-14507-6
- Bever, J., Teichmann, H., 1990. „Weitergehende Abwasserreinigung“ – Lehrbriefsammlung, Oldenburger Verlag
- Castro-Barros, C., Daelman, M., Mampaey, K.E., van Loosdrecht, M.C., Volcke, E.I.P., 2013. Dynamics of N₂O emission from partial nitrification-anammox in a full-scale granular sludge reactor. Proc. from 9th Int. Conf. Biofilm React. 532 28-31th May, Paris. 68, 793–803. doi:10.1016/j.watres.2014.10.056
- Cornelius, A., 2008. Untersuchungen zum großtechnischen Einsatz der Deammonifikation bei der Schlammwasserbehandlung. Dissertation an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
- DWA-Themen 2016. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) "Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen"; Themenband T4/ Oktober 2016
- Elmitvalli, T., 2005. Treatment of Municipal wastewater in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor
- FLEXBIO Technologie, 2015: Bedienungsanleitung Versuchsstand Belebtschlamm-Kläranlage BS 1050

- Gilbert, E.M., 2014. Partielle Nitritation / Anammox bei niedrigen Temperaturen
Schriftenreihe Bereich Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut,
Karlsruher Institut für Technologie Nr.62, Herausgeber Harald Horn
- Haberkern, B., Maier, W., Schneider, U., 2008. Steigerung der Energieeffizienz auf
Kläranlagen. i.A. des Umweltbundesamtes
- Hartmann, L., 1992. "Biologische Abwasserreinigung"
- Hartwig, P., 2013. Nutzung der Energiebilanzierung über CSB zur Erarbeitung
energieeffizienter Betriebsweisen am Beispiel der kombinierten industriellen und
kommunalen Abwasserbehandlung. Industrietage - Wassertechnik, 2013 Fulda
- Hennerkes, J., Thöle, D., 2011. "Automatisierte Trübwasserbehandlung durch anaerobe
Ammoniumoxidation auf der Kläranlage Plettenberg"; DWA-Seminar "Mess- und
Regeltechnik" in Fulda
- Hobus, I., 2010. Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Präsentation
Wupperverbandsgesellschaft
- Horn, H., Rapp-Fiegler, S., 2009. Forschungsvorhaben "Kläranlage der Zukunft"
Themenbereiche Faulgasproduktion, Anaerobtechnik und Deammonifikation
- Jenni/ Jenni, 2014. aus 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft 2016
"Wasserwirtschaft 4.0", Hrsg. Prof.Dr. Ing. J. Pinnekamp
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H.(Hrsg.), 2009. Energie aus Biomasse. 2.Auflage,
Springer Verlag
- Koppe, P./ Stozek, A., 1999. Kommunales Abwasser, 4. Auflage, Vulkan-Verlag Essen
- Krebs, P., 2012. Modellierung von Abwassersystemen. Technische Universität Dresden
- Kubin, K., 2004. Einfluss unterschiedlicher Verfahrenskonzepte auf Substratabbau und
Nährstoffverwertung in Membranbelebungsanlagen zur kommunalen
Abwasserreinigung.
- Kunst, S., Mudrack, K., 2010. Biologie der Abwasserreinigung. 5.Auflage
Spektrum Akademischer Verlag
- Lackner S., 2015. Grundlagen der Verfahrenstechnik im Bereich Wasser - Biofilmverfahren.
Vorlesungsskript Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

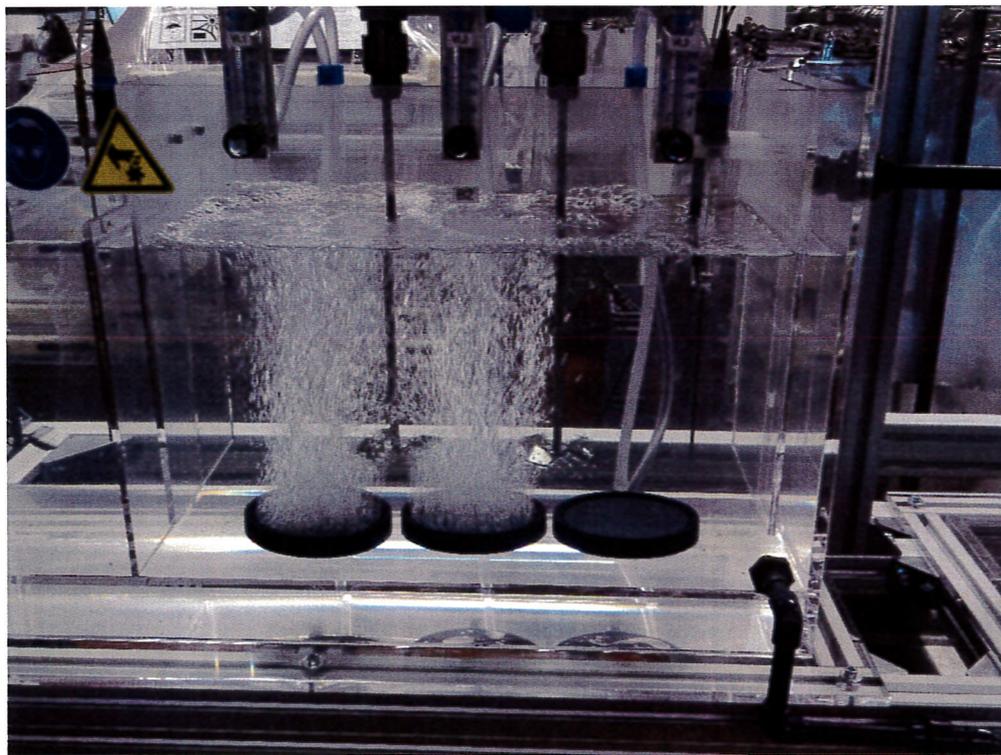
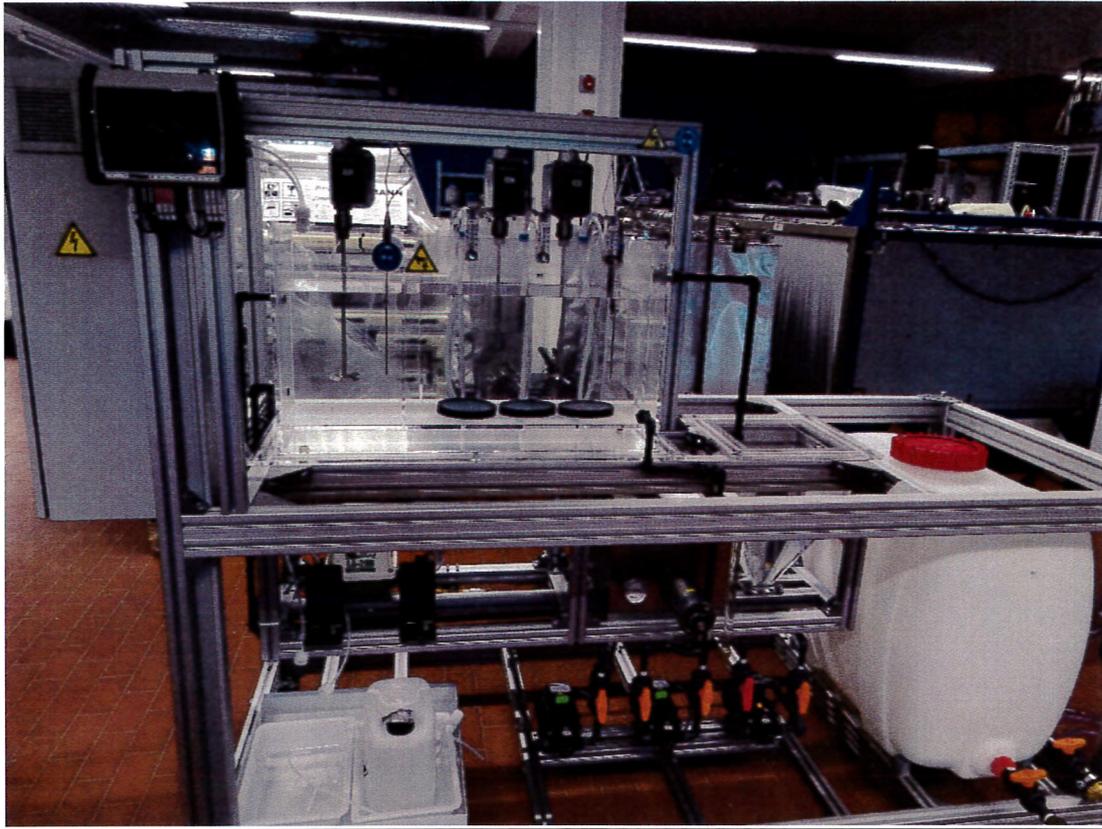
- Linke, B./ Vollmer, G./ Mähnert, P., 2006: Schlussbericht zum Verbundvorhaben "Kinetik der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen bei kontinuierlicher Prozessführung als Grundlage für die Bemessung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen"; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, (FNR, Hrsg.), Gülzow 2006
- Loosen, F., 2012. "Aufbau und Optimierung eines Festbettreaktors im Technikmaßstab", Masterthesis im Studiengang "Nachwachsende Rohstoffe und Erneuerbare Energien" der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., Stahl, D.A., Clark, D.P., 2012. Biology of Mikroorganismen, in: Biology of Mikroorganismen. Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings, 1301 Sansome Street, San Francisco, CA 94111, pp. 64, 65, 172, 176.
- Mergelmeyer, M., Kolisch, G., 2014. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Energie und Klimaschutz, Projekt Nr.2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen"
- Milke, H., Sahlbach, T., 2014. Siedlungswasserwirtschaft in Beispielen. BundesanzeigenVerlag
- Mumme, J., 2008. "Vergärung nachwachsender Rohstoffe im Aufstromverfahren"; dissertation.de-Verlag im Internet GmbH, Berlin 2008, ISBN 978-3-86624-347-7
- Remy, C., Lesjean, B., Hartmann A., 2011. Die Methodik der Ökobilanz zur ganzheitlichen Erfassung des Energieverbrauchs in der Abwasserreinigung. Korrespondenz Abwasser (KA) 06/2011
- Remy, C. H., 2012. Ökobilanzen in der Abwasserbehandlung - erste Erfahrungen aus Berlin und Braunschweig. Berliner Wasserwerkstatt 03/2012
- Remy, C., Boulestreau, M., Lesjean, B., 2015. "Vom Klärwerk zum Kraftwerk", wwt 4/2015
- Reuters, R., 2011. Methodenvergleich und -erweiterung zur Vorhersage der Biogasausbeute - Bachelorarbeit
- Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F., Weiland, P., 2015. Anaerobtechnik 3.Auflage. Springer Vieweg Verlag
- Rosenwinkel, K.-H., Hinken, L., Borchmann, A., Beier, M. 2011. Innovationen bei der Abwasserbehandlung und Auswirkungen auf den Energieverbrauch. Energietage-Biogas Kassel
- Rudolph, K., Bombeck, M., Harbach, M., Fuhrmann, T., 2009. Stufenausbaukonzepte für kommunale Kläranlagen unter verschiedenen landes spezifischen Randbedingungen.

- Sander, M., 2013. Dynamische Modellierung der einstufigen Deammonifikation - Modellerweiterung. Dissertation an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
- Schäpers, D./ Grömping, M./ Montag, D./ Pinnekamp, J., 2016. "Deammonifikation im Hauptstrom - Perspektiven und Ansätze" aus: Gewässerschutz-Wasser-Abwasser (GWA) A239, 2016; 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft "Wasserwirtschaft4.0"; Hrsg. Prof.Dr.Ing. J. Pinnekamp
- Schöttle, 2012. Vorlesungsskript Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg - Akademie für Erneuerbare Energien Lüchow - "Grundlagen des anaeroben Abbaus von Biomasse durch Mikroorganismen"
- Snaidr, J., 2016. "Das Ende der Black Box: Kontrolle der Mikroorganismen im Abwasser mit dem VIT-Frühwarnsystem"; gWf-Wasser/ Abwasser
- Strous, M., 2000. Microbiology of anaerobic ammonium oxidation. Dissertation TU Delft
- Strous, M., 2006. "Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome". In: Nature, Band 440, Nr. 7085, S. 790 - 794. PMID 16598256
- Thormeyer, K., 2009. Handlungsempfehlungen zum optimierten Betrieb von IC Reaktoren. Vortrag Bauhaus Universität Weimar
- Van Lier, J.B./ Rebac, S./ Lettinga, G., 1997. "High-rate anaerobic wastewater treatment under psychrophilic and thermophilic conditions", Water science and technology 35 (10), 1997
- Vollerthun, T., 2008. Potenziale der Energiegewinnung in der Abwasserbehandlung. Vortrag Abwasserforum Otzenhausen
- Warthmann, R., Kühni, M., Baier, U., 2010. Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz.
- Weissenbacher, N., Wett, B., De Clippleir, H., Hell, M., 2013. Hauptstromdeammonifikation in Kläranlagen. Österreichisches Bundesministerium für Land-und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
- WILO Pumpen Intelligenz, 2010. Abwassertechnik für die Wasserwirtschaft.

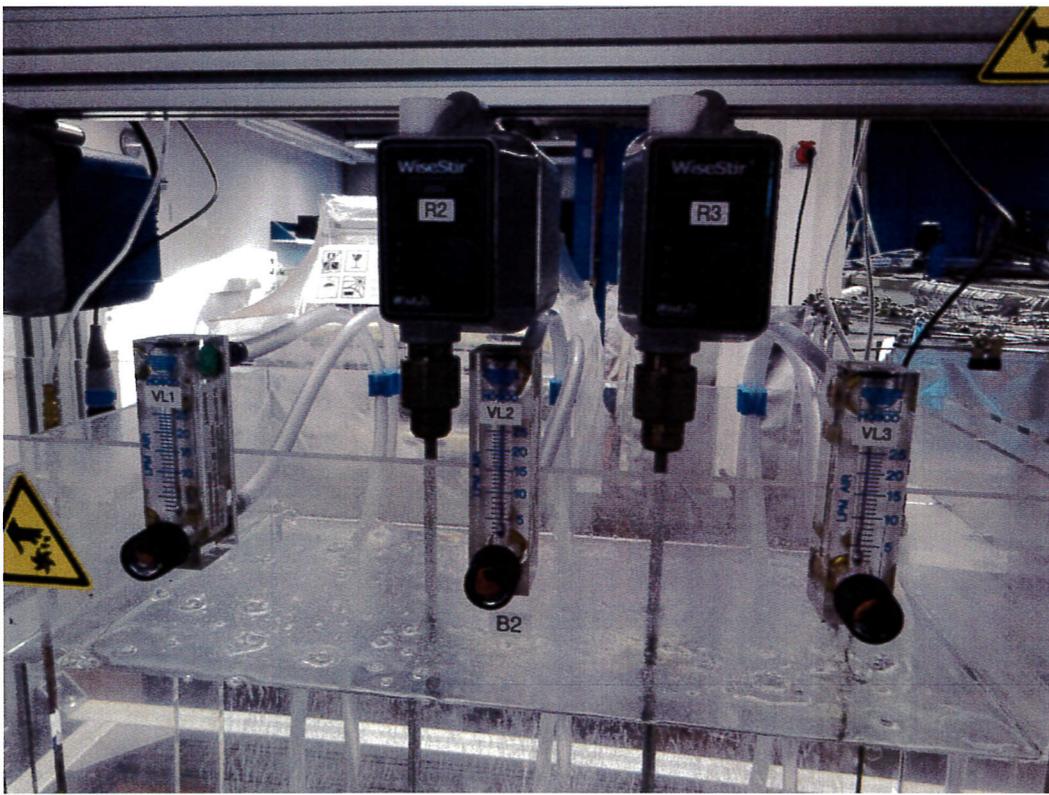
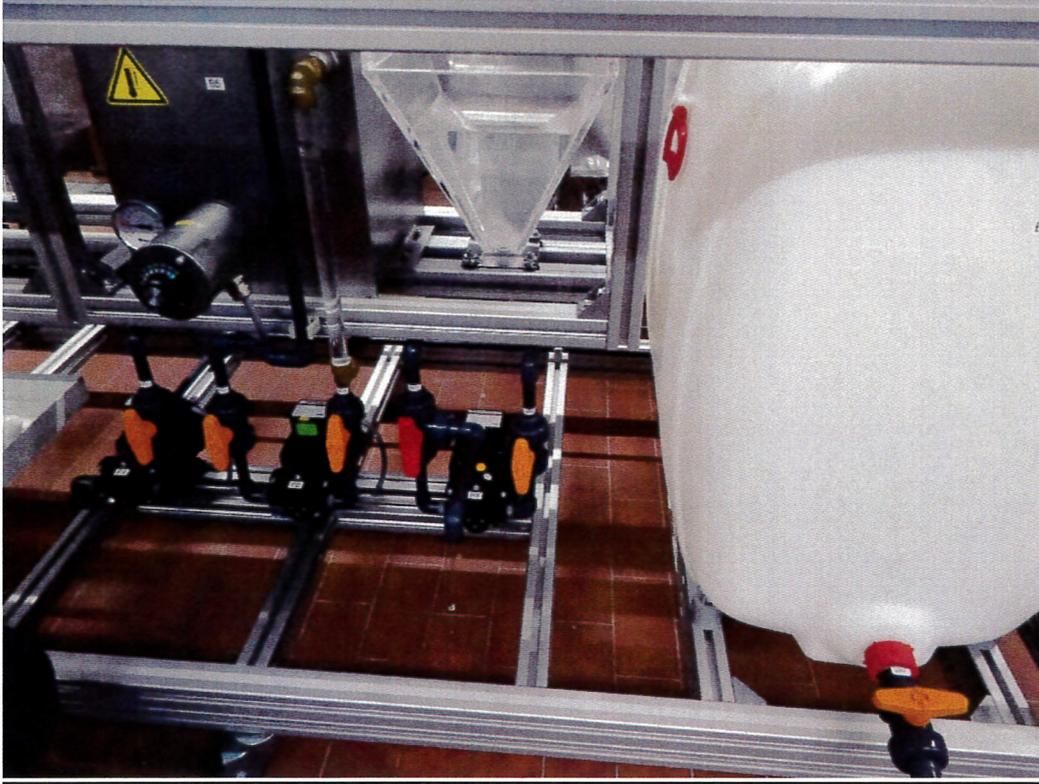
Anhang

- Anlage A I: Fotos Versuchsanlage
- Anlage A II: „Synthetisches Abwasser“
- Anlage A III: Volumenbemessung Belebungsbecken
- Anlage A IV: Formblätter/ Protokolle/Messprogramm/Analysemethoden
- Anlage A V: Tabelle Biogasanalytik
- Anlage A VI: Tabelle CSB- /N- Analytik und Diagramme CSB-/ N-Analytik
- Anlage A VII: ALMEMO-Auswertung; Auswahl
- Anlage A VIII-1: Bemessungsdaten: Durchflüsse und Frachten
- Anlage A VIII-2: CSB-Bilanz
- Anlage A VIII-3: Energieausbeute elektrisch
- Anlage A VIII-4: Sauerstoffverbrauch Kohlenstoff-/Stickstoffelimination der Varianten 1-3
- Anlage A VIII-5: Energiebilanz elektrisch
- Anlage A VIII-6: Stickstoffbilanz
- Anlage A VIII-7: Treibhausgasbilanz
- Anlage A IX - Abbildung A I: Anammox-Bakterien – Zellaufbau
[Madigan et al./ 2012]
- Anlage A X: Ermittlung Sauerstoffbedarf
- Anlage A XI: Grundlagen Treibhausgasbilanz

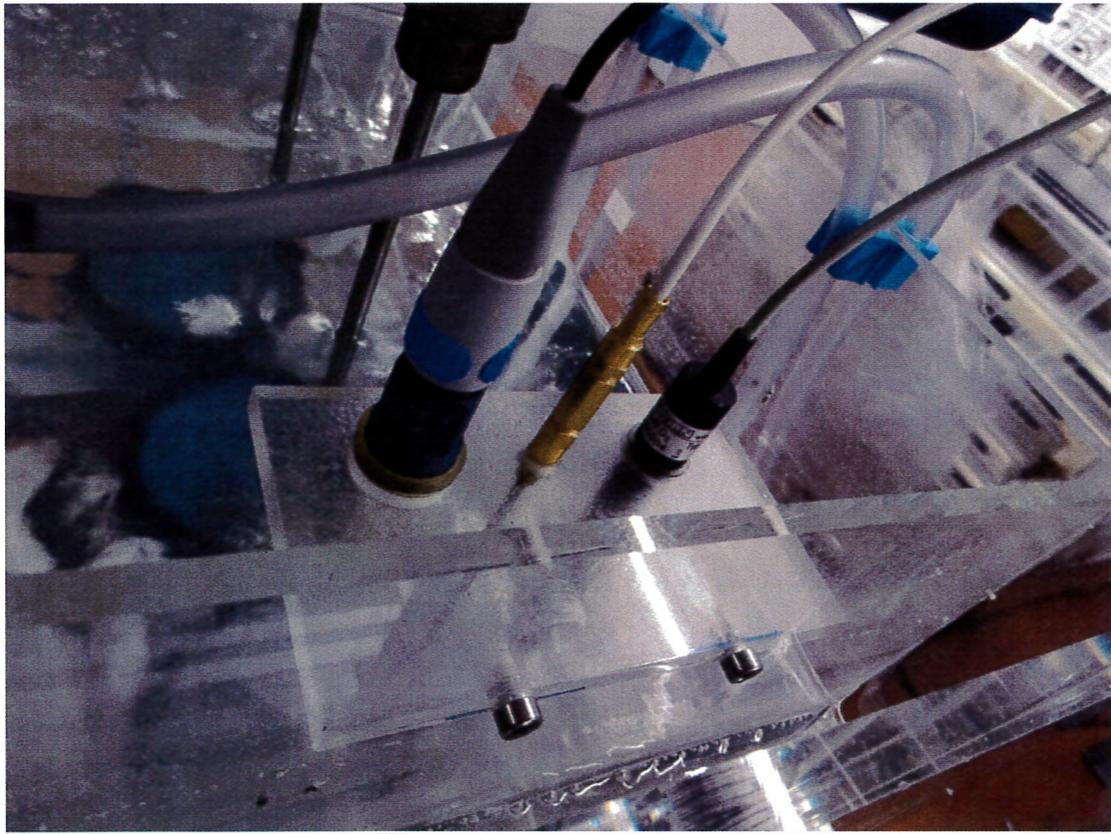
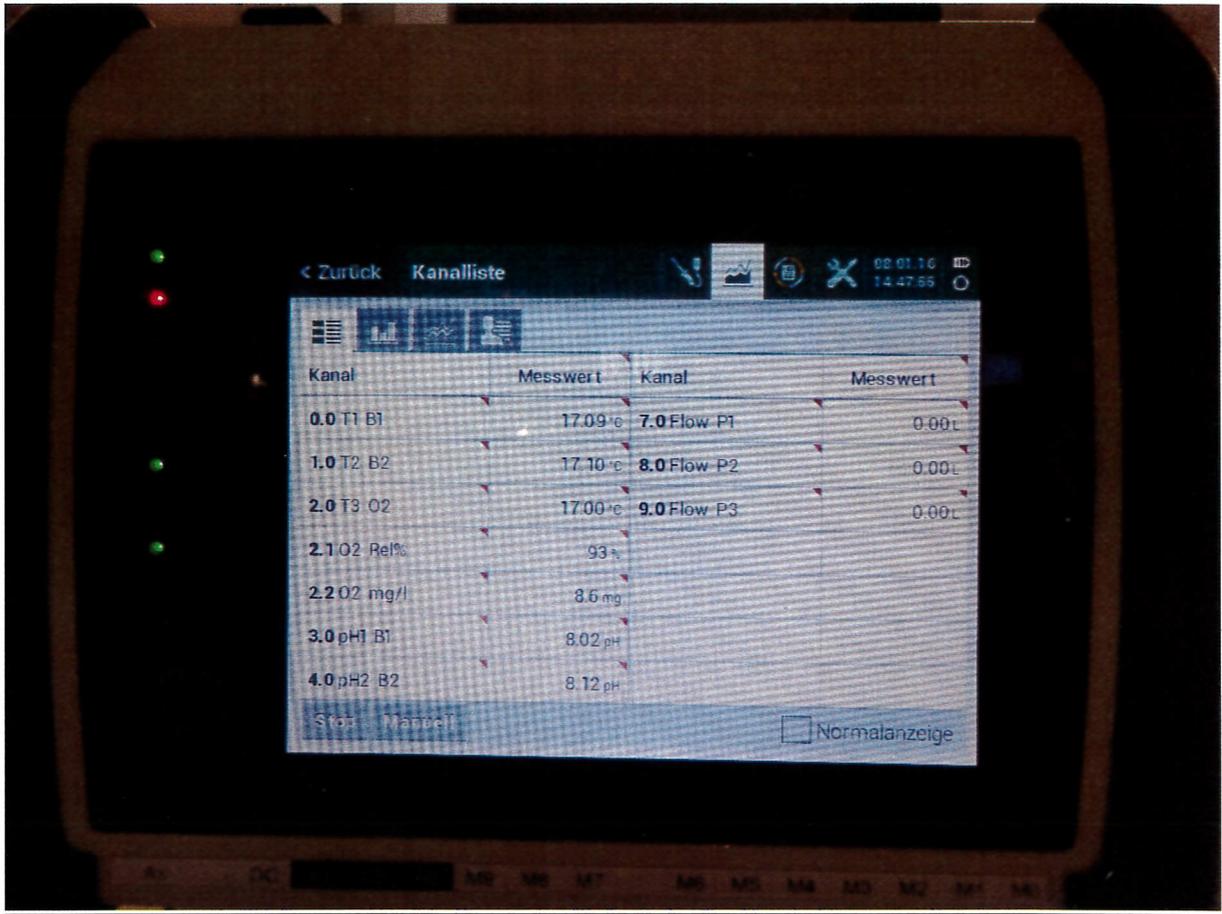
1.Belebtschlammanlage



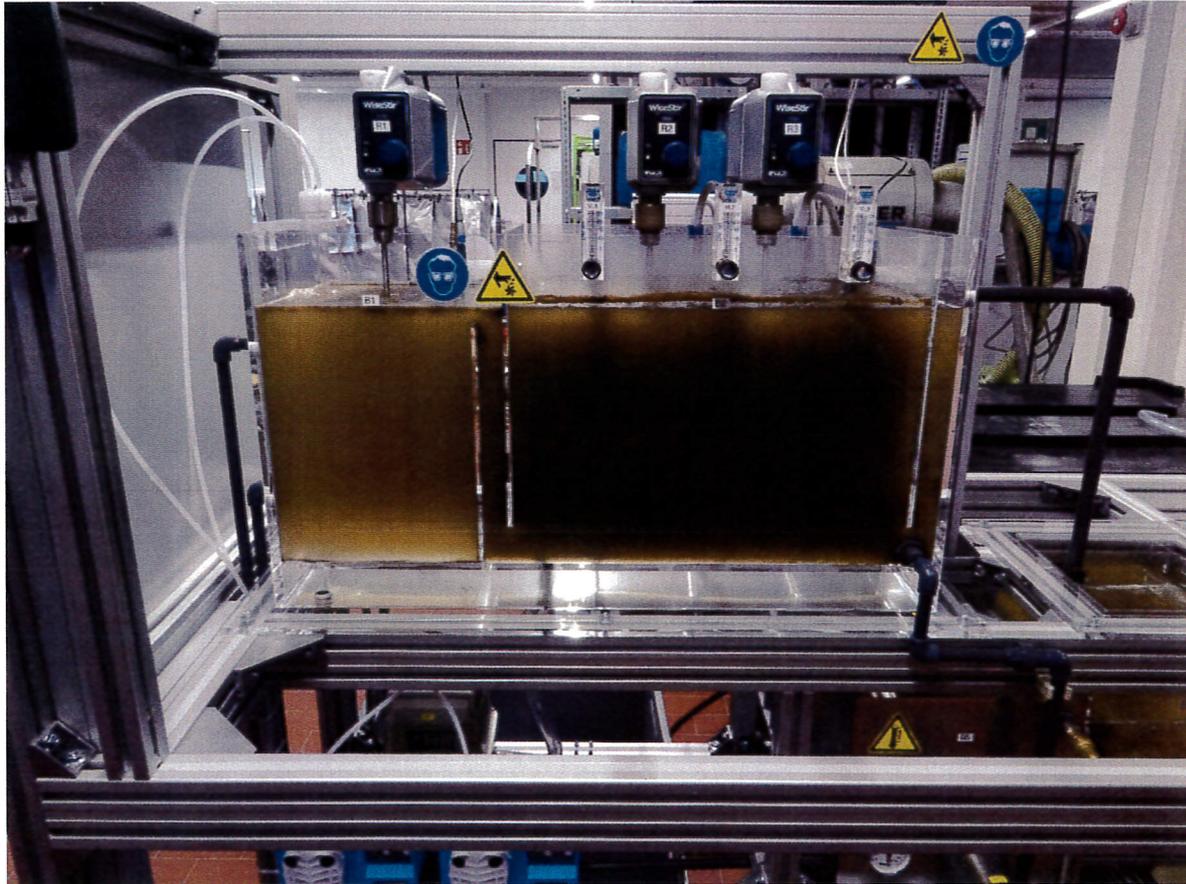
A1



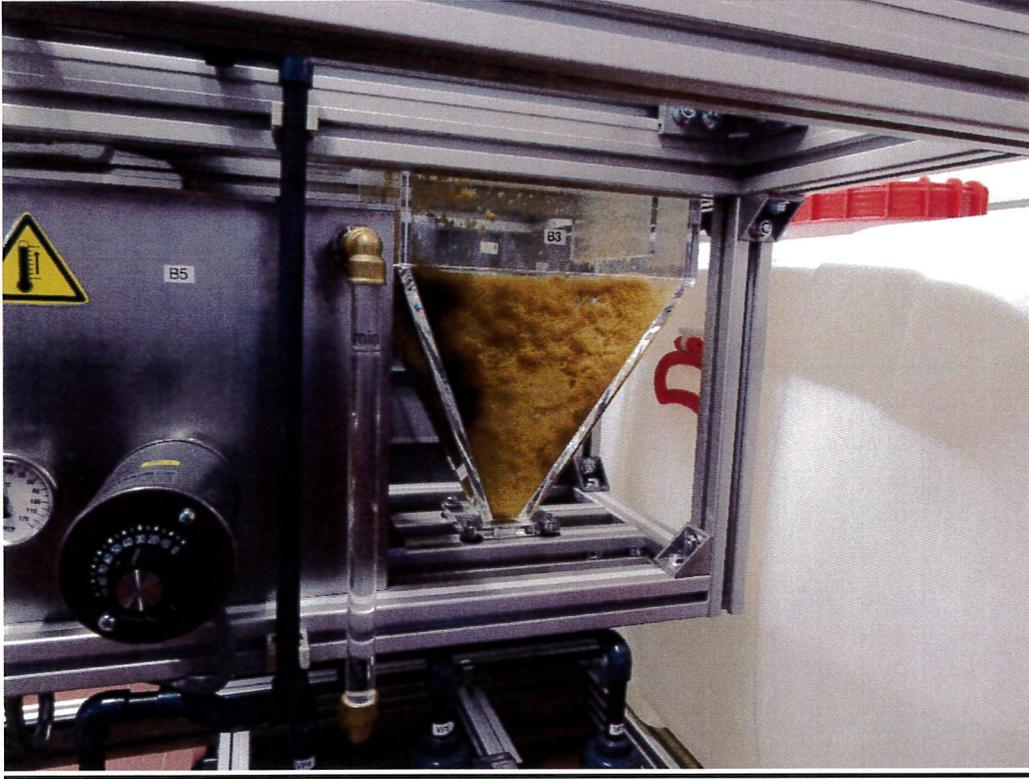
AI



A1



A I



2. Anaerobfiter:





Synthetisches Abwasser

ANLAGE A II

Synthetisches Abwasser gemäß Norm

in Anlehnung auf DIN 38412-26, um Kohlenwasserstoffe angepasst

| Substanz | Menge | Einheit |
|---|--------------|-------------|
| Pepton aus Casein | 160 | mg |
| Fleischextrakt | 110 | mg |
| Harnstoff (CH ₂ N ₂ O) | 30 | mg |
| Dikaliumhydrogenphosphat (K ₂ HPO ₄) | 28 | mg |
| Natriumchlorid (NaCl) | 7 | mg |
| Calciumchlorid (CaCl ₂ • 2H ₂ O) | 4 | mg |
| Magnesiumsulfat (MgSO ₄ • 7H ₂ O) | 2 | mg |
| Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃) | 98 | mg |
| Glucose (C ₆ H ₁₂ O ₆ • xH ₂ O) | 30 | mg |
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ • xH ₂ O) | 55 | mg |
| Stärke (C ₆ H ₁₀ O ₅ • xH ₂ O) | 100 | mg |
| Cellulose (C ₁₂ H ₂₀ O ₁₀ • xH ₂ O) | 100 | mg |
| Trinkwasser DOC < 2 mg/l | 1000 | ml |
| CSB | 701,7 | mg/l |
| org. N | 48,6 | mg/l |

Hinweis: Als Chemikalien werden, soweit erhältlich, solche des Reinheitsgrades „zur Analyse“, als Wasser wird deionisiertes oder Wasser vergleichbaren Reinheitsgrades bzw. Trinkwasser eingesetzt.

| Substanz | CSB | org. N | Einheit |
|---|------|--------|---------|
| Pepton aus Casein | 1470 | 140 | mg/g |
| Fleischextrakt | 1120 | 110 | mg/g |
| Harnstoff (CH ₂ N ₂ O) | 267 | 467 | mg/g |
| Glucose (C ₆ H ₁₂ O ₆ • xH ₂ O) | 1067 | 0 | mg/g |
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ • xH ₂ O) | 1123 | 0 | mg/g |
| Stärke (C ₆ H ₁₀ O ₅ • xH ₂ O) | 1185 | 0 | mg/g |
| Cellulose (C ₁₂ H ₂₀ O ₁₀ • xH ₂ O) | 1185 | 0 | mg/g |

Das täglich erforderliche Volumen dieses synthetischen Abwassers wird aus folgenden Lösungen hergestellt:

Lösung A:

| Substanz | Menge | Einheit |
|---|-------|---------|
| Pepton aus Casein | 64 | g |
| Fleischextrakt | 44 | g |
| Harnstoff | 12 | g |
| Natriumchlorid (NaCl) | 2,8 | g |
| Calciumchlorid (CaCl ₂ • 2H ₂ O) | 1,6 | g |
| Magnesiumsulfat (MgSO ₄ • 7H ₂ O) | 0,8 | g |
| Trinkwasser | 1000 | ml |

Hinweis: Dieses Nährstoff-Konzentrat ist tiefgekühlt bis zu 6 Monaten haltbar.

1 Liter Lösung A reicht für 400 l synthetisches Abwasser

Nach Herstellung in 1 Liter PE-Flasche lagern!

PE-Flasche mit wasserfestem Filzstift beschriften:

Lösung:

Datum:

Name:

Lösung B:

| Substanz | Menge | Einheit |
|---|-------|---------|
| Dikaliumhydrogenphosphat (K ₂ HPO ₄) | 67 | g |
| deionisiertes Wasser | 1000 | ml |

Lösung C (wahlweise):

| Substanz | Menge | Einheit |
|---|-------|---------|
| Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃) | 47 | g |
| deionisiertes Wasser | 1000 | ml |

Lösung d:

| Substanz | Menge | Einheit |
|---|-------|---------|
| Glucose (C ₆ H ₁₂ O ₆ • xH ₂ O) | 15,0 | g |
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ • xH ₂ O) | 27,5 | g |
| Stärke (C ₆ H ₁₀ O ₅ • xH ₂ O) | 50,0 | g |
| Cellulose (C ₁₂ H ₂₀ O ₁₀ • xH ₂ O) | 50,0 | g |
| deionisiertes Wasser | 1000 | ml |

Folgende Volumina der Lösungen A, B, C werden zur Herstellung von synthetischen Abwassers benötigt:

| Menge Synthetisches Abwasser [l]: | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|-----------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Lösung A [ml] | 25,0 | 50,0 | 75,0 | 100,0 | 125,0 | 150,0 | 175,0 | 200,0 | 225,0 | 250,0 |
| Lösung B [ml] | 4,2 | 8,3 | 12,5 | 16,7 | 20,8 | 25,0 | 29,2 | 33,3 | 37,5 | 41,7 |
| Lösung C [ml] | 20,8 | 41,7 | 62,5 | 83,3 | 104,2 | 125,0 | 145,8 | 166,7 | 187,5 | 208,3 |
| Lösung D [ml] | 20,1 | 40,1 | 60,2 | 80,2 | 100,3 | 120,3 | 140,4 | 160,4 | 180,5 | 200,5 |
| Trinkwasser [l] | 9,95 | 19,9 | 29,85 | 39,8 | 49,75 | 59,7 | 69,65 | 79,6 | 89,55 | 99,5 |

Das synthetische Abwasser frisch hergestellt verwenden!

Ansatzprotokoll

Herstellung vom synthetischen Abwasser

Datum: _____

Name: _____

Menge Synthetisches Abwasser [l]:

| | Lösung vom (Datum) | Einwaage |
|-----------------|--------------------|----------|
| Lösung A [ml] | | |
| Lösung B [ml] | | |
| Lösung C [ml] | | |
| Lösung D [ml] | | |
| Trinkwasser [l] | | |

A II

Synthetisches Abwasser

In Anlehnung auf DIN 38412-26, CSB Konzentration durch Zugabe vom Zucker erhöht.

| Substanz | Menge Einheit |
|---|-------------------|
| Pepton aus Casein | 0 mg |
| Fleischextrakt | 120 mg |
| Harnstoff (CH ₄ N ₂ O) | 80 mg |
| Dikaliumhydrogenphosphat (K ₂ HPO ₄) | 28 mg |
| Natriumchlorid (NaCl) | 7 mg |
| Calciumchlorid (CaCl ₂ • 2H ₂ O) | 4 mg |
| Magnesiumsulfat (MgSO ₄ • 7H ₂ O) | 2 mg |
| Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃) | 98 mg |
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ • xH ₂ O) | 490 mg |
| Trinkwasser DOC < 2 mg/l | 1000 ml |
| CSB | 705,9 mg/l |
| org. N | 50,5 mg/l |

Hinweis: Als Chemikalien werden, soweit erhältlich, solche des Reinheitsgrades „zur Analyse“, als Wasser wird deionisiertes oder Wasser vergleichbaren Reinheitsgrades bzw. Trinkwasser eingesetzt.

| Substanz | CSB | org. N | Einheit |
|--|------|--------|---------|
| Pepton aus Casein | 1470 | 140 | mg/g |
| Fleischextrakt | 1120 | 110 | mg/g |
| Harnstoff (CH ₄ N ₂ O) | 267 | 467 | mg/g |
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁) | 1123 | 0 | mg/g |

Das täglich erforderliche Volumen dieses synthetischen Abwassers wird aus folgenden Lösungen hergestellt:

Lösung A:

| Substanz | Menge Einheit |
|---|---------------|
| Pepton aus Casein | 0 g |
| Fleischextrakt | 24 g |
| Harnstoff | 16 g |
| Natriumchlorid (NaCl) | 1,4 g |
| Calciumchlorid (CaCl ₂ • 2H ₂ O) | 0,8 g |
| Magnesiumsulfat (MgSO ₄ • 7H ₂ O) | 0,4 g |
| Trinkwasser | 957,4 ml |

Einwaage

| Menge | Einheit |
|-------|---------|
| | g |
| | g |
| | g |
| | g |
| | g |
| | ml |

Hinweis: Dieses Nährstoff-Konzentrat ist tiefgekühlt bis zu 6 Monaten haltbar.

Lösung B:

| Substanz | Menge Einheit |
|---|---------------|
| Dikaliumhydrogenphosphat (K ₂ HPO ₄) | 33,5 g |
| deionisiertes Wasser | 966,5 ml |

Einwaage

| Menge | Einheit |
|-------|---------|
| | g |
| | ml |

Lösung C (wahlweise):

| Substanz | Menge Einheit |
|---|---------------|
| Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃) | 47 g |
| deionisiertes Wasser | 953 ml |

Einwaage

| Menge | Einheit |
|-------|---------|
| | g |
| | ml |

Lösung D:

| Substanz | Menge Einheit |
|---|---------------|
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ • xH ₂ O) | 122,5 g |
| deionisiertes Wasser | 1000 ml |

Einwaage

| Menge | Einheit |
|-------|---------|
| | g |
| | ml |

Folgende Volumina der Lösungen A, B, C und D werden zur Herstellung von synthetischen Abwassers benötigt:

| Menge Synthetisches Abwasser [l]: | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 200 | 400 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Lösung A [ml] | 250,0 | 300,0 | 350,0 | 400,0 | 450,0 | 500,0 | 1000,0 | 2000,0 |
| Lösung B [ml] | 41,7 | 50,0 | 58,3 | 66,7 | 75,0 | 83,3 | 166,7 | 333,3 |
| Lösung C [ml] | 208,3 | 250,0 | 291,7 | 333,3 | 375,0 | 416,7 | 833,3 | 1666,7 |
| Lösung D [ml] | 200,0 | 240,0 | 280,0 | 320,0 | 360,0 | 400,0 | 800,0 | 1600,0 |
| Trinkwasser [l] | 49,5 | 59,4 | 69,3 | 79,2 | 89,1 | 99 | 198 | 396 |

A II

Synthetisches Abwasser

In Anlehnung auf DIN 38412-26, CSB Konzentration durch Zugabe vom Zucker erhöht.

| Substanz | Menge Einheit |
|---|-------------------|
| Pepton aus Casein | 160 mg |
| Fleischextrakt | 110 mg |
| Harnstoff (CH ₄ N ₂ O) | 30 mg |
| Dikaliumhydrogenphosphat (K ₂ HPO ₄) | 28 mg |
| Natriumchlorid (NaCl) | 7 mg |
| Calciumchlorid (CaCl ₂ • 2H ₂ O) | 4 mg |
| Magnesiumsulfat (MgSO ₄ • 7H ₂ O) | 2 mg |
| Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃) | 98 mg |
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ • xH ₂ O) | 300 mg |
| Trinkwasser DOC < 2 mg/l | 1000 ml |
| CSB | 706,9 mg/l |
| org. N | 48,6 mg/l |

Hinweis: Als Chemikalien werden, soweit erhältlich, solche des Reinheitsgrades „zur Analyse“, als Wasser wird deionisiertes oder Wasser vergleichbaren Reinheitsgrades bzw. Trinkwasser eingesetzt.

| Substanz | CSB | org. N | Einheit |
|--|------|--------|---------|
| Pepton aus Casein | 1470 | 140 | mg/g |
| Fleischextrakt | 1120 | 110 | mg/g |
| Harnstoff (CH ₄ N ₂ O) | 267 | 467 | mg/g |
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁) | 1123 | 0 | mg/g |

Das täglich erforderliche Volumen dieses synthetischen Abwassers wird aus folgenden Lösungen hergestellt:

Lösung A:

| Substanz | Menge Einheit |
|---|------------------------|
| Pepton aus Casein | 32 g <i>64</i> |
| Fleischextrakt | 22 g <i>44</i> |
| Harnstoff | 6 g <i>12</i> |
| Natriumchlorid (NaCl) | 1,4 g <i>2,8</i> |
| Calciumchlorid (CaCl ₂ • 2H ₂ O) | 0,8 g <i>1,6</i> |
| Magnesiumsulfat (MgSO ₄ • 7H ₂ O) | 0,4 g <i>0,8</i> |
| Trinkwasser | 937,4 ml <i>1874,8</i> |

Einwaage

| Menge | Einheit |
|---------------|---------|
| <i>64</i> | g |
| <i>44</i> | g |
| <i>12,03</i> | g |
| <i>2,8</i> | g |
| <i>1,59</i> | g |
| <i>0,78</i> | g |
| <i>1874,8</i> | ml |

Hinweis: Dieses Nährstoff-Konzentrat ist tiefgekühlt bis zu 6 Monaten haltbar.

Lösung B:

| Substanz | Menge Einheit |
|---|---------------|
| Dikaliumhydrogenphosphat (K ₂ HPO ₄) | 33,5 g |
| deionisiertes Wasser | 966,5 ml |

Einwaage

| Menge | Einheit |
|-------|---------|
| | g |
| | ml |

Lösung C (wahlweise):

| Substanz | Menge Einheit |
|---|---------------|
| Natriumhydrogencarbonat (NaHCO ₃) | 47 g |
| deionisiertes Wasser | 953 ml |

Einwaage

| Menge | Einheit |
|--------------|---------|
| <i>47</i> | g |
| <i>953,0</i> | ml |

Lösung D:

| Substanz | Menge Einheit |
|---|---------------------|
| Zucker/Saccharose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ • xH ₂ O) | 75,0 g <i>150</i> |
| deionisiertes Wasser | 1000 ml <i>2000</i> |

Einwaage

| Menge | Einheit |
|---------------|---------|
| <i>150,0</i> | g |
| <i>2000,0</i> | ml |

Folgende Volumina der Lösungen A, B, C und D werden zur Herstellung von synthetischen Abwassers benötigt:

| Menge Synthetisches Abwasser [l]: | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 200 | 400 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Lösung A [ml] | 250,0 | 300,0 | 350,0 | 400,0 | 450,0 | 500,0 | 1000,0 | 2000,0 |
| Lösung B [ml] | 41,7 | 50,0 | 58,3 | 66,7 | 75,0 | 83,3 | 166,7 | 333,3 |
| Lösung C [ml] | 208,3 | 250,0 | 291,7 | 333,3 | 375,0 | 416,7 | 833,3 | 1666,7 |
| Lösung D [ml] | 200,0 | 240,0 | 280,0 | 320,0 | 360,0 | 400,0 | 800,0 | 1600,0 |
| Trinkwasser [l] | 49,5 | 59,4 | 69,3 | 79,2 | 89,1 | 99 | 198 | 396 |

Volumenbemessung Belebungsbecken nach A 131 [MILKE/ SAHLBACH, 2014]

Erforderliches Volumen

$$V_{BB} = \frac{t_{TS} * \ddot{U}S_d}{TS_{BB}}$$

Mit:

- TS_{BB} = Trockensubstanz Belebungsbecken:

$$TS_{BB} = \frac{RV * TS_{RS}}{1 + RV} \quad [kg/m^3]$$

Mit: RV = hier: Rücklaufverhältnis Schlamm aus Nachklärbecken für vertikal durchströmtes Becken: 1,0

$$TS_{RS} = 0,7 * TS_{BS} [kg/m^3] = \text{Trockensubstanz im Rücklaufschlamm}$$

$$TS_{BS} = \frac{1000}{ISV} * \sqrt[3]{t_E} [g/l] = \text{Trockensubstanz im Bodenschlamm}$$

mit Schlamminde $ISV = 150$

und $t_E = \text{Eindickzeit} = 2 \text{ h}$

(vgl. A 131 Richtwerte für Belebungsanlagen mit Denitrifikation)

$$\Rightarrow TS_{BB} = \frac{1 * 0,7 * (1000 / 150) * \sqrt[3]{2}}{1 + 1} = 2.94 \text{ kg/m}^3$$

- $\ddot{U}S_d$ = Gesamter Überschussschlamm
hier: $\ddot{U}S_d = \ddot{U}S_{d,c}$ mit Überschussschlamm aus Elimination organischer Stoffe, da von 10.000 EW ausgegangen wird; Somit ist keine Phosphorelimination erforderlich.

$$\ddot{U}S_{d,c} = B_{d,BSB,ZBB} * \ddot{U}S_{C,BSB5} / 1000$$

Mit: $B_{d,BSB,ZBB} = 450 \text{ kg/d}$
= täglich Zulauf Zulauf Belebungsbecken in $[kg/d]$
(vgl. Anhang Anlage A VIII-1)

$\ddot{U}S_{C,BSB5}$ aus Tabelle 5, A 131 interpoliert: $0,818 \text{ kg TS/ kg BSB}_5$

$$\ddot{U}S_{d,c} = 450 * 0,818 = 368,1 \text{ kg TS/d}$$

A III

- Schlammalter

$$t_{TS, Bem} = t_{TS, aerob, Bem} > \frac{1}{1 / 1 - (V_D / V_{BB})}$$

$$= SF * 3,4 * 1,103^{(15-T)} * 1/1$$

mit

T = 12°C und Sicherheitsfaktor SF = 1,647

und

$V_D / V_B = 0,5$

(vgl. Anhang, Anlage A VIII-4)

$$\Rightarrow T_{TS, Bem.} = 15 \text{ d}$$

$$\Rightarrow V_{BB} = \frac{15 * 368,1 \text{ kg TS}}{2,94 \text{ kg/m}^3} = 1878,06 \text{ m}^3$$

Gewählt: 1.950 m³

| | | |
|-------------|-----------------|---------------------------|
| Aufteilung: | Denitrifikation | 650 m ³ |
| | Nitrifikation | <u>1300 m³</u> |
| | | 1950 m ³ |

Umrechnung auf Maßstab Laboranlage:

| | |
|-----------------|-------------|
| Denitrifikation | 20 l |
| Nitrifikation | <u>40 l</u> |
| | 60 l |

$$\frac{(60 \text{ l} / 1000 \text{ l/m}^3)}{1950 \text{ m}^3} = 0,0000307 = \text{Umrechnungsfaktor}$$

Der Trockenwetterzufluss im Jahresmittel beträgt: $Q_{T, aM} = 16,67 \text{ l/s}$
(vgl. Anhang, Anlage A VIII-1)

Umrechnung auf Laboranlage: $0,0000307 * 16,67 \text{ l/s} = 0,0005 \text{ l/s} \cong 1,8 \text{ l/h}$

A IV

| Parameter | | Messverfahren / Häufigkeit | |
|---|----------------|---|---|
| Formelzeichen / Abkürzung | Einheit | Messverfahren | Häufigkeit |
| ZULAUF AF Volumen Vorlagebehälter (Füllstand) | m ³ | Metermaß / Zollstock | täglich Füllstand - Relation zu Volumen |
| Q_{ZULAF} | l/h bzw. l/d | Festeinstellung der Schlauchpumpen nach Erfahrungswerten (Drehzahl, Zeitintervall) Kontrolle durch Auslitern n.Bedarf (Auffälligkeiten, je Versuchsreihe/monatlich) | |
| CSB_{ZULAF} | mg/l | CSB-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| NH_4-N_{ZULAF} | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| NO_2-N_{ZULAF} | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| NO_3-N_{ZULAF} | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| REAKTOR AF (FERMENTER) | | | |
| $Q_{REZIK.AF}$ | l/h | Festeinstellung der Schlauchpumpen nach Erfahrungswerten (Drehzahl, Zeitintervall) Kontrolle durch Auslitern n.Bedarf (Auffälligkeiten, je Versuchsreihe/monatlich) | |
| Redoxpotential | mV | Taschenmessgerät, vgl.3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| Temperatur | °C | Taschenmessgerät, vgl.3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| ABLAUF AF | | | |
| $CSB_{ABLAF} = CSB_{ZULAF} - PNAD+H$ | mg/l | CSB-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NH_4-N_{ABLAF} = NH_4-N_{ZULAF} - PNAD+H$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NO_2-N_{ABLAF} = NO_2-N_{ZULAF} - PNAD+H$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NO_3-N_{ABLAF} = NO_3-N_{ZULAF} - PNAD+H$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| Volumen Zwischenbehälter (Füllstand) | m ³ | Metermaß / Zollstock | täglich Füllstand - Relation zu Volumen |
| Gasanalytik | | | |
| Gasvolumen | l bzw. l/d | Gastrommelzähler, vgl. 3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| Gastemperatur | °C | Biogasanalytik, vgl. 3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| Druck | mbar | Biogasanalytik, vgl. 3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| Biogasqualität (CH ₄ -Anteil) | % | Biogasanalytik, vgl. 3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| Biogasqualität (CO ₂ -Anteil) | % | Biogasanalytik, vgl. 3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| Biogasqualität (O ₂ -Anteil) | % | Biogasanalytik, vgl. 3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| Biogasqualität (H ₂ S) | ppm | Biogasanalytik, vgl. 3.4.2 | täglich, außer Wochenende |
| Biogasqualität (H ₂) | ppm | Biogasanalytik, vgl. 3.4.2 | täglich, außer Wochenende |

Tabelle A 3.4.1: Messprogramm der Versuchsanlagen: Anaerobreaktor (AF)

| Parameter | | Messverfahren / Häufigkeit | |
|------------------------------|--------------|--|---|
| Formelzeichen / Abkürzung | Einheit | Messverfahren | Häufigkeit |
| ZULAUF PNA/D+N | | | |
| $Q_{ZUL,PNA/D+N}$ | l/h bzw. l/d | Festeinstellung der Beschickungspumpen nach Bedienungsanleitung, Kontrolle durch Auslitern n.Bedarf (Auffälligkeiten, je Versuchsreihe/monatlich) | online - ALMEMO |
| $CSB_{ZUL,PNA/D+N}$ | mg/l | CSB-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | vgl. $CSB_{AZL,AF}$ |
| $NH_4-N_{ZUL,PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | vgl. $NH_4-N_{ZUL,AF}$ |
| $NO_2-N_{ZUL,PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | vgl. $NO_2-N_{ZUL,AF}$ |
| $NO_3-N_{ZUL,PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | vgl. $NO_3-N_{ZUL,AF}$ |
| BEHÄLTER B1, B2 | | | |
| $Q_{REZIK,PNA/D+N}$ | l/h | Festeinstellung der Rezirkulationspumpen nach Bedienungsanleitung, Kontrolle durch Auslitern n.Bedarf (Auffälligkeiten, je Versuchsreihe/monatlich) | online - ALMEMO |
| $CSB_{PNA/D+N}$ | mg/l | CSB-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NH_4-N_{PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NO_2-N_{PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NO_3-N_{PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| pH | - | Messsonde, Datenlogger ALMEMO, vgl.3.4.2 | online - ALMEMO |
| Temperatur | °C | Messsonde, Datenlogger ALMEMO, vgl.3.4.2 | online - ALMEMO |
| O_2 -Gehalt (in B2) | mg/l | Messsonde, Datenlogger ALMEMO, vgl.3.4.2 | online - ALMEMO |
| ABLAUF NACHKLÄRUNG B3 | | | |
| $Q_{ABL,PNA/D+N}$ | l/h | | vgl. $Q_{ZUL,PNA/D+N}$ |
| $CSB_{ABL,PNA/D+N}$ | mg/l | CSB-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NH_4-N_{ABL,PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NO_2-N_{ABL,PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| $NO_3-N_{ABL,PNA/D+N}$ | mg/l | N-Analytik: Photometrisches Verfahren, vgl.3.4.2 | 1 mal pro Neuansatz synth. Abwasser bzw. 1 mal pro Woche, später 1 mal pro 2 Wochen |
| Schlamm | | | |
| $Q_{REZIK,RS}$ | l/h | Festeinstellung der Rücklaufschlammumpen (RS) nach Bedienungsanleitung, Kontrolle durch Auslitern n.Bedarf (Auffälligkeiten, je Versuchsreihe/monatlich) | online - ALMEMO |

Tabelle A 3.4.2: Messprogramm der Versuchsanlagen: Belebtschlammanlage "PNA bzw. D+N"

| Bestimmung | Kurzbeschreibung |
|--|--|
| Anaerobfilter (Festbettreaktor) | |
| pH-Wert | Die Bestimmung von pH-Werten erfolgte manuell mit einem pH/mV-Taschenmessgerät WTW pH 340i, Firma WTW |
| Redox-Potential | Die Bestimmung von Redox-Potential erfolgt online mit Redox-Messketten der Firma Kobold und Messgerät Almemo der Firma Ahlborn |
| Gasvolumen | Die Bestimmung des Gasvolumens erfolgte online mittels eines Gastrommelzählers T 25 der Firma Ritter |
| Gasanalyse | <p>Die Gasanalyse erfolgte mittels einer Gasmessstation im Technikum der HAWK Göttingen. Das Gas wird dazu in einem Foliensack mit einem Volumen von ca. 100 l aufgefangen. Zur Bestimmung von Gaszusammensetzung und –volumen wird dieser dann an die Gasmessstation angeschlossen. Das Gasanalysegerät VISIT03 der Firma Eheim umfasst eine Pumpe, mit der das Gas aus dem Foliensack gepumpt wird. Das Gas wird zunächst mittels einer Kondensatfalle getrocknet und anschließend über die Detektoren geleitet.</p> <p>Zusätzlich zur Bestimmung der Gaskomponenten CO₂, CH₄, O₂ und H₂ werden Temperatur und Druck gemessen, um die Umrechnung auf Normbedingungen zu ermöglichen. Die Erfassung der Gasmenge erfolgt über eine Gasuhr der Firma Ritter. Zusätzlich kann der Gassack über eine Vakuumpumpe entleert werden, wenn mehr Gas vorhanden ist, als für die Gasanalyse benötigt wird. Auch die abgeführte Gasmenge wird volumetrisch erfasst. Das Gesamtvolumen wird auf Normbedingungen umgerechnet. [LOOSEN / 2012]</p> |
| Belebtschlamm- anlage | |
| CSB _{ges} in flüssigen Proben | Der CSB _{ges} wird gemäß den entsprechenden Arbeitsanweisungen der Firma Hach-Lange mit dem Spektralphotometer Xion 500 durchgeführt. |
| Temperatur | Bestimmung in Behältern B1 und B2 mit Messsonden NTC Typ N mit Anschluss an Datenlogger (Bezeichnung T1B1/ T2B2); Messbereich: - 20° bis 100°C |
| pH-Wert | Bestimmung in Behältern B1 und B2 mit Einstabmesssonden mit Anschluss an Datenlogger (Bezeichnung pHB1/ pHB2); Messbereich: 1 – 12 und 0 – 80°C sowie max. 6 bar |
| | Sauerstoffmessung im Behälter B2 mit O ₂ -Messsonde (Pt-Kathode, Ag/AgCL-Anode) mit Anschluss an Datenlogger (Bezeichnung O2B2); Messbereich: O ₂ -Sättigung 0 – 260%, O ₂ -Konzentration 0,0 bis 40,0 mg/l, bei 5 – 40°C |

A IV

| | |
|------------------------|--|
| O ₂ -Gehalt | Durchflussmessungen der Beschickungs- (P1), Rezirkulations- (P2) und Schlammrückführungspumpe (P3) durch inkrementelles Messsystem magnetischer Abtastung (Impulsgeber) mit Anschluss an Datenlogger (Bezeichnung FlowP1/P2/P3); Messbereich 0 – 30 l/min; Auflösung 435 Impulse pro l |
| Abwasserdurchflüsse | Prozessphotometer nach Bedienungsanleitung der Firma Hach-Lange in Anleitung an die DIN 38406 E5-1 „Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs“. Messprinzip: photometrische Bestimmung bei 655 nm in wässrigen Lösungen |
| NH ₄ -N | Prozessphotometer nach Bedienungsanleitung der Firma Hach-Lange . Messprinzip: photometrische Bestimmung im UV-Bereich |
| NO ₃ -N | Prozessphotometer nach Bedienungsanleitung der Firma Hach-Lange . Messprinzip: photometrische Bestimmung im UV-Bereich |
| NO ₂ -N | Prozessphotometer nach Bedienungsanleitung der Firma Hach-Lange . Messprinzip: photometrische Bestimmung im UV-Bereich |

Tabelle A 3.4.3 Analysemethoden

Reaktor 1 = ANAEROBIFILTER (AF)

ANLAGE V

| Tag | Datum | ALMEMO Q _{zu,d,PNAD+N} [l/d] | CSB-Konz. AF-Input Mittelwert [g/l] | Temperatur AF (Fementer 1) | Druck der Gasphase p [mbar] oder [hPa] | Temperatur des Gases T _{Gas} [°C] | Gasmenge gemessen V _{Messung} [l] | Gasmenge V _{Messung} [l] auf 24 h-Wert gerechnet | Methan CH ₄ [Vol.-%] | Kohlendioxid CO ₂ [Vol.-%] | Sauerstoff O ₂ [Vol.-%] | Wasserstoff H ₂ [Vol.-ppm] |
|-----|------------|---|--|----------------------------------|---|--|---|--|---------------------------------------|---|--|---|
| 1 | 25.02.2016 | 24,00 | 0,533 | 29,76 | 1014 | 19,57 | 3,6 | 3,2 | 62,8% | 21,2% | 1,5% | 94 |
| 2 | 26.02.2016 | 26,88 | 0,533 | 29,58 | 1019 | 19,82 | | 4,36 | 65,5% | 20,0% | 1,5% | 536 |
| 3 | 27.02.2016 | 26,88 | 0,533 | 29,58 | 1019 | 19,82 | | 4,36 | 65,5% | 20,0% | 1,5% | 536 |
| 4 | 28.02.2016 | 26,88 | 0,533 | 29,58 | 1019 | 19,82 | | 4,36 | 65,5% | 20,0% | 1,5% | 536 |
| 5 | 29.02.2016 | 26,88 | 0,533 | 29,39 | 1023 | 20,07 | 17,1 | 4,36 | 68,2% | 18,8% | 1,5% | 978 |
| 6 | 01.03.2016 | 27,48 | 0,533 | 29,42 | 1011 | 20,00 | | 4,14 | 69,8% | 14,8% | 1,3% | 1833 |
| 7 | 02.03.2016 | 27,48 | 0,533 | 29,44 | 999 | 19,93 | 8,2 | 4,14 | 69,8% | 14,8% | 1,3% | 1833 |
| 8 | 03.03.2016 | 27,48 | 0,533 | 29,37 | 1003 | 20,23 | | 4,38 | 72,9% | 10,8% | 1,5% | 55 |
| 9 | 04.03.2016 | 28,08 | 0,533 | 29,37 | 1003 | 20,23 | | 4,38 | 72,9% | 10,8% | 1,5% | 55 |
| 10 | 05.03.2016 | 27,84 | 0,533 | 29,37 | 1003 | 20,23 | | 4,38 | 72,9% | 10,8% | 1,5% | 55 |
| 11 | 06.03.2016 | 27,84 | 0,533 | 29,37 | 1003 | 20,23 | | 4,38 | 72,9% | 10,8% | 1,5% | 55 |
| 12 | 07.03.2016 | 27,60 | 0,533 | 29,3 | 1007 | 20,52 | 21,8 | 4,38 | 72,9% | 10,8% | 1,5% | 55 |
| 13 | 08.03.2016 | 28,08 | 0,533 | 29,5 | 1016 | 20,91 | 3,8 | 4,05 | 74,0% | 11,2% | 1,3% | 52 |
| 14 | 09.03.2016 | 28,20 | 0,533 | 27,44 | 1013 | 21,1 | 3,0 | 3,76 | 76,0% | 9,4% | 1,5% | 36 |
| 15 | 10.03.2016 | 28,20 | 0,533 | 26,27 | 1021 | 21,02 | | 3,48 | 74,6% | 9,1% | 1,3% | 71 |
| 16 | 11.03.2016 | 28,20 | 0,533 | 25,1 | 1029 | 20,94 | 7,1 | 3,48 | 74,6% | 9,1% | 1,3% | 71 |
| 17 | 12.03.2016 | 28,32 | 0,533 | 25,17 | 1032 | 20,42 | 3,4 | 3,61 | 74,9% | 8,8% | 1,3% | 31 |
| 18 | 13.03.2016 | 28,80 | 0,533 | 25,15 | 1034 | 20,50 | | 3,99 | 76,1% | 9,0% | 1,2% | 23 |
| 19 | 14.03.2016 | 29,28 | 0,533 | 25,13 | 1036 | 20,58 | 8,0 | 3,99 | 76,1% | 9,0% | 1,2% | 23 |
| 20 | 15.03.2016 | 31,68 | 0,533 | 25,25 | 1026 | 20,62 | 6,9 | 5,29 | 73,7% | 8,8% | 1,5% | 31 |
| 21 | 16.03.2016 | 31,68 | 0,533 | 25,25 | 1026 | 21,04 | | 5,88 | 69,6% | 11,1% | 1,6% | 19 |
| 22 | 17.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,25 | 1026 | 21,46 | 12,0 | 5,88 | 69,6% | 11,1% | 1,6% | 19 |
| 23 | 18.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,08 | 1060 | 20,62 | | 4,95 | 72,9% | 10,4% | 1,5% | 19 |
| 24 | 19.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,08 | 1060 | 20,62 | | 4,95 | 72,9% | 10,4% | 1,5% | 19 |
| 25 | 20.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,08 | 1060 | 20,62 | | 4,95 | 72,9% | 10,4% | 1,5% | 19 |
| 26 | 21.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,08 | 1060 | 20,62 | | 4,95 | 72,9% | 10,4% | 1,5% | 19 |
| 27 | 22.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 24,91 | 1093 | 19,78 | 23,5 | 4,95 | 72,9% | 10,4% | 1,5% | 19 |
| 28 | 23.03.2016 | 31,44 | 0,533 | 24,91 | 1018 | 20,18 | | 4,04 | 76,1% | 9,7% | 1,3% | 19 |
| 29 | 24.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 24,91 | 1018 | 20,18 | 8,3 | 4,04 | 76,1% | 9,7% | 1,3% | 19 |
| 30 | 25.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,15 | 1015 | 20,66 | | 5,06 | 76,5% | 9,5% | 1,4% | 19 |
| 31 | 26.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,15 | 1015 | 20,66 | | 5,06 | 76,5% | 9,5% | 1,4% | 19 |
| 32 | 27.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,15 | 1015 | 20,66 | | 5,06 | 76,5% | 9,5% | 1,4% | 19 |
| 33 | 28.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,15 | 1015 | 20,66 | | 5,06 | 76,5% | 9,5% | 1,4% | 18 |
| 34 | 29.03.2016 | 31,56 | 0,533 | 25,15 | 1015 | 20,66 | | 5,06 | 76,5% | 9,5% | 1,4% | 18 |
| 35 | 30.03.2016 | 31,68 | 0,533 | 25,38 | 1012 | 21,14 | 30,5 | 5,06 | 76,5% | 9,5% | 1,3% | 17 |
| 36 | 31.03.2016 | 31,80 | 0,533 | 25,23 | 1017 | 20,73 | | 5,12 | 76,5% | 9,5% | 1,4% | 15 |
| 37 | 01.04.2016 | 31,80 | 0,533 | 25,08 | 1022 | 20,32 | 9,7 | 5,12 | 76,9% | 9,3% | 1,4% | 10 |
| 38 | 02.04.2016 | 31,80 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 39 | 03.04.2016 | 31,80 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 40 | 04.04.2016 | 31,80 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 41 | 05.04.2016 | 31,80 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 42 | 06.04.2016 | 31,92 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 43 | 07.04.2016 | 32,16 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 44 | 08.04.2016 | 32,16 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 45 | 09.04.2016 | 32,16 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 46 | 10.04.2016 | 32,16 | 0,533 | 25,47 | 1019 | 21,06 | | 4,79 | 76,9% | 9,0% | 1,4% | 15 |
| 47 | 11.04.2016 | 32,16 | 0,533 | 25,85 | 1016 | 21,79 | 48,5 | 4,79 | 76,8% | 8,6% | 1,4% | 20 |
| 48 | 12.04.2016 | 32,16 | 0,533 | 25,62 | 1012 | 21,77 | 4,8 | 4,73 | 76,9% | 9,2% | 1,4% | 18 |
| 49 | 13.04.2016 | 32,40 | 0,533 | 25,49 | 1010 | 21,11 | 4,4 | 4,93 | 75,4% | 9,4% | 1,4% | 20 |
| 50 | 14.04.2016 | 32,52 | 0,533 | 25,51 | 1014 | 21,97 | 4,9 | 4,93 | 73,9% | 9,6% | 1,4% | 20 |
| 51 | 15.04.2016 | 32,52 | 0,533 | 25,53 | 1006 | 21,84 | 4,6 | 4,70 | 76,0% | 9,6% | 1,2% | 14 |
| 52 | 16.04.2016 | 32,52 | 0,533 | 22,98 | 1014 | 21,66 | | 3,03 | 76,2% | 8,9% | 1,3% | 14 |
| 53 | 17.04.2016 | 32,52 | 0,533 | 22,98 | 1014 | 21,66 | | 3,03 | 76,2% | 8,9% | 1,3% | 14 |
| 54 | 18.04.2016 | 32,52 | 0,533 | 20,42 | 1021 | 21,47 | 9,8 | 3,03 | 76,2% | 8,9% | 1,3% | 14 |
| 55 | 19.04.2016 | 32,52 | 0,533 | 20,39 | 1026 | 21,43 | 4,2 | 4,24 | 76,3% | 8,1% | 1,4% | 14 |
| 56 | 20.04.2016 | 32,64 | 0,533 | 20,45 | 1023 | 21,85 | | 3,68 | 76,0% | 8,0% | 1,4% | 13 |
| 57 | 21.04.2016 | 32,76 | 0,533 | 20,45 | 1023 | 21,85 | | 3,68 | 76,0% | 8,0% | 1,4% | 13 |
| 58 | 22.04.2016 | 32,76 | 0,533 | 20,5 | 1019 | 22,27 | 10,8 | 3,68 | 75,7% | 7,8% | 1,4% | 12 |
| 59 | 23.04.2016 | 32,76 | 0,533 | 20,40 | 1015 | 21,15 | | 3,95 | 76,1% | 7,8% | 1,5% | 10 |
| 60 | 24.04.2016 | 32,76 | 0,533 | 20,40 | 1015 | 21,15 | | 3,95 | 76,1% | 7,8% | 1,5% | 10 |
| 61 | 25.04.2016 | 32,76 | 0,533 | 20,29 | 1011 | 20,03 | 11 | 3,95 | 76,1% | 7,8% | 1,5% | 10 |
| 62 | 26.04.2016 | 32,76 | 0,533 | 20,15 | 1008 | 20,29 | | 3,81 | 76,1% | 7,8% | 1,5% | 10 |
| 63 | 27.04.2016 | 32,88 | 0,533 | 20 | 1005 | 20,54 | 8,5 | 3,81 | 78,5% | 7,8% | 1,5% | 8 |
| 64 | 28.04.2016 | 33,00 | 0,533 | 20,07 | 1012 | 20,92 | | 3,78 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 65 | 29.04.2016 | 33,00 | 0,533 | 20,14 | 1018 | 21,29 | 7,5 | 3,78 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 66 | 30.04.2016 | 33,00 | 0,533 | 20,21 | 1022 | 21,87 | | 4,20 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 67 | 01.05.2016 | 33,00 | 0,533 | 20,21 | 1022 | 21,87 | | 4,20 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 68 | 02.05.2016 | 33,00 | 0,533 | 20,28 | 1025 | 22,45 | 12,5 | 4,20 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 69 | 03.05.2016 | 33,00 | 0,533 | 20,11 | 1028 | 21,10 | | 3,59 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 70 | 04.05.2016 | 33,12 | 0,533 | 19,94 | 1031 | 19,74 | 6,8 | 3,59 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 71 | 05.05.2016 | 37,20 | 0,533 | 20,59 | 1025 | 21,28 | | 4,03 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 72 | 06.05.2016 | 37,20 | 0,533 | 20,59 | 1025 | 21,28 | | 4,03 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 73 | 07.05.2016 | 37,20 | 0,533 | 20,59 | 1025 | 21,28 | | 4,03 | 75,3% | 7,8% | 1,5% | 12 |
| 74 | 08.05.2016 | 37,20 | 0,533 | 21,24 | 1018 | 22,81 | 15,9 | 4,03 | 74,0% | 7,7% | 1,4% | 16 |
| 75 | 09.05.2016 | 37,20 | 0,533 | 21,67 | 1019 | 23,96 | 4,3 | 4,10 | 75,7% | 7,7% | 1,2% | 0 |
| 76 | 10.05.2016 | 37,20 | 0,533 | 22,01 | 1013 | 24,26 | 5,6 | 5,04 | 75,8% | 7,7% | 1,1% | 16 |

| Tag | Datum | ALMEMO Q _{Zul.} /d.PMA/D+N [l/d] | CSB-Konz. AF-Input Mittelwert [g/l] | Temperatur AF (Fementor 1) | Druck der Gasphase p [mbar] oder [hPa] | Temperatur des Gases T _{Gas} [°C] | Gasmenge gemessen V _{Messung} [l] | Gasmenge V _{Messung} [l] auf 24 h-Wert gerechnet | Methan CH ₄ [Vol.-%] | Kohlendioxid CO ₂ [Vol.-%] | Sauerstoff O ₂ [Vol.-%] | Wasserstoff H ₂ [Vol.-ppm] |
|-----|------------|---|--|----------------------------------|---|--|---|--|---------------------------------------|---|--|---|
| 77 | 11.05.2016 | 41,28 | 0,533 | 22,09 | 1010 | 24,59 | 4,7 | 4,76 | 76,2% | 8,5% | 1,0% | 4 |
| 78 | 12.05.2016 | 41,52 | 0,533 | 22,49 | 1003 | 24,75 | 5,1 | 5,04 | 75,5% | 8,7% | 1,1% | 5 |
| 79 | 13.05.2016 | 41,52 | 0,533 | 22,37 | 1004 | 24,93 | 5 | 5,05 | 75,6% | 9,4% | 1,0% | 14 |
| 80 | 14.05.2016 | 41,52 | 0,533 | 21,39 | 1011 | 23,81 | | 4,41 | 76,3% | 8,4% | 1,1% | 12 |
| 81 | 15.05.2016 | 41,52 | 0,533 | 21,39 | 1011 | 23,81 | | 4,41 | 76,3% | 8,4% | 1,1% | 12 |
| 82 | 16.05.2016 | 41,52 | 0,533 | 21,39 | 1011 | 23,81 | | 4,41 | 76,3% | 8,4% | 1,1% | 12 |
| 83 | 17.05.2016 | 41,52 | 0,533 | 20,4 | 1018 | 22,69 | 17,9 | 4,41 | 76,3% | 8,4% | 1,1% | 12 |
| 84 | 18.05.2016 | 41,76 | 0,533 | 20,31 | 1015 | 22,59 | 3,2 | 3,91 | 76,9% | 7,3% | 1,1% | 10 |
| 85 | 19.05.2016 | 39,60 | 0,533 | 20,8 | 1014 | 23,01 | 5,7 | 4,66 | 77,0% | 8,2% | 1,0% | 17 |
| 86 | 20.05.2016 | 39,60 | 0,533 | 21,04 | 1020 | 23,57 | 3,5 | 3,75 | 76,7% | 8,9% | 0,9% | 35 |
| 87 | 21.05.2016 | 39,60 | 0,533 | 21,99 | 1018 | 23,53 | | 7,83 | 65,2% | 8,5% | 2,1% | 39 |
| 88 | 22.05.2016 | 39,60 | 0,533 | 21,99 | 1018 | 23,53 | | 7,83 | 65,2% | 8,5% | 2,1% | 39 |
| 89 | 23.05.2016 | 39,60 | 0,533 | 22,93 | 1018 | 23,53 | 24 | 7,83 | 65,2% | 8,5% | 2,1% | 39 |
| 90 | 24.05.2016 | 39,60 | 0,533 | 22,07 | 1016 | 23,49 | 2,5 | 3,43 | 65,2% | 8,5% | 2,1% | 39 |
| 91 | 25.05.2016 | 37,44 | 0,533 | 21,21 | 1017 | 22,74 | 6,3 | 6,67 | 65,2% | 8,5% | 2,1% | 39 |
| 92 | 26.05.2016 | 35,52 | 0,533 | 21,07 | 1019 | 23,42 | 4,8 | 4,31 | 53,7% | 8,0% | 3,3% | 42 |
| 93 | 27.05.2016 | 35,52 | 0,533 | 21,49 | 1018 | 24,09 | 4,8 | 4,18 | 62,8% | 10,7% | 1,0% | 80 |
| 94 | 28.05.2016 | | | | | | | | | | | |
| 95 | 29.05.2016 | | | | | | | | | | | |
| 96 | 30.05.2016 | | | | | | | | | | | |
| 97 | 31.05.2016 | 35,52 | 0,533 | 22,79 | 1012 | 24,19 | | | 63,9% | 10,7% | 2,9% | 77 |
| 98 | 01.06.2016 | 33,60 | 0,533 | 23,03 | 1015 | 24,75 | 3,6 | 3,44 | 61,2% | 10,9% | 2,5% | 102 |
| 99 | 02.06.2016 | 37,20 | 0,533 | 22,95 | 1014 | 24,27 | 3,1 | 3,12 | 71,5% | 9,7% | 1,2% | 157 |
| 100 | 03.06.2016 | 37,20 | 0,533 | 22,86 | 1014 | 24,32 | 2,7 | 2,61 | 72,0% | 8,8% | 1,1% | 75 |
| 101 | 04.06.2016 | 37,20 | 0,533 | 23,42 | 1019 | 24,94 | | 4,42 | 72,7% | 12,1% | 0,8% | 454 |
| 102 | 05.06.2016 | 37,20 | 0,533 | 23,42 | 1019 | 24,94 | | 4,42 | 72,7% | 12,1% | 0,8% | 454 |
| 103 | 06.06.2016 | 37,20 | 0,533 | 23,97 | 1023 | 25,55 | 13,3 | 4,42 | 72,7% | 12,1% | 0,8% | 454 |
| 104 | 07.06.2016 | 37,20 | 0,533 | 24,11 | 1028 | 26,01 | 8,2 | 8,26 | 73,4% | 15,4% | 0,5% | 833 |
| 105 | 08.06.2016 | 40,80 | 0,533 | 24,28 | 1023 | 25,94 | 5 | 5,00 | 73,0% | 17,0% | 0,7% | 482 |
| 106 | 09.06.2016 | 42,72 | 0,533 | 23,72 | 1019 | 25,68 | 7 | 5,36 | 71,7% | 14,2% | 0,9% | 176 |
| 107 | 10.06.2016 | 42,72 | 0,533 | 23,15 | 1015 | 25,41 | 5,3 | 5,45 | 61,4% | 12,4% | 2,3% | 184 |
| 108 | 11.06.2016 | 42,72 | 0,533 | 23,20 | 1010 | 25,27 | | 5,77 | 67,9% | 13,3% | 1,5% | 216 |
| 109 | 12.06.2016 | 42,72 | 0,533 | 23,20 | 1010 | 25,27 | | 5,77 | 67,9% | 13,3% | 1,5% | 216 |
| 110 | 13.06.2016 | 42,72 | 0,533 | 23,24 | 1004 | 25,13 | 17,5 | 5,77 | 67,9% | 13,3% | 1,5% | 216 |
| 111 | 14.06.2016 | 42,72 | 0,533 | 23,18 | 1003 | 23,18 | 5,5 | 7,54 | 74,3% | 14,2% | 0,7% | 247 |
| 112 | 15.06.2016 | 44,64 | 0,533 | 22,93 | 1006 | 24,98 | 6,2 | 6,24 | 74,4% | 13,9% | 0,5% | 389 |
| 113 | 16.06.2016 | 43,20 | 0,533 | 22,57 | 1012 | 24,53 | 6,5 | 6,38 | 74,4% | 14,0% | 0,6% | 460 |
| 114 | 17.06.2016 | 43,20 | 0,533 | 22,51 | 1007 | 24,58 | 6,9 | 6,70 | 75,0% | 14,2% | 0,5% | 505 |
| 115 | 18.06.2016 | 43,20 | 0,533 | 22,43 | 1016 | 24,36 | | 6,28 | 75,3% | 13,8% | 0,6% | 568 |
| 116 | 19.06.2016 | 43,20 | 0,533 | 22,43 | 1016 | 24,36 | | 6,28 | 75,3% | 13,8% | 0,6% | 568 |
| 117 | 20.06.2016 | 43,20 | 0,533 | 22,35 | 1024 | 24,14 | 18,7 | 6,28 | 75,3% | 13,8% | 0,6% | 568 |
| 118 | 21.06.2016 | 43,20 | 0,533 | 22,77 | 1023 | 24,48 | 5,9 | 5,77 | 75,5% | 13,4% | 0,7% | 630 |
| 119 | 22.06.2016 | 41,76 | 0,533 | 23,44 | 1027 | 25,48 | 6 | 6,06 | 75,5% | 13,1% | 0,7% | 421 |
| 120 | 23.06.2016 | 38,88 | 0,533 | 24,32 | 1030 | 26,35 | | 7,09 | 72,8% | 13,4% | 1,0% | 657 |
| 121 | 24.06.2016 | 38,88 | 0,533 | 25,19 | 1033 | 27,22 | 14 | 7,09 | 70,0% | 13,7% | 1,2% | 892 |
| 122 | 25.06.2016 | 38,88 | 0,533 | 24,79 | 1028 | 26,60 | | 7,68 | 72,8% | 13,9% | 1,0% | 939 |
| 123 | 26.06.2016 | 38,88 | 0,533 | 24,79 | 1028 | 26,60 | | 7,68 | 72,8% | 13,9% | 1,0% | 939 |
| 124 | 27.06.2016 | 38,88 | 0,533 | 24,38 | 1022 | 25,97 | 23 | 7,68 | 72,8% | 13,9% | 1,0% | 939 |
| 125 | 28.06.2016 | 38,88 | 0,533 | 24,22 | 1022 | 25,98 | 8,5 | 8,11 | 75,6% | 14,0% | 0,7% | 985 |
| 126 | 29.06.2016 | 36,00 | 0,533 | 24,32 | 1015 | 25,85 | 6 | 6,15 | 64,4% | 13,0% | 0,7% | 1207 |
| 127 | 30.06.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,2 | 1017 | 25,86 | 6,5 | 6,32 | 73,3% | 13,1% | 0,8% | 808 |
| 128 | 01.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,66 | 1018 | 26,75 | 6,8 | 6,66 | 75,2% | 13,5% | 0,7% | 472 |
| 129 | 02.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,32 | 1021 | 25,88 | | 7,01 | 75,6% | 13,2% | 0,8% | 312 |
| 130 | 03.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,32 | 1021 | 25,88 | | 7,01 | 75,6% | 13,2% | 0,8% | 312 |
| 131 | 04.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 23,98 | 1024 | 25 | 20,2 | 7,01 | 75,6% | 13,2% | 0,8% | 312 |
| 132 | 05.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,03 | 1017 | 25,75 | 4,4 | 4,00 | 76,0% | 12,8% | 0,9% | 152 |
| 133 | 06.07.2016 | 36,48 | 0,533 | 23,78 | 1023 | 25,54 | 4,7 | 4,17 | 68,7% | 9,8% | 1,5% | 480 |
| 134 | 07.07.2016 | 36,48 | 0,533 | 23,35 | 1025 | 25,01 | 4 | 4,65 | 73,5% | 9,4% | 0,9% | 96 |
| 135 | 08.07.2016 | 36,48 | 0,533 | 24,02 | 1020 | 26,07 | 8,3 | 8,57 | 74,1% | 14,4% | 0,5% | 1127 |
| 136 | 09.07.2016 | 36,48 | 0,533 | 24,78 | 1016 | 26,53 | | 7,80 | 76,6% | 14,9% | 0,6% | 925 |
| 137 | 10.07.2016 | 36,48 | 0,533 | 24,78 | 1016 | 26,53 | | 7,80 | 76,6% | 14,9% | 0,6% | 925 |
| 138 | 11.07.2016 | 36,48 | 0,533 | 25,53 | 1012 | 26,99 | 23,8 | 7,80 | 76,6% | 14,9% | 0,6% | 925 |
| 139 | 12.07.2016 | 36,48 | 0,533 | 25,72 | 1017 | 27,1 | 7 | 7,54 | 79,1% | 15,3% | 0,7% | 722 |
| 140 | 13.07.2016 | 36,48 | 0,533 | 25,13 | 1016 | 26,83 | 7,5 | 7,11 | 76,1% | 14,3% | 0,7% | 331 |
| 141 | 14.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,4 | 1021 | 26,05 | 5,8 | 5,70 | 75,2% | 14,2% | 0,8% | 475 |
| 142 | 15.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 23,89 | 1027 | 25 | 7,7 | 7,75 | 75,8% | 14,8% | 0,6% | 655 |
| 143 | 16.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,19 | 1026 | 25,57 | | 7,38 | 74,1% | 14,6% | 0,9% | 523 |
| 144 | 17.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,19 | 1026 | 25,57 | | 7,38 | 74,1% | 14,6% | 0,9% | 523 |
| 145 | 18.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,48 | 1024 | 26,13 | 21,9 | 7,38 | 74,1% | 14,6% | 0,9% | 523 |
| 146 | 19.07.2016 | 36,24 | 0,533 | 24,98 | 1003 | 27,39 | 10,5 | 9,05 | 72,3% | 14,4% | 1,2% | 390 |
| 147 | 20.07.2016 | 36,00 | 0,533 | 25,72 | 1017 | 28,2 | 7,2 | 6,69 | 76,7% | 13,5% | 4,9% | 649 |
| 148 | 21.07.2016 | 37,08 | 0,533 | 26,82 | 1019 | 28,18 | 7,6 | 8,17 | 71,6% | 14,7% | 0,8% | 613 |
| 149 | 22.07.2016 | 37,08 | 0,533 | 26,35 | 1019 | 28,63 | 7,8 | 7,54 | 75,9% | 14,5% | 0,6% | 138 |
| 150 | 23.07.2016 | 37,08 | 0,533 | 26,43 | 1020 | 28,69 | | 7,87 | 75,2% | 15,0% | 0,6% | 300 |
| 151 | 24.07.2016 | 37,08 | 0,533 | 26,43 | 1020 | 28,69 | | 7,87 | 75,2% | 15,0% | 0,6% | 300 |
| 152 | 25.07.2016 | 37,08 | 0,533 | 26,5 | 1021 | 28,75 | 23,5 | 7,87 | 74,5% | 15,5% | 0,6% | 461 |
| 153 | 26.07.2016 | 37,08 | 0,533 | 26,81 | 1023 | 28,64 | 7 | 7,12 | 75,9% | 14,6% | 0,6% | 146 |
| 154 | 27.07.2016 | 38,16 | 0,533 | 26,3 | 1018 | 27,83 | 5,1 | 5,27 | 75,7% | 13,8% | 0,7% | 167 |
| 155 | 28.07.2016 | 39,24 | 0,533 | 25,96 | 1019 | 28,22 | 5,2 | 4,83 | 73,8% | 13,2% | 0,7% | 818 |
| 156 | 29.07.2016 | 39,24 | 0,533 | 25,9 | 1018 | 27,91 | 9,8 | 10,21 | 68,4% | 16,7% | 1,3% | 2582 |

| Tag | Datum | ALMEMO Q _{ZU,AF,PN,AD+N} [l/d] | CSB-Konz. AF-Input Mittelwert [g/l] | Temperatur AF (Femeter 1) | Druck der Gasphase p [mbar] oder [hPa] | Temperatur des Gases T _{Gas} [°C] | Gasmenge gemessen V _{Messung} [l] | Gasmenge V _{Messung} [l] auf 24 h-Wert gerechnet | Methan CH ₄ [Vol.-%] | Kohlendioxid CO ₂ [Vol.-%] | Sauerstoff O ₂ [Vol.-%] | Wasserstoff H ₂ [Vol.-ppm] |
|-----|------------|---|--|---------------------------------|---|--|---|--|---------------------------------------|---|--|---|
| 157 | 30.07.2016 | 39,24 | 0,533 | 25,26 | 1017 | 26,93 | | 7,88 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 158 | 31.07.2016 | 39,24 | 0,533 | 25,26 | 1017 | 26,93 | | 7,88 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 159 | 01.08.2016 | 39,24 | 0,533 | 25,26 | 1017 | 26,93 | | 7,88 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 160 | 02.08.2016 | 39,24 | 0,533 | 24,62 | 1015 | 25,95 | 31,6 | 7,88 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 161 | 03.08.2016 | 40,32 | 0,533 | 24,85 | 1019 | 26,49 | | 4,27 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 162 | 04.08.2016 | 38,76 | 0,533 | 24,85 | 1019 | 26,49 | | 4,27 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 163 | 05.08.2016 | 38,76 | 0,533 | 24,85 | 1019 | 26,49 | | 4,27 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 164 | 06.08.2016 | 38,76 | 0,533 | 24,85 | 1019 | 26,49 | | 4,27 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 165 | 07.08.2016 | 38,76 | 0,533 | 24,85 | 1019 | 26,49 | | 4,27 | 72,3% | 13,3% | 1,3% | 1321 |
| 166 | 08.08.2016 | 38,76 | 0,533 | 25,07 | 1022 | 27,02 | 25,7 | 4,27 | 76,2% | 9,9% | 1,3% | 60 |
| 167 | 09.08.2016 | 38,76 | 0,533 | 24,42 | 1023 | 25,51 | 5,6 | 5,81 | 77,5% | 7,9% | 1,2% | 470 |
| 168 | 10.08.2016 | 37,20 | 0,533 | 22,9 | 1023 | 25,4 | 5,3 | 5,03 | 77,2% | 9,6% | 1,1% | 265 |
| 169 | 11.08.2016 | 30,72 | 0,533 | 23,02 | 1024 | 25,28 | 5,6 | 5,77 | 76,5% | 10,2% | 1,3% | 1055 |
| 170 | 12.08.2016 | 30,72 | 0,533 | 23,37 | 1026 | 25,65 | 4,4 | 4,39 | 72,5% | 10,3% | 1,5% | 686 |
| 171 | 13.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 172 | 14.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 173 | 15.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 174 | 16.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 175 | 17.08.2016 | 24,24 | 0,340 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

ELWERT
MEDIAN

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|---------|-------|--|------|-------|-------|------|--------|
| 35,34 | 0,533 | 24,13 | 1019,20 | 23,51 | | 5,31 | 73,6% | 11,3% | 1,2% | 328,26 |
| 36,24 | 0,533 | 24,40 | | 23,53 | | | | | | |

Reaktor 1

= ANAEROBIFILTER (AF)

| | | Berechnungen | | | | | | | | | |
|-----|------------|---|---|---------------------------|---|---|---|---|---|--|--|
| | | $p_w = -4,3965 + 9,7962 \cdot \text{EXP}(0,0521 \cdot T_{\text{Gas}} \text{ in } ^\circ\text{C})$ | Druck Gas - Druck Wasserdampf $p - p_w$ | $T_{\text{Gas}} + 273,15$ | $V_n^e = V_{\text{Messung}} \cdot ((p - p_w) / (273,15 + T))$ | $V_{\text{CH}_4} = V_n^e \cdot C_{\text{CH}_4, \text{kor}}$ | $B_{\text{CSB}, \text{ZAF}} = Q_{\text{Zul}, \text{AF}} \cdot C_{\text{CSB}}$ | $B_{\text{R}, \text{CSB}, \text{AF}} = (Q_{\text{Zul}, \text{AF}} \cdot C_{\text{CSB}} / V_A) \text{ mit Arbeitsvolumen } V_A = 39,8 \text{ l}$ | $i_H = V_A / Q_{\text{Zul}, \text{AF}}$ | $0,35 \text{ l CH}_4 / \text{g CSB} \Rightarrow \text{Methanmenge des Substrats} / 0,35$ | |
| Tag | Datum | Dampfdruck des Wassers p_w [hPa] | Druckdifferenz [hPa] | Temperatur des Gases [K] | Normbiogas-Volumen V_n^e des Gesamtgases [l _N] | Methanmenge Gesamt V_{CH_4} in [l _N] | CSB-Fracht AF-Zulauf [g/d] | CSB-Raumbelastung AF [g/(l*d)] | Hydraulische Verweilzeit AF [d] | CSB - Abbaugrad $\hat{\eta}_{\text{CSB}}$ | |
| 1 | 25.02.2016 | 22,76 | 991,24 | 292,72 | 2,9 | 2,145 | 12,79 | 0,32 | 1,66 | 0,479 | |
| 2 | 26.02.2016 | 23,12 | 995,38 | 292,97 | 4,0 | 3,005 | 14,33 | 0,36 | 1,48 | 0,599 | |
| 3 | 27.02.2016 | 23,12 | 995,38 | 292,97 | 4,0 | 3,005 | 14,33 | 0,36 | 1,48 | 0,599 | |
| 4 | 28.02.2016 | 23,12 | 995,38 | 292,97 | 4,0 | 3,005 | 14,33 | 0,36 | 1,48 | 0,599 | |
| 5 | 29.02.2016 | 23,48 | 999,52 | 293,22 | 4,0 | 3,085 | 14,33 | 0,36 | 1,48 | 0,615 | |
| 6 | 01.03.2016 | 23,37 | 987,63 | 293,15 | 3,8 | 3,049 | 14,65 | 0,37 | 1,45 | 0,595 | |
| 7 | 02.03.2016 | 23,27 | 975,73 | 293,08 | 3,7 | 3,013 | 14,65 | 0,37 | 1,45 | 0,588 | |
| 8 | 03.03.2016 | 23,70 | 979,30 | 293,375 | 3,9 | 3,369 | 14,65 | 0,37 | 1,45 | 0,657 | |
| 9 | 04.03.2016 | 23,70 | 979,30 | 293,375 | 3,9 | 3,369 | 14,97 | 0,38 | 1,42 | 0,643 | |
| 10 | 05.03.2016 | 23,70 | 979,30 | 293,375 | 3,9 | 3,369 | 14,84 | 0,37 | 1,43 | 0,649 | |
| 11 | 06.03.2016 | 23,70 | 979,30 | 293,375 | 3,9 | 3,369 | 14,84 | 0,37 | 1,43 | 0,649 | |
| 12 | 07.03.2016 | 24,14 | 982,86 | 293,67 | 4,0 | 3,378 | 14,71 | 0,37 | 1,44 | 0,656 | |
| 13 | 08.03.2016 | 24,72 | 991,28 | 294,06 | 3,7 | 3,149 | 14,97 | 0,38 | 1,42 | 0,601 | |
| 14 | 09.03.2016 | 25,01 | 987,99 | 294,26 | 3,4 | 2,972 | 15,03 | 0,38 | 1,41 | 0,565 | |
| 15 | 10.03.2016 | 24,89 | 996,11 | 294,17 | 3,2 | 2,789 | 15,03 | 0,38 | 1,41 | 0,530 | |
| 16 | 11.03.2016 | 24,77 | 1004,23 | 294,09 | 3,2 | 2,812 | 15,03 | 0,38 | 1,41 | 0,535 | |
| 17 | 12.03.2016 | 23,99 | 1008,01 | 293,57 | 3,5 | 3,106 | 15,09 | 0,38 | 1,41 | 0,588 | |
| 18 | 13.03.2016 | 24,11 | 1009,89 | 293,65 | 3,7 | 3,257 | 15,35 | 0,39 | 1,38 | 0,606 | |
| 19 | 14.03.2016 | 24,23 | 1011,77 | 293,73 | 3,7 | 3,262 | 15,61 | 0,39 | 1,36 | 0,597 | |
| 20 | 15.03.2016 | 24,29 | 1001,71 | 293,77 | 4,9 | 4,260 | 16,89 | 0,42 | 1,26 | 0,721 | |
| 21 | 16.03.2016 | 24,92 | 1001,08 | 294,19 | 5,4 | 4,557 | 16,89 | 0,42 | 1,26 | 0,771 | |
| 22 | 17.03.2016 | 25,57 | 1000,43 | 294,61 | 5,4 | 4,547 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,772 | |
| 23 | 18.03.2016 | 24,29 | 1035,21 | 293,77 | 4,7 | 4,040 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,686 | |
| 24 | 19.03.2016 | 24,29 | 1035,21 | 293,77 | 4,7 | 4,040 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,686 | |
| 25 | 20.03.2016 | 24,29 | 1035,21 | 293,77 | 4,7 | 4,040 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,686 | |
| 26 | 21.03.2016 | 24,29 | 1035,21 | 293,77 | 4,7 | 4,040 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,686 | |
| 27 | 22.03.2016 | 23,06 | 1069,94 | 292,93 | 4,9 | 4,187 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,711 | |
| 28 | 23.03.2016 | 23,64 | 994,36 | 293,33 | 3,7 | 3,227 | 16,76 | 0,42 | 1,27 | 0,550 | |
| 29 | 24.03.2016 | 23,64 | 994,36 | 293,33 | 3,7 | 3,227 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,548 | |
| 30 | 25.03.2016 | 24,35 | 990,65 | 293,81 | 4,6 | 4,019 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,683 | |
| 31 | 26.03.2016 | 24,35 | 990,65 | 293,81 | 4,6 | 4,019 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,683 | |
| 32 | 27.03.2016 | 24,35 | 990,65 | 293,81 | 4,6 | 4,019 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,683 | |
| 33 | 28.03.2016 | 24,35 | 990,65 | 293,81 | 4,6 | 4,020 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,683 | |
| 34 | 29.03.2016 | 24,35 | 990,65 | 293,81 | 4,6 | 4,021 | 16,82 | 0,42 | 1,26 | 0,683 | |
| 35 | 30.03.2016 | 25,07 | 986,93 | 294,29 | 4,6 | 4,003 | 16,89 | 0,42 | 1,26 | 0,677 | |
| 36 | 31.03.2016 | 24,45 | 992,55 | 293,88 | 4,7 | 4,077 | 16,95 | 0,43 | 1,25 | 0,687 | |
| 37 | 01.04.2016 | 23,84 | 998,16 | 293,47 | 4,7 | 4,116 | 16,95 | 0,43 | 1,25 | 0,694 | |
| 38 | 02.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 16,95 | 0,43 | 1,25 | 0,648 | |
| 39 | 03.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 16,95 | 0,43 | 1,25 | 0,648 | |
| 40 | 04.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 16,95 | 0,43 | 1,25 | 0,648 | |
| 41 | 05.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 16,95 | 0,43 | 1,25 | 0,648 | |
| 42 | 06.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 17,01 | 0,43 | 1,25 | 0,645 | |
| 43 | 07.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 17,14 | 0,43 | 1,24 | 0,641 | |
| 44 | 08.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 17,14 | 0,43 | 1,24 | 0,641 | |
| 45 | 09.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 17,14 | 0,43 | 1,24 | 0,641 | |
| 46 | 10.04.2016 | 24,94 | 994,06 | 294,205 | 4,4 | 3,843 | 17,14 | 0,43 | 1,24 | 0,641 | |
| 47 | 11.04.2016 | 26,09 | 989,91 | 294,94 | 4,3 | 3,832 | 17,14 | 0,43 | 1,24 | 0,639 | |
| 48 | 12.04.2016 | 26,06 | 985,94 | 294,92 | 4,3 | 3,748 | 17,14 | 0,43 | 1,24 | 0,625 | |
| 49 | 13.04.2016 | 25,03 | 984,97 | 294,26 | 4,4 | 3,889 | 17,27 | 0,43 | 1,23 | 0,644 | |
| 50 | 14.04.2016 | 26,38 | 987,62 | 295,12 | 4,5 | 3,872 | 17,33 | 0,44 | 1,22 | 0,638 | |
| 51 | 15.04.2016 | 26,17 | 979,83 | 294,99 | 4,2 | 3,681 | 17,33 | 0,44 | 1,22 | 0,607 | |
| 52 | 16.04.2016 | 25,88 | 987,62 | 294,805 | 2,7 | 2,409 | 17,33 | 0,44 | 1,22 | 0,397 | |
| 53 | 17.04.2016 | 25,88 | 987,62 | 294,805 | 2,7 | 2,409 | 17,33 | 0,44 | 1,22 | 0,397 | |
| 54 | 18.04.2016 | 25,59 | 995,41 | 294,62 | 2,8 | 2,430 | 17,33 | 0,44 | 1,22 | 0,401 | |
| 55 | 19.04.2016 | 25,52 | 1000,48 | 294,58 | 3,9 | 3,449 | 17,33 | 0,44 | 1,22 | 0,568 | |
| 56 | 20.04.2016 | 26,18 | 996,32 | 295 | 3,4 | 2,982 | 17,40 | 0,44 | 1,22 | 0,490 | |
| 57 | 21.04.2016 | 26,18 | 996,32 | 295 | 3,4 | 2,982 | 17,46 | 0,44 | 1,21 | 0,488 | |
| 58 | 22.04.2016 | 26,86 | 992,14 | 295,42 | 3,3 | 2,969 | 17,46 | 0,44 | 1,21 | 0,486 | |
| 59 | 23.04.2016 | 25,09 | 989,91 | 294,3 | 3,6 | 3,194 | 17,46 | 0,44 | 1,21 | 0,523 | |
| 60 | 24.04.2016 | 25,09 | 989,91 | 294,3 | 3,6 | 3,194 | 17,46 | 0,44 | 1,21 | 0,523 | |
| 61 | 25.04.2016 | 23,42 | 987,58 | 293,18 | 3,6 | 3,199 | 17,46 | 0,44 | 1,21 | 0,523 | |
| 62 | 26.04.2016 | 23,79 | 984,21 | 293,435 | 3,4 | 3,067 | 17,46 | 0,44 | 1,21 | 0,502 | |
| 63 | 27.04.2016 | 24,17 | 980,83 | 293,69 | 3,4 | 3,054 | 17,53 | 0,44 | 1,21 | 0,498 | |
| 64 | 28.04.2016 | 24,73 | 986,77 | 294,065 | 3,4 | 3,044 | 17,59 | 0,44 | 1,21 | 0,494 | |
| 65 | 29.04.2016 | 25,31 | 992,69 | 294,44 | 3,4 | 3,059 | 17,59 | 0,44 | 1,21 | 0,497 | |
| 66 | 30.04.2016 | 26,22 | 995,28 | 295,02 | 3,8 | 3,404 | 17,59 | 0,44 | 1,21 | 0,553 | |
| 67 | 01.05.2016 | 26,22 | 995,28 | 295,02 | 3,8 | 3,404 | 17,59 | 0,44 | 1,21 | 0,553 | |
| 68 | 02.05.2016 | 27,16 | 997,84 | 295,6 | 3,8 | 3,407 | 17,59 | 0,44 | 1,21 | 0,553 | |
| 69 | 03.05.2016 | 25,00 | 1003,00 | 294,245 | 3,3 | 2,937 | 17,59 | 0,44 | 1,21 | 0,477 | |
| 70 | 04.05.2016 | 23,00 | 1008,00 | 292,89 | 3,3 | 2,966 | 17,65 | 0,44 | 1,20 | 0,480 | |
| 71 | 05.05.2016 | 25,28 | 999,22 | 294,425 | 3,7 | 3,286 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,473 | |
| 72 | 06.05.2016 | 25,28 | 999,22 | 294,425 | 3,7 | 3,286 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,473 | |
| 73 | 07.05.2016 | 25,28 | 999,22 | 294,425 | 3,7 | 3,286 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,473 | |
| 74 | 08.05.2016 | 27,75 | 990,25 | 295,96 | 3,6 | 3,237 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,467 | |
| 75 | 09.05.2016 | 29,74 | 989,26 | 297,11 | 3,7 | 3,292 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,474 | |
| 76 | 10.05.2016 | 30,28 | 982,72 | 297,41 | 4,5 | 4,020 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,579 | |
| 77 | 11.05.2016 | 30,88 | 979,12 | 297,74 | 4,2 | 3,747 | 22,00 | 0,55 | 0,96 | 0,487 | |

| Tag | Datum | Dampfdruck des Wassers p _w [hPa] | Druckdifferenz [hPa] | Temperatur des Gases [K] | Normbiogas-Volumen V _n ^{tr} des Gesamtgases [l _N] | Methanmenge Gesamt V _{CH₄} in [l _N] | CSB-Fracht AF-Zulauf [g/d] | CSB-Raumbelastung AF [g/(l*d)] | Hydraulische Verweilzeit AF [d] | CSB - Abbaugrad \hat{r}_{CSB} |
|-----|------------|---|----------------------|--------------------------|---|---|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 78 | 12.05.2016 | 31,17 | 971,83 | 297,9 | 4,4 | 3,921 | 22,13 | 0,56 | 0,96 | 0,506 |
| 79 | 13.05.2016 | 31,51 | 972,49 | 298,08 | 4,4 | 3,904 | 22,13 | 0,56 | 0,96 | 0,504 |
| 80 | 14.05.2016 | 29,47 | 981,53 | 296,96 | 3,9 | 3,496 | 22,13 | 0,56 | 0,96 | 0,451 |
| 81 | 15.05.2016 | 29,47 | 981,53 | 296,96 | 3,9 | 3,496 | 22,13 | 0,56 | 0,96 | 0,451 |
| 82 | 16.05.2016 | 29,47 | 981,53 | 296,96 | 3,9 | 3,496 | 22,13 | 0,56 | 0,96 | 0,451 |
| 83 | 17.05.2016 | 27,55 | 990,45 | 295,84 | 4,0 | 3,541 | 22,13 | 0,56 | 0,96 | 0,457 |
| 84 | 18.05.2016 | 27,39 | 987,61 | 295,74 | 3,5 | 3,167 | 22,26 | 0,56 | 0,95 | 0,407 |
| 85 | 19.05.2016 | 28,09 | 985,91 | 296,16 | 4,2 | 3,736 | 21,11 | 0,53 | 1,01 | 0,506 |
| 86 | 20.05.2016 | 29,05 | 990,95 | 296,72 | 3,4 | 2,990 | 21,11 | 0,53 | 1,01 | 0,405 |
| 87 | 21.05.2016 | 28,98 | 989,02 | 296,68 | 7,0 | 6,051 | 21,11 | 0,53 | 1,01 | 0,819 |
| 88 | 22.05.2016 | 28,98 | 989,02 | 296,68 | 7,0 | 6,051 | 21,11 | 0,53 | 1,01 | 0,819 |
| 89 | 23.05.2016 | 28,98 | 989,02 | 296,68 | 7,0 | 6,051 | 21,11 | 0,53 | 1,01 | 0,819 |
| 90 | 24.05.2016 | 28,91 | 987,09 | 296,64 | 3,1 | 2,645 | 21,11 | 0,53 | 1,01 | 0,358 |
| 91 | 25.05.2016 | 27,64 | 989,36 | 295,89 | 6,0 | 5,172 | 19,96 | 0,50 | 1,06 | 0,740 |
| 92 | 26.05.2016 | 28,79 | 990,21 | 296,57 | 3,9 | 3,200 | 18,93 | 0,48 | 1,12 | 0,483 |
| 93 | 27.05.2016 | 29,97 | 988,03 | 297,24 | 3,7 | 3,152 | 18,93 | 0,48 | 1,12 | 0,476 |
| 94 | 28.05.2016 | | | | | | | | | |
| 95 | 29.05.2016 | | | | | | | | | |
| 96 | 30.05.2016 | | | | | | | | | |
| 97 | 31.05.2016 | 30,15 | 981,85 | 297,34 | | | 18,93 | 0,48 | 1,12 | |
| 98 | 01.06.2016 | 31,17 | 983,83 | 297,9 | 3,1 | 2,514 | 17,91 | 0,45 | 1,18 | 0,401 |
| 99 | 02.06.2016 | 30,29 | 983,71 | 297,42 | 2,8 | 2,413 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,348 |
| 100 | 03.06.2016 | 30,38 | 983,62 | 297,47 | 2,3 | 2,043 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,294 |
| 101 | 04.06.2016 | 31,52 | 986,98 | 298,085 | 3,9 | 3,349 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,483 |
| 102 | 05.06.2016 | 31,52 | 986,98 | 298,085 | 3,9 | 3,349 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,483 |
| 103 | 06.06.2016 | 32,69 | 990,31 | 298,7 | 4,0 | 3,354 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,483 |
| 104 | 07.06.2016 | 33,59 | 994,41 | 299,16 | 7,4 | 6,073 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,875 |
| 105 | 08.06.2016 | 33,45 | 989,55 | 299,09 | 4,5 | 3,585 | 21,75 | 0,55 | 0,98 | 0,471 |
| 106 | 09.06.2016 | 32,93 | 986,07 | 298,825 | 4,8 | 3,937 | 22,77 | 0,57 | 0,93 | 0,494 |
| 107 | 10.06.2016 | 32,42 | 982,58 | 298,56 | 4,8 | 3,899 | 22,77 | 0,57 | 0,93 | 0,489 |
| 108 | 11.06.2016 | 32,15 | 977,35 | 298,42 | 5,1 | 4,176 | 22,77 | 0,57 | 0,93 | 0,524 |
| 109 | 12.06.2016 | 32,15 | 977,35 | 298,42 | 5,1 | 4,176 | 22,77 | 0,57 | 0,93 | 0,524 |
| 110 | 13.06.2016 | 31,88 | 972,12 | 298,28 | 5,1 | 4,156 | 22,77 | 0,57 | 0,93 | 0,521 |
| 111 | 14.06.2016 | 28,38 | 974,62 | 296,33 | 6,7 | 5,666 | 22,77 | 0,57 | 0,93 | 0,698 |
| 112 | 15.06.2016 | 31,60 | 974,40 | 298,13 | 5,5 | 4,604 | 23,79 | 0,60 | 0,89 | 0,553 |
| 113 | 16.06.2016 | 30,77 | 981,23 | 297,68 | 5,7 | 4,734 | 23,03 | 0,58 | 0,92 | 0,587 |
| 114 | 17.06.2016 | 30,86 | 976,14 | 297,73 | 5,9 | 4,946 | 23,03 | 0,58 | 0,92 | 0,614 |
| 115 | 18.06.2016 | 30,46 | 985,04 | 297,51 | 5,6 | 4,703 | 23,03 | 0,58 | 0,92 | 0,584 |
| 116 | 19.06.2016 | 30,46 | 985,04 | 297,51 | 5,6 | 4,703 | 23,03 | 0,58 | 0,92 | 0,584 |
| 117 | 20.06.2016 | 30,06 | 993,94 | 297,29 | 5,7 | 4,749 | 23,03 | 0,58 | 0,92 | 0,589 |
| 118 | 21.06.2016 | 30,68 | 992,32 | 297,63 | 5,2 | 4,366 | 23,03 | 0,58 | 0,92 | 0,542 |
| 119 | 22.06.2016 | 32,55 | 994,45 | 298,63 | 5,4 | 4,594 | 22,26 | 0,56 | 0,95 | 0,590 |
| 120 | 23.06.2016 | 34,26 | 995,74 | 299,5 | 6,4 | 5,303 | 20,72 | 0,52 | 1,02 | 0,731 |
| 121 | 24.06.2016 | 36,06 | 996,94 | 300,37 | 6,3 | 5,224 | 20,72 | 0,52 | 1,02 | 0,720 |
| 122 | 25.06.2016 | 34,76 | 992,74 | 299,745 | 6,9 | 5,692 | 20,72 | 0,52 | 1,02 | 0,785 |
| 123 | 26.06.2016 | 34,76 | 992,74 | 299,745 | 6,9 | 5,692 | 20,72 | 0,52 | 1,02 | 0,785 |
| 124 | 27.06.2016 | 33,51 | 988,49 | 299,12 | 6,8 | 5,680 | 20,72 | 0,52 | 1,02 | 0,783 |
| 125 | 28.06.2016 | 33,53 | 988,47 | 299,13 | 7,2 | 6,036 | 20,72 | 0,52 | 1,02 | 0,832 |
| 126 | 29.06.2016 | 33,27 | 981,73 | 299 | 5,4 | 4,478 | 19,19 | 0,48 | 1,11 | 0,667 |
| 127 | 30.06.2016 | 33,29 | 983,71 | 299,01 | 5,6 | 4,708 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,696 |
| 128 | 01.07.2016 | 35,08 | 982,92 | 299,9 | 5,9 | 4,945 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,731 |
| 129 | 02.07.2016 | 33,32 | 987,68 | 299,025 | 6,2 | 5,264 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,779 |
| 130 | 03.07.2016 | 33,32 | 987,68 | 299,025 | 6,2 | 5,264 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,779 |
| 131 | 04.07.2016 | 31,64 | 992,36 | 298,15 | 6,3 | 5,305 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,785 |
| 132 | 05.07.2016 | 33,07 | 983,93 | 298,9 | 3,5 | 3,003 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,444 |
| 133 | 06.07.2016 | 32,67 | 990,33 | 298,69 | 3,7 | 3,199 | 19,44 | 0,49 | 1,09 | 0,470 |
| 134 | 07.07.2016 | 31,66 | 993,34 | 298,16 | 4,2 | 3,662 | 19,44 | 0,49 | 1,09 | 0,538 |
| 135 | 08.07.2016 | 33,70 | 986,30 | 299,22 | 7,6 | 6,327 | 19,44 | 0,49 | 1,09 | 0,930 |
| 136 | 09.07.2016 | 34,63 | 981,37 | 299,68 | 6,9 | 5,722 | 19,44 | 0,49 | 1,09 | 0,841 |
| 137 | 10.07.2016 | 34,63 | 981,37 | 299,68 | 6,9 | 5,722 | 19,44 | 0,49 | 1,09 | 0,841 |
| 138 | 11.07.2016 | 35,58 | 976,42 | 300,14 | 6,8 | 5,685 | 19,44 | 0,49 | 1,09 | 0,835 |
| 139 | 12.07.2016 | 35,81 | 981,19 | 300,25 | 6,6 | 5,517 | 19,44 | 0,49 | 1,09 | 0,811 |
| 140 | 13.07.2016 | 35,24 | 980,76 | 299,98 | 6,3 | 5,226 | 19,44 | 0,49 | 1,09 | 0,768 |
| 141 | 14.07.2016 | 33,66 | 987,34 | 299,2 | 5,1 | 4,224 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,625 |
| 142 | 15.07.2016 | 31,64 | 995,36 | 298,15 | 7,0 | 5,793 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,857 |
| 143 | 16.07.2016 | 32,72 | 992,78 | 298,715 | 6,6 | 5,459 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,807 |
| 144 | 17.07.2016 | 32,72 | 992,78 | 298,715 | 6,6 | 5,459 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,807 |
| 145 | 18.07.2016 | 33,82 | 990,18 | 299,28 | 6,6 | 5,434 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,804 |
| 146 | 19.07.2016 | 36,42 | 966,58 | 300,54 | 7,8 | 6,450 | 19,32 | 0,49 | 1,10 | 0,954 |
| 147 | 20.07.2016 | 38,18 | 978,82 | 301,35 | 5,9 | 4,718 | 19,19 | 0,48 | 1,11 | 0,703 |
| 148 | 21.07.2016 | 38,13 | 980,87 | 301,33 | 7,2 | 5,884 | 19,76 | 0,50 | 1,07 | 0,851 |
| 149 | 22.07.2016 | 39,14 | 979,86 | 301,78 | 6,6 | 5,500 | 19,76 | 0,50 | 1,07 | 0,795 |
| 150 | 23.07.2016 | 39,28 | 980,72 | 301,84 | 6,9 | 5,704 | 19,76 | 0,50 | 1,07 | 0,825 |
| 151 | 24.07.2016 | 39,28 | 980,72 | 301,84 | 6,9 | 5,704 | 19,76 | 0,50 | 1,07 | 0,825 |
| 152 | 25.07.2016 | 39,41 | 981,59 | 301,9 | 6,9 | 5,666 | 19,76 | 0,50 | 1,07 | 0,819 |
| 153 | 26.07.2016 | 39,16 | 983,84 | 301,79 | 6,3 | 5,212 | 19,76 | 0,50 | 1,07 | 0,754 |
| 154 | 27.07.2016 | 37,36 | 980,64 | 300,98 | 4,6 | 3,883 | 20,34 | 0,51 | 1,04 | 0,546 |
| 155 | 28.07.2016 | 38,22 | 980,78 | 301,37 | 4,2 | 3,561 | 20,91 | 0,53 | 1,01 | 0,486 |
| 156 | 29.07.2016 | 37,54 | 980,46 | 301,06 | 9,0 | 7,072 | 20,91 | 0,53 | 1,01 | 0,966 |
| 157 | 30.07.2016 | 35,45 | 981,05 | 300,08 | 6,9 | 5,769 | 20,91 | 0,53 | 1,01 | 0,788 |
| 158 | 31.07.2016 | 35,45 | 981,05 | 300,08 | 6,9 | 5,769 | 20,91 | 0,53 | 1,01 | 0,788 |

| Tag | Datum | Dampfdruck des Wassers p_w [hPa] | Druckdifferenz [hPa] | Temperatur des Gases [K] | Normbiogas-Volumen V_n^{tr} des Gesamtgases [l_N] | Methanmenge Gesamt V_{CH_4} in [l_N] | CSB-Fracht AF-Zulauf [g/d] | CSB-Raumbelastung AF [g/(l*d)] | Hydraulische Verweilzeit AF [d] | CSB - Abbaugrad η_{CSB} |
|-----|------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------|---|--|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 159 | 01.08.2016 | 35,45 | 981,05 | 300,08 | 6,9 | 5,769 | 20,91 | 0,53 | 1,01 | 0,788 |
| 160 | 02.08.2016 | 33,47 | 981,53 | 299,1 | 7,0 | 5,790 | 20,91 | 0,53 | 1,01 | 0,791 |
| 161 | 03.08.2016 | 34,54 | 983,96 | 299,635 | 3,8 | 3,139 | 21,49 | 0,54 | 0,99 | 0,417 |
| 162 | 04.08.2016 | 34,54 | 983,96 | 299,635 | 3,8 | 3,139 | 20,66 | 0,52 | 1,03 | 0,434 |
| 163 | 05.08.2016 | 34,54 | 983,96 | 299,635 | 3,8 | 3,139 | 20,66 | 0,52 | 1,03 | 0,434 |
| 164 | 06.08.2016 | 34,54 | 983,96 | 299,635 | 3,8 | 3,139 | 20,66 | 0,52 | 1,03 | 0,434 |
| 165 | 07.08.2016 | 34,54 | 983,96 | 299,635 | 3,8 | 3,139 | 20,66 | 0,52 | 1,03 | 0,434 |
| 166 | 08.08.2016 | 35,64 | 986,36 | 300,17 | 3,8 | 3,297 | 20,66 | 0,52 | 1,03 | 0,456 |
| 167 | 09.08.2016 | 32,61 | 990,39 | 298,66 | 5,2 | 4,643 | 20,66 | 0,52 | 1,03 | 0,642 |
| 168 | 10.08.2016 | 32,40 | 990,60 | 298,55 | 4,5 | 3,951 | 19,83 | 0,50 | 1,07 | 0,569 |
| 169 | 11.08.2016 | 32,17 | 991,83 | 298,43 | 5,2 | 4,485 | 16,37 | 0,41 | 1,30 | 0,783 |
| 170 | 12.08.2016 | 32,88 | 993,12 | 298,8 | 3,9 | 3,381 | 16,37 | 0,41 | 1,30 | 0,590 |
| 171 | 13.08.2016 | | | | | | | | | |
| 172 | 14.08.2016 | | | | | | | | | |
| 173 | 15.08.2016 | | | | | | | | | |
| 174 | 16.08.2016 | | | | | | | | | |
| 175 | 17.08.2016 | | | | | | | | | |

!LWERT
MEDIAN

29,26

989,94

296,66
296,66

4,76

4,05

18,84

0,62
0,60

1.Tabellen CSB- / N- Analytik

CSB- / N- Analytik-Ergebnisse

| Probenart | Abwassermengen Q [l/h] | | Rezirkulationen [-] | | O2-Gehalt | | pH-Wert | |
|---|------------------------|---------|---------------------|----------------|---------------|-----------------|---------|------|
| | Qzu,AF | Qzu,PNA | RV (B3->B1) | RS (NK->B2) | Sättigung [%] | Konz. [mg/l] | B1 | B2 |
| Einfahrphase | | | | | | | | |
| A) nur PNA mit sehr starker Belüftung Qzu,PNA = 0,51l/h, RV=5,16, RS=1,69 | | | | | | | | |
| 23.02.2016 | | 0,51 | 5,16 | 1,69 | 79,40 | 6,31 | 6,61 | 7,26 |
| B) AF+PNA mit starker Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,12-1,17l/h, RV=2,23-3,86, RS=1,10-1,54 | | | | | | | | |
| 29.02.2016 | 1,08 | 1,12 | 3,86 | 1,10 | 43,46 | 3,43 | 7,32 | 7,73 |
| 04.03.2016 | 1,13 | 1,17 | 2,23 | 1,48 | 47,04 | 3,66 | 7,19 | 7,55 |
| 07.03.2016 | 1,13 | 1,15 | 2,45 | 1,54 | 36,64 | 2,80 | 7,18 | 7,53 |
| C) AF+PNA mit mittlerer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,17-1,33l/h, RV=0,69-2,40, RS=1,17-1,38 | | | | | | | | |
| 08.03.2016 | 1,13 | 1,17 | 2,40 | 1,32 | 12,96 | 0,95 | 7,20 | 7,28 |
| 12.03.2016 | 1,13 | 1,18 | 0,69 | 1,38 | 16,53 | 1,23 | 7,13 | 7,29 |
| 14.03.2016 | 1,13 | 1,22 | 1,69 | 1,21 | 8,74 | 0,66 | 7,15 | 7,30 |
| 15.03.2016 | 1,13 | 1,32 | 1,53 | 1,17 | 12,64 | 0,90 | 7,12 | 7,35 |
| 16.03.2016 | 1,13 | 1,32 | 1,64 | 1,18 | 12,55 | 0,90 | 7,11 | 7,35 |
| D) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,31-1,38l/h, RV=1,74-3,48, RS=1,04-1,44 | | | | | | | | |
| 23.03.2016 | 1,13 | 1,31 | 1,74 | 1,04 | 3,49 | 0,21 | 7,13 | 7,47 |
| 30.03.2016 | 1,13 | 1,32 | 2,14 | 1,18 | 8,96 | 0,64 | 7,18 | 7,60 |
| 06.04.2016 | 1,13 | 1,33 | 2,23 | 1,44 | 8,29 | 0,56 | 7,15 | 7,60 |
| 13.04.2016 | 1,13 | 1,35 | 1,93 | 1,34 | 2,38 | 0,14 | 7,19 | 7,51 |
| 20.04.2016 | 1,13 | 1,36 | 1,62 | 1,35 | 2,80 | 0,16 | 7,05 | 7,49 |
| 27.04.2016 | 1,13 | 1,37 | 1,88 | 1,25 | 0,67 | 0,03 | 7,11 | 7,61 |
| 04.05.2016 | 1,13 | 1,38 | 3,48 | 1,08 | 7,70 | 0,55 | 7,12 | 7,52 |
| E) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,40-1,74l/h, RV=5,35-8,33, RS=0,36-1,03 | | | | | | | | |
| 11.05.2016 | 1,46 | 1,72 | 5,35 | 0,83 | 5,85 | 0,37 | 7,09 | 7,54 |
| 18.05.2016 | 1,46 | 1,74 | 5,52 | 0,95 | 1,80 | 0,10 | 7,13 | 7,61 |
| 25.05.2016 | 1,46 | 1,56 | 7,44 | 1,03 | 4,96 | 0,33 | 7,16 | 7,58 |
| 01.06.2016 | 1,46 | 1,40 | 8,33 | 0,80 | 3,70 | 0,24 | 7,24 | 7,62 |
| 08.06.2016 | 1,46 | 1,70 | 7,40 | 0,36 | 1,55 | 0,08 | 7,17 | 7,63 |
| F) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,50-1,86l/h, RV=6,01-10,02, RS=0,34-0,40 | | | | | | | | |
| 15.06.2016 | 1,88 | 1,86 | 7,28 | 0,37 | 2,02 | 0,11 | 7,11 | 7,70 |
| 22.06.2016 | 1,88 | 1,74 | 7,93 | 0,40 | 4,51 | 0,29 | 7,10 | 7,69 |
| 29.06.2016 | 1,88 | 1,50 | 8,93 | 0,38 | 2,41 | 0,14 | 6,90 | 7,16 |
| 06.07.2016 | 1,88 | 1,52 | 10,02 | 0,34 | 0,73 | 0,03 | 6,95 | 6,88 |
| 13.07.2016 | 1,88 | 1,52 | 7,04 | 0,37 | 1,00 | 0,04 | 7,02 | 6,64 |
| 20.07.2016 | 1,88 | 1,50 | 6,01 | 0,37 | 2,49 | 0,15 | 7,09 | 6,45 |
| G) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,01-1,68l/h, RV=2,36-4,82, RS=0,17-0,35 | | | | | | | | |
| 27.07.2016 | 1,88 | 1,59 | 2,90 | 0,35 | 5,51 | 0,39 | 6,98 | 6,20 |
| 03.08.2016 | 1,88 | 1,68 | 2,36 | 0,30 | 2,53 | 0,13 | 6,96 | 5,86 |
| 10.08.2016 | 1,88 | 1,55 | 2,77 | 0,17 | 0,60 | 0,02 | 7,06 | 5,75 |
| 17.08.2016 | 1,88 | 1,01 | 4,82 | 0,30 | 8,24 | 0,62 | 7,23 | 5,73 |
| 24.08.2016 | | | | | | | | |
| 31.08.2016 | | | | | | | | |

Anlage AVI

CSB- / N- Analytik-Ergebnisse

| Probenart | | CSB _{gel} | | | | | | | | Out | Ablaufgrenzwert Gkl. 3 und 4 |
|---|------|--------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-------|---------------------------------|
| | | AF-Input | PNA- bzw. Deni-Input | CSB-Abbau- grad AF [%] | B1-Input mit Rezirk. | B1-Output | B2-Input mit RS | B2-Output | B3-Output (NKB) | | |
| Einfahrphase | | | | | | | | | | | |
| 90 | | | | | | | | | | | |
| A) nur PNA mit sehr starker Belüftung Q_{zu},PNA = 0,51l/h, RV=5,16, RS=1,69 | | | | | | | | | | | |
| 23.02.2016 | mg/l | | 796 | | | 99,0 | | 14,0 | 14,0 | 14,0 | eingehalten |
| | l/h | | 0,51 | | | 3,14 | | 4,00 | 0,51 | | |
| | mg/h | | 406,0 | | 442,8 | 311,0 | 323,1 | 56,0 | 7,1 | | |
| B) AF+PNA mit starker Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,12-1,17l/h, RV=2,23-3,86, RS=1,10-1,54 | | | | | | | | | | | |
| 29.02.2016 | mg/l | 716 | 488 | 31,84 | | 156,0 | | 117,0 | 110,0 | 114,0 | überschritten |
| | l/h | 1,08 | 1,12 | | | 5,44 | | 6,68 | 1,12 | | |
| | mg/h | 775,4 | 546,6 | | 1052,4 | 849,1 | 984,7 | 781,0 | 123,2 | | |
| 04.03.2016 | mg/l | 646 | | | | | | | | | |
| 07.03.2016 | mg/l | 587 | 164 | 72,06 | | 99,0 | | 37,5 | 30,0 | 30,0 | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,15 | | | 3,97 | | 5,74 | 1,15 | | |
| | mg/h | 660,4 | 188,6 | | 294,3 | 392,8 | 445,9 | 215,2 | 34,5 | | |
| C) AF+PNA mit mittlerer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,17-1,33l/h, RV=0,69-2,40, RS=1,17-1,38 | | | | | | | | | | | |
| 08.03.2016 | mg/l | 461 | | | | | | | | | |
| 12.03.2016 | mg/l | 584 | | | | | | | | | |
| 14.03.2016 | mg/l | 563 | 186 | 66,96 | | 25,1 | | 24,5 | 28,1 | 26,1 | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,22 | | | 3,28 | | 4,76 | 1,22 | | |
| | mg/h | 633,4 | 226,9 | | 277,4 | 82,4 | 123,9 | 116,6 | 34,3 | | |
| 15.03.2016 | mg/l | 645 | | | | | | | | | |
| 16.03.2016 | mg/l | 691 | 159,6 | 76,90 | | 29,3 | | 26,9 | 24,6 | 27,3 | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,32 | | | 3,48 | | 5,04 | 1,32 | | |
| | mg/h | 777,4 | 210,7 | | 268,9 | 102,1 | 140,4 | 135,6 | 32,5 | | |
| D) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,31-1,38l/h, RV=1,74-3,48, RS=1,04-1,44 | | | | | | | | | | | |
| 23.03.2016 | mg/l | 655 | 140,7 | 78,52 | | 15,0 | | 17,9 | 15,0 | 17,1 | eingehalten |
| 30.03.2016 | mg/l | 501 | 114,9 | 77,07 | | 15,9 | | 20,9 | 22,0 | 22,3 | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,32 | | | 4,14 | | 5,70 | 1,32 | | |
| | mg/h | 563,6 | 151,7 | | 210,7 | 65,9 | 100,2 | 119,2 | 29,0 | | |
| 06.04.2016 | mg/l | 418 | | | | 19,5 | | 20,3 | 17,4 | 27,6 | eingehalten |
| 13.04.2016 | mg/l | 499 | 67,2 | 86,53 | | 26,6 | | 35,1 | 34,1 | 32,4 | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,35 | | | 3,96 | | 5,76 | 1,35 | | |
| | mg/h | 561,4 | 90,7 | | 182,2 | 105,2 | 166,9 | 202,3 | 46,0 | | |
| 20.04.2016 | mg/l | 483 | 87,6 | 81,86 | | 19,2 | | 22,8 | 21,9 | 24,0 | eingehalten |
| 27.04.2016 | mg/l | 352 | 58,8 | 83,30 | | 15,3 | | 21,6 | 20,1 | 19,2 | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,37 | | | 3,95 | | 5,66 | 1,37 | | |
| | mg/h | 396,0 | 80,6 | | 136,2 | 60,4 | 94,8 | 122,2 | 27,5 | | |
| 04.05.2016 | mg/l | 372 | 54,6 | 85,32 | | 15,0 | | 18,8 | 15,0 | 15,0 | eingehalten |
| E) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,40-1,74l/h, RV=5,35-8,33, RS=0,36-1,03 | | | | | | | | | | | |
| 11.05.2016 | mg/l | 470 | 95,4 | 79,70 | | 15,2 | | 17,9 | 17,8 | 15,0 | eingehalten |
| | l/h | 1,46 | 1,72 | | | 10,92 | | 12,35 | 1,72 | | |
| | mg/h | 685,3 | 164,1 | | 328,8 | 166,0 | 191,4 | 221,1 | 30,6 | | |
| 18.05.2016 | mg/l | 572 | 58,2 | 89,83 | | 16,8 | | 19,6 | 16,3 | 15,0 | eingehalten |
| 25.05.2016 | mg/l | 533 | 141,4 | | | 18,5 | | 19,1 | 18,7 | 16,3 | eingehalten |
| | l/h | 1,46 | 1,56 | | | 13,17 | | 14,77 | 1,56 | | |
| | mg/h | 777,1 | 220,6 | | 442,3 | 243,6 | 273,6 | 282,2 | 29,2 | | |
| 01.06.2016 | mg/l | 530 | 77,8 | | | 16,0 | | 23,7 | 23,4 | 20,9 | eingehalten |
| 08.06.2016 | mg/l | 436 | 60 | | | 28,6 | | 14,1 | 13,0 | 13,9 | eingehalten |
| | l/h | 1,46 | 1,70 | | | 14,28 | | 14,89 | 1,70 | | |
| | mg/h | 635,7 | 102,0 | | 279,1 | 408,3 | 416,2 | 209,7 | 22,2 | | |
| F) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,50-1,86l/h, RV=6,01-10,02, RS=0,34-0,40 | | | | | | | | | | | |
| 15.06.2016 | mg/l | 556 | 81,2 | | | 16,1 | | 14,1 | 14,9 | 8,5 | eingehalten |
| 22.06.2016 | mg/l | 699 | 94,8 | | | 12,1 | | 13,1 | 12,5 | 13,5 | eingehalten |
| | l/h | 1,88 | 1,74 | | | 15,54 | | 16,23 | 1,74 | | |
| | mg/h | 1310,6 | 165,0 | | 345,7 | 187,2 | 195,9 | 212,7 | 21,7 | | |
| 29.06.2016 | | | | | | | | | | | |
| 06.07.2016 | mg/l | 386 | 73,8 | | | 24,4 | | 24,7 | 22,6 | | eingehalten |
| | l/h | 1,88 | 1,52 | | | 16,75 | | 17,27 | 1,52 | | |
| | mg/h | 723,8 | 112,2 | | 488,4 | 408,7 | 420,4 | 426,5 | 34,4 | | |
| 13.07.2016 | | | | | | | | | | | |
| 20.07.2016 | mg/l | 619 | 256,4 | | | 24,6 | | 26,5 | 24,7 | | eingehalten |
| | l/h | 1,88 | 1,50 | | | 10,52 | | 11,07 | 1,50 | | |
| | mg/h | 1160,6 | 384,6 | | 623,5 | 258,7 | 272,4 | 293,4 | 37,1 | | |
| G) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,01-1,68l/h, RV=2,36-4,82, RS=0,17-0,35 | | | | | | | | | | | |
| 27.07.2016 | | | | | | | | | | | |
| 03.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 10.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 17.08.2016 | mg/l | 340 | 121 | | | 32,4 | | 28,1 | 26,8 | | eingehalten |
| | l/h | 1,88 | 1,01 | | | 5,88 | | 6,18 | 1,01 | | |
| | mg/h | 637,5 | 122,2 | | 259,0 | 190,5 | 198,6 | 173,7 | 27,1 | | |
| 24.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 31.08.2016 | | | | | | | | | | | |

Anlage AVI

CSB- / N- Analytik-Ergebnisse

| Probenart | | NH ₄ -N | | | | | | | | | Ablaufgrenzwert Gkl. 3 und 4 |
|---|------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------|-----------|--------------------|-----------|------------|-----|---------------------------------|
| | | AF-Input | PNA- bzw. Denl-Input | CSB/NH ₄ -N B1-Input | mit Rezirk. | B1-Output | B2-Input mit RS | B2-Output | Outp ut | Out | |
| Einfahrphase | | Anammox: 1,4 | | | | | | | | | 10 |
| A) nur PNA mit sehr starker Belüftung Q_{zu},PNA = 0,51l/h, RV=5,16, RS=1,69 | | | | | | | | | | | |
| 23.02.2016 | mg/l | 35,5 | | 4,5 | | | 0,9 | | 0,9 | | eingehalten |
| | l/h | 0,51 | | 3,14 | | | 4,00 | | 0,51 | | |
| | mg/h | 18,1 | | 21,6 | | | 20,5 | | 14,1 | | |
| B) AF+PNA mit starker Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,12-1,17l/h, RV=2,23-3,86, RS=1,10-1,54 | | | | | | | | | | | |
| 29.02.2016 | mg/l | 3,0 | 56,2 | 13,0 | | | 0,9 | | 0,9 | | eingehalten |
| | l/h | 1,08 | 1,12 | 5,44 | | | 6,68 | | 1,12 | | |
| | mg/h | 3,2 | 62,9 | 15,7 | | | 66,8 | | 70,8 | | |
| 04.03.2016 | mg/l | 5,8 | | | | | | | | | |
| 07.03.2016 | mg/l | 3,3 | 48,0 | 7,0 | | | 0,9 | | 0,9 | | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,15 | 3,97 | | | 5,74 | | 1,15 | | |
| | mg/h | 3,7 | 55,2 | 5,1 | | | 57,7 | | 27,8 | | |
| C) AF+PNA mit mittlerer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,17-1,33l/h, RV=0,69-2,40, RS=1,17-1,38 | | | | | | | | | | | |
| 08.03.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 12.03.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 14.03.2016 | mg/l | 5,2 | 47,0 | 8,7 | | | 1,0 | | 1,0 | | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,22 | 3,28 | | | 4,76 | | 1,22 | | |
| | mg/h | 5,8 | 57,3 | 4,7 | | | 59,4 | | 28,6 | | |
| 15.03.2016 | mg/l | 1,6 | | | | | | | | | |
| 16.03.2016 | mg/l | 1,0 | 49,1 | 12,0 | | | 1,0 | | 1,0 | | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,32 | 3,48 | | | 5,04 | | 1,32 | | |
| | mg/h | 1,1 | 64,8 | 4,0 | | | 67,0 | | 41,8 | | |
| D) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,31-1,38l/h, RV=1,74-3,48, RS=1,04-1,44 | | | | | | | | | | | |
| 23.03.2016 | mg/l | 52,3 | | 18,9 | | | | | | | |
| 30.03.2016 | mg/l | 12,0 | 51,1 | 21,1 | | | 11,3 | | 12,0 | | überschritten |
| | l/h | 1,13 | 1,32 | 4,14 | | | 5,70 | | 1,32 | | |
| | mg/h | 13,5 | 67,5 | 2,1 | | | 99,4 | | 87,5 | | |
| 06.04.2016 | mg/l | 50,6 | | | | | | | | | |
| 13.04.2016 | mg/l | 1,83 | 42,8 | 13,9 | | | 1,0 | | 1,0 | | eingehalten |
| | l/h | 1,13 | 1,35 | 3,96 | | | 5,76 | | 1,35 | | |
| | mg/h | 2,1 | 57,8 | 3,0 | | | 60,4 | | 55,0 | | |
| 20.04.2016 | mg/l | 71,0 | | | | | | | | | |
| 27.04.2016 | mg/l | 18,0 | 40,7 | 21,1 | | | 11,3 | | 10,6 | | überschritten |
| | l/h | 1,13 | 1,37 | 3,95 | | | 5,66 | | 1,37 | | |
| | mg/h | 20,2 | 55,8 | 1,6 | | | 84,7 | | 83,3 | | |
| 04.05.2016 | mg/l | 39,1 | | | | | | | | | |
| E) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,40-1,74l/h, RV=5,35-8,33, RS=0,36-1,03 | | | | | | | | | | | |
| 11.05.2016 | mg/l | 5,2 | 41,2 | 13,4 | | | 7,6 | | 6,5 | | eingehalten |
| | l/h | 1,46 | 1,72 | 10,92 | | | 12,35 | | 1,72 | | |
| | mg/h | 7,6 | 70,9 | 2,3 | | | 140,9 | | 146,4 | | |
| 18.05.2016 | mg/l | 42,6 | | | | | | | | | |
| 25.05.2016 | mg/l | 1,0 | 40,6 | 9,46 | | | 3,69 | | 1,81 | | eingehalten |
| | l/h | 1,46 | 1,56 | 13,17 | | | 14,77 | | 1,56 | | |
| | mg/h | 1,5 | 63,3 | 4,2 | | | 106,2 | | 124,6 | | |
| 01.06.2016 | mg/l | 42,2 | | | | | | | | | |
| 08.06.2016 | mg/l | 4,4 | 43,7 | 12,26 | | | 6,71 | | 4,6 | | eingehalten |
| | l/h | 1,46 | 1,70 | 14,28 | | | 14,89 | | 1,70 | | |
| | mg/h | 6,4 | 74,3 | 1,8 | | | 158,7 | | 175,1 | | |
| F) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,50-1,86l/h, RV=6,01-10,02, RS=0,34-0,40 | | | | | | | | | | | |
| 15.06.2016 | mg/l | 46,9 | | | | | | | | | |
| 22.06.2016 | mg/l | 2,3 | 47,2 | 29 | | | 30,5 | | 28,95 | | überschritten |
| | l/h | 1,88 | 1,74 | 15,54 | | | 16,23 | | 1,74 | | |
| | mg/h | 4,2 | 82,1 | 0,7 | | | 503,0 | | 450,6 | | |
| 29.06.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 06.07.2016 | mg/l | 3,8 | 48,1 | 17,9 | | | 12,5 | | 10,75 | | überschritten |
| | l/h | 1,88 | 1,52 | 16,75 | | | 17,27 | | 1,52 | | |
| | mg/h | 7,1 | 73,1 | 1,9 | | | 263,5 | | 299,8 | | |
| 13.07.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 20.07.2016 | mg/l | 2,2 | 51,2 | 12,1 | | | 4,78 | | 3,49 | | eingehalten |
| | l/h | 1,88 | 1,50 | 10,52 | | | 11,07 | | 1,50 | | |
| | mg/h | 4,1 | 76,8 | 5,2 | | | 119,9 | | 127,2 | | |
| G) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu},AFund Q_{zu},PNA = 1,01-1,68l/h, RV=2,36-4,82, RS=0,17-0,35 | | | | | | | | | | | |
| 27.07.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 03.08.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 10.08.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 17.08.2016 | mg/l | 17,18 | 48,8 | 25,9 | | | 7,16 | | 2,49 | | eingehalten |
| | l/h | 1,88 | 1,01 | 5,88 | | | 6,18 | | 1,01 | | |
| | mg/h | 32,2 | 49,3 | 3,1 | | | 84,1 | | 152,2 | | |
| 24.08.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 31.08.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |

Anlage AVI

CSB- / N- Analytik-Ergebnisse

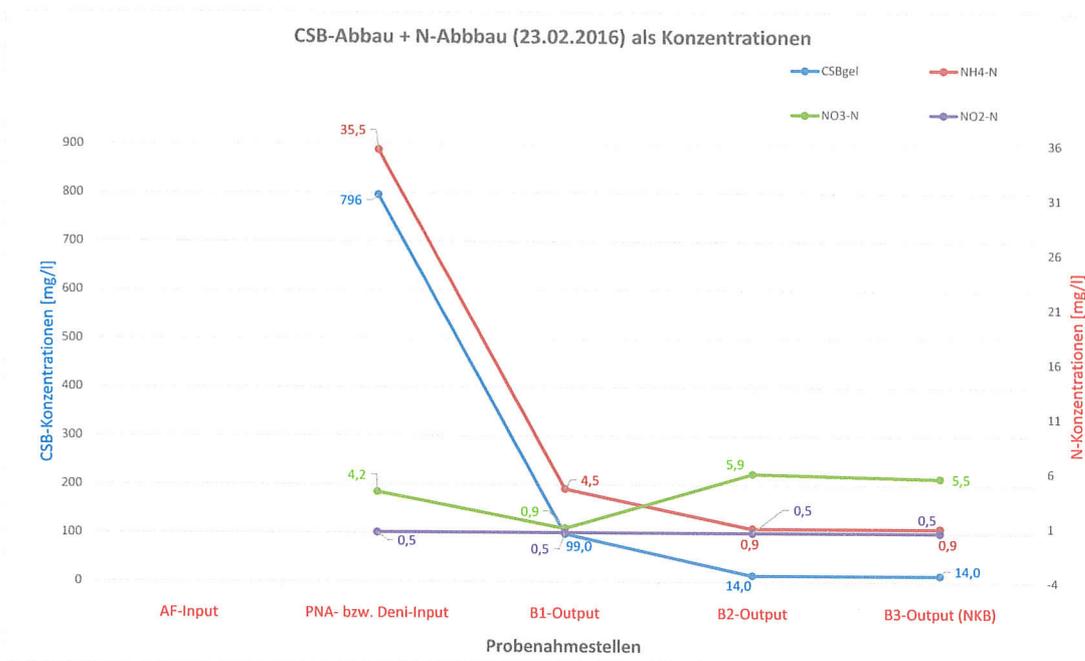
| Probenart | | NO ₃ -N | | | | | | | |
|--|------|--------------------|----------------------|-------------|-----------|-----------------|-----------|--------------|-------|
| | | AF-Input | PNA- bzw. Deni-Input | mit Rezirk. | B1-Output | B2-Input mit RS | B2-Output | Output (NKB) | Out |
| Einfahrphase | | | | | | | | | |
| A) nur PNA mit sehr starker Belüftung Qzu,PNA = 0,51/h, RV=5,16, RS=1,69 | | | | | | | | | |
| 23.02.2016 | mg/l | | 4,2 | | 0,9 | | 5,9 | 5,5 | 5,5 |
| | l/h | | 0,51 | | 3,14 | | 4,00 | 0,51 | |
| | mg/h | | 2,14 | 17,69 | 2,83 | 7,57 | 23,66 | 2,81 | |
| B) AF+PNA mit starker Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,12-1,17/h, RV=2,23-3,86, RS=1,10-1,54 | | | | | | | | | |
| 29.02.2016 | mg/l | 0,2 | 1,3 | | 13,6 | | 13,6 | 13,6 | 13,6 |
| | l/h | 1,08 | 1,12 | | 5,44 | | 6,68 | 1,12 | |
| | mg/h | 0,24 | 1,43 | 60,23 | 74,03 | 90,78 | 90,78 | 15,23 | |
| 04.03.2016 | mg/l | | 1,71 | | | | | | |
| 07.03.2016 | mg/l | 0,20 | 0,57 | | 27,00 | | 27,00 | 27,00 | 27,00 |
| | l/h | 1,13 | 1,15 | | 3,97 | | 5,74 | 1,15 | |
| | mg/h | 0,23 | 0,66 | 76,73 | 107,12 | 154,94 | 154,94 | 31,05 | |
| C) AF+PNA mit mittlerer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,17-1,33/h, RV=0,69-2,40, RS=1,17-1,38 | | | | | | | | | |
| 08.03.2016 | mg/l | | | | | | | | |
| 12.03.2016 | mg/l | | | | | | | | |
| 14.03.2016 | mg/l | 0,23 | 0,50 | | 16,95 | | 26,65 | 28,15 | 28,30 |
| | l/h | 1,13 | 1,22 | | 3,28 | | 4,76 | 1,22 | |
| | mg/h | 0,26 | 0,61 | 55,56 | 55,63 | 97,18 | 126,80 | 34,34 | |
| 15.03.2016 | mg/l | | 3,86 | | | | | | |
| 16.03.2016 | mg/l | 0,32 | 0,46 | | 4,90 | | 21,10 | 21,85 | 25,45 |
| | l/h | 1,13 | 1,32 | | 3,48 | | 5,04 | 1,32 | |
| | mg/h | 0,36 | 0,61 | 46,28 | 17,08 | 51,11 | 106,39 | 28,84 | |
| D) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,31-1,38/h, RV=1,74-3,48, RS=1,04-1,44 | | | | | | | | | |
| 23.03.2016 | mg/l | | | | 2,60 | | 7,23 | 7,55 | 11,65 |
| 30.03.2016 | mg/l | 0,23 | 0,26 | | 2,55 | | 6,75 | 6,90 | 7,85 |
| | l/h | 1,13 | 1,32 | | 4,14 | | 5,70 | 1,32 | |
| | mg/h | 0,26 | 0,34 | 19,41 | 10,57 | 21,32 | 38,49 | 9,11 | |
| 06.04.2016 | mg/l | | | | 2,60 | | 7,20 | 6,55 | 8,25 |
| 13.04.2016 | mg/l | 0,37 | 0,39 | | 4,80 | | 10,25 | 10,20 | 11,25 |
| | l/h | 1,13 | 1,35 | | 3,96 | | 5,76 | 1,35 | |
| | mg/h | 0,42 | 0,53 | 27,23 | 18,99 | 37,44 | 59,09 | 13,77 | |
| 20.04.2016 | mg/l | | | | 2,40 | | 5,30 | 4,95 | 6,90 |
| 27.04.2016 | mg/l | 0,23 | 0,23 | | 2,25 | | 5,75 | 6,45 | 8,00 |
| | l/h | 1,13 | 1,37 | | 3,95 | | 5,66 | 1,37 | |
| | mg/h | 0,26 | 0,32 | 15,12 | 8,88 | 19,92 | 32,53 | 8,84 | |
| 04.05.2016 | mg/l | | | | 5,80 | | 8,60 | 9,55 | 12,30 |
| E) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,40-1,74/h, RV=5,35-8,33, RS=0,36-1,03 | | | | | | | | | |
| 11.05.2016 | mg/l | 0,23 | 0,23 | | 2,50 | | 3,80 | 4,75 | 7,05 |
| | l/h | 1,46 | 1,72 | | 10,92 | | 12,35 | 1,72 | |
| | mg/h | 0,34 | 0,40 | 35,36 | 27,31 | 34,09 | 46,93 | 8,17 | |
| 18.05.2016 | mg/l | | | | 3,05 | | 4,65 | 5,70 | 8,20 |
| 25.05.2016 | mg/l | 0,23 | 0,23 | | 0,23 | | 1,21 | 2,22 | 3,82 |
| | l/h | 1,46 | 1,56 | | 13,17 | | 14,77 | 1,56 | |
| | mg/h | 0,34 | 0,36 | 14,40 | 3,03 | 6,60 | 17,88 | 3,46 | |
| 01.06.2016 | mg/l | | | | 3,75 | | 4,90 | 6,65 | 9,20 |
| 08.06.2016 | mg/l | 0,32 | 0,23 | | 3,70 | | 3,70 | 5,05 | 7,50 |
| | l/h | 1,46 | 1,70 | | 14,28 | | 14,89 | 1,70 | |
| | mg/h | 0,47 | 0,39 | 46,94 | 52,84 | 55,93 | 55,10 | 8,59 | |
| F) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,50-1,86/h, RV=6,01-10,02, RS=0,34-0,40 | | | | | | | | | |
| 15.06.2016 | mg/l | | | | 3,95 | | 4,40 | 4,50 | 6,95 |
| 22.06.2016 | mg/l | 6,04 | 0,23 | | 4,25 | | 1,90 | 4,85 | 8,20 |
| | l/h | 1,88 | 1,74 | | 15,54 | | 16,23 | 1,74 | |
| | mg/h | 11,33 | 0,40 | 26,62 | 66,04 | 69,41 | 30,84 | 8,44 | |
| 29.06.2016 | | | | | | | | | |
| 06.07.2016 | mg/l | 0,23 | 0,23 | | 8,15 | | 9,15 | 10,50 | |
| | l/h | 1,88 | 1,52 | | 16,75 | | 17,27 | 1,52 | |
| | mg/h | 0,43 | 0,35 | 139,71 | 136,52 | 141,94 | 157,99 | 15,96 | |
| 13.07.2016 | | | | | | | | | |
| 20.07.2016 | mg/l | 0,39 | 0,24 | | 7,45 | | 9,45 | 9,85 | |
| | l/h | 1,88 | 1,50 | | 10,52 | | 11,07 | 1,50 | |
| | mg/h | 0,73 | 0,36 | 85,55 | 78,34 | 83,80 | 104,61 | 14,78 | |
| G) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,01-1,68/h, RV=2,36-4,82, RS=0,17-0,35 | | | | | | | | | |
| 27.07.2016 | | | | | | | | | |
| 03.08.2016 | | | | | | | | | |
| 10.08.2016 | | | | | | | | | |
| 17.08.2016 | mg/l | 0,27 | 0,26 | | 6,10 | | 9,40 | 11,65 | |
| | l/h | 1,88 | 1,01 | | 5,88 | | 6,18 | 1,01 | |
| | mg/h | 0,51 | 0,26 | 46,02 | 35,86 | 39,39 | 58,10 | 11,77 | |
| 24.08.2016 | | | | | | | | | |
| 31.08.2016 | | | | | | | | | |

Anlage AVI

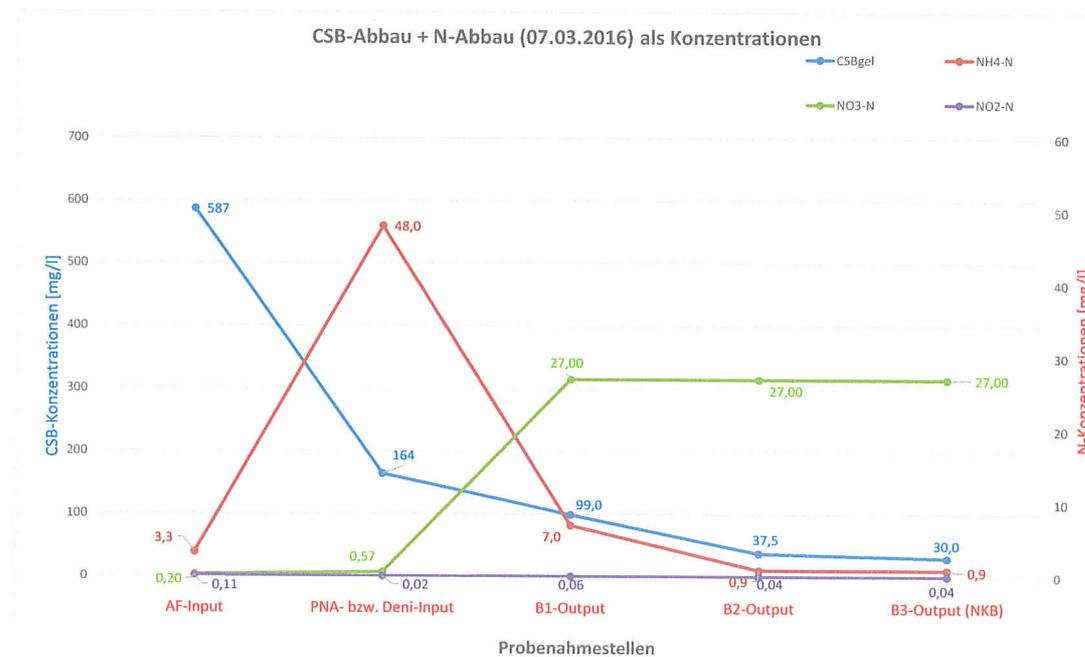
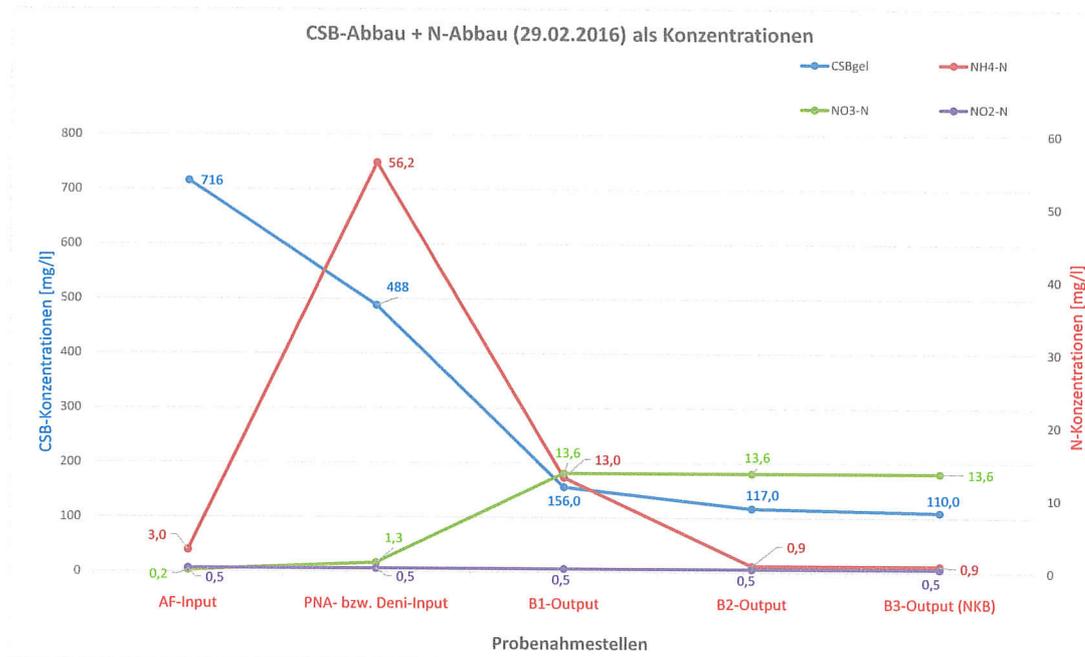
CSB- / N- Analytik-Ergebnisse

| Probenart | NO ₂ -N | | | | | | | | | N _{ges.} [mg/l] | |
|---|--------------------|----------------------|-------------|-----------|-----------------|-----------|--------------|-------|-------|--------------------------|--|
| | AF-Input | PNA- bzw. Deni-Input | mit Rezirk. | B1-Output | B2-Input mit RS | B2-Output | Output (NKB) | Out | B3 | Ablaufgrenzwert Gkl. 4 | |
| Einfahrphase | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 18 | |
| A) nur PNA mit sehr starker Belüftung Q_{zu,PNA} = 0,51l/h, RV=5,16, RS=1,69 | | | | | | | | | | | |
| 23.02.2016 | mg/l | 0,5 | | 0,5 | | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 6,9 | eingehalten | |
| | l/h | 0,51 | | 3,14 | | 4,00 | 0,51 | | | | |
| | mg/h | 0,26 | 1,57 | 1,57 | 2,00 | 2,00 | 0,26 | | | | |
| B) AF+PNA mit starker Belüftung Q_{zu,AFund} Q_{zu,PNA} = 1,12-1,17l/h, RV=2,23-3,86, RS=1,10-1,54 | | | | | | | | | | | |
| 29.02.2016 | mg/l | 0,5 | 0,5 | | 0,5 | | 0,5 | 0,5 | 15,0 | eingehalten | |
| | l/h | 1,08 | 1,12 | | 5,44 | | 6,68 | 1,12 | | | |
| | mg/h | 0,54 | 0,56 | 2,72 | 2,72 | 3,34 | 3,34 | 0,56 | | | |
| 04.03.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| | l/h | 0,11 | 0,02 | | 0,06 | | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 27,9 überschritten | |
| | mg/h | 1,13 | 1,15 | | 3,97 | | 5,74 | 1,15 | | | |
| | mg/h | 0,12 | 0,02 | 0,13 | 0,23 | 0,29 | 0,22 | 0,04 | | | |
| C) AF+PNA mit mittlerer Belüftung Q_{zu,AFund} Q_{zu,PNA} = 1,17-1,33l/h, RV=0,69-2,40, RS=1,17-1,38 | | | | | | | | | | | |
| 08.03.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 12.03.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| 14.03.2016 | mg/l | 0,12 | 0,02 | | 0,60 | | 1,80 | 1,80 | 0,60 | 31,0 überschritten | |
| | l/h | 1,13 | 1,22 | | 3,28 | | 4,76 | 1,22 | | | |
| | mg/h | 0,14 | 0,02 | 3,73 | 1,97 | 4,63 | 8,56 | 2,20 | | | |
| 15.03.2016 | mg/l | | | | | | | | | | |
| | l/h | 0,60 | 0,02 | | 0,02 | | 0,29 | 0,18 | 0,06 | 23,0 überschritten | |
| | mg/h | 1,13 | 1,32 | | 3,48 | | 5,04 | 1,32 | | | |
| | mg/h | 0,68 | 0,02 | 0,65 | 0,07 | 0,35 | 1,47 | 0,23 | | | |
| D) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu,AFund} Q_{zu,PNA} = 1,31-1,38l/h, RV=1,74-3,48, RS=1,04-1,44 | | | | | | | | | | | |
| 23.03.2016 | mg/l | | | | 0,60 | | 1,87 | 1,98 | | | |
| 30.03.2016 | mg/l | 0,02 | 0,02 | | 0,60 | | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 24,9 überschritten | |
| | l/h | 1,13 | 1,32 | | 4,14 | | 5,70 | 1,32 | | | |
| | mg/h | 0,02 | 0,02 | 16,97 | 2,49 | 11,83 | 34,21 | 7,92 | | | |
| 06.04.2016 | mg/l | | | | 0,02 | | 6,90 | 8,17 | 11,89 | | |
| 13.04.2016 | mg/l | 0,60 | 0,02 | | 9,95 | | 20,16 | 19,33 | 18,14 | 30,5 überschritten | |
| | l/h | 1,13 | 1,35 | | 3,96 | | 5,76 | 1,35 | | | |
| | mg/h | 0,68 | 0,02 | 52,53 | 39,34 | 74,31 | 116,18 | 26,10 | | | |
| 20.04.2016 | mg/l | | | | 0,11 | | 5,76 | 5,49 | 7,05 | | |
| 27.04.2016 | mg/l | 0,02 | 0,02 | | 0,66 | | 7,80 | 7,10 | 6,68 | 24,2 überschritten | |
| | l/h | 1,13 | 1,37 | | 3,95 | | 5,66 | 1,37 | | | |
| | mg/h | 0,02 | 0,02 | 20,10 | 2,60 | 14,75 | 44,10 | 9,72 | | | |
| 04.05.2016 | mg/l | | | | 2,49 | | 6,82 | 4,91 | 1,76 | | |
| E) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu,AFund} Q_{zu,PNA} = 1,40-1,74l/h, RV=5,35-8,33, RS=0,36-1,03 | | | | | | | | | | | |
| 11.05.2016 | mg/l | 0,02 | 0,02 | | 0,62 | | 4,52 | 4,63 | 3,51 | 15,9 eingehalten | |
| | l/h | 1,46 | 1,72 | | 10,92 | | 12,35 | 1,72 | | | |
| | mg/h | 0,02 | 0,03 | 41,57 | 6,77 | 13,37 | 55,76 | 7,96 | | | |
| 18.05.2016 | mg/l | | | | 0,41 | | 4,69 | 4,72 | 2,52 | | |
| 25.05.2016 | mg/l | 0,02 | 0,02 | | 0,60 | | 3,13 | 3,21 | 1,83 | 7,2 eingehalten | |
| | l/h | 1,46 | 1,56 | | 13,17 | | 14,77 | 1,56 | | | |
| | mg/h | 0,02 | 0,02 | 36,29 | 7,90 | 13,06 | 46,17 | 5,01 | | | |
| 01.06.2016 | mg/l | | | | 0,02 | | 5,83 | 6,50 | 5,87 | | |
| 08.06.2016 | mg/l | 0,74 | 0,02 | | 0,02 | | 0,36 | 0,60 | 13,30 | 10,3 eingehalten | |
| | l/h | 1,46 | 1,70 | | 14,28 | | 14,89 | 1,70 | | | |
| | mg/h | 1,08 | 0,03 | 4,49 | 0,21 | 0,58 | 5,29 | 1,03 | | | |
| F) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu,AFund} Q_{zu,PNA} = 1,50-1,86l/h, RV=6,01-10,02, RS=0,34-0,40 | | | | | | | | | | | |
| 15.06.2016 | mg/l | | | | 0,09 | | 0,21 | 1,05 | 1,61 | | |
| 22.06.2016 | mg/l | 0,02 | 0,02 | | 0,15 | | 1,44 | 1,45 | 2,21 | 35,3 überschritten | |
| | l/h | 1,88 | 1,74 | | 15,54 | | 16,23 | 1,74 | | | |
| | mg/h | 0,03 | 0,03 | 19,95 | 2,36 | 3,37 | 23,44 | 2,53 | | | |
| 29.06.2016 | | | | | | | | | | | |
| 06.07.2016 | mg/l | 0,02 | 0,02 | | 6,33 | | 9,73 | 9,11 | | 30,4 überschritten | |
| | l/h | 1,88 | 1,52 | | 16,75 | | 17,27 | 1,52 | | | |
| | mg/h | 0,03 | 0,02 | 148,25 | 106,10 | 110,80 | 168,04 | 13,84 | | | |
| 13.07.2016 | | | | | | | | | | | |
| 20.07.2016 | mg/l | 0,02 | 0,02 | | 4,18 | | 9,15 | 8,47 | | 21,8 überschritten | |
| | l/h | 1,88 | 1,50 | | 10,52 | | 11,07 | 1,50 | | | |
| | mg/h | 0,03 | 0,02 | 82,55 | 43,93 | 48,63 | 101,33 | 12,70 | | | |
| G) AF+PNA mit geringer Belüftung Q_{zu,AFund} Q_{zu,PNA} = 1,01-1,68l/h, RV=2,36-4,82, RS=0,17-0,35 | | | | | | | | | | | |
| 27.07.2016 | | | | | | | | | | | |
| 03.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 10.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 17.08.2016 | mg/l | 0,02 | 0,02 | | 0,02 | | 9,96 | 6,39 | | 20,5 überschritten | |
| | l/h | 1,88 | 1,01 | | 5,88 | | 6,18 | 1,01 | | | |
| | mg/h | 0,03 | 0,02 | 48,50 | 0,09 | 2,02 | 61,55 | 6,45 | | | |
| 24.08.2016 | | | | | | | | | | | |
| 31.08.2016 | | | | | | | | | | | |

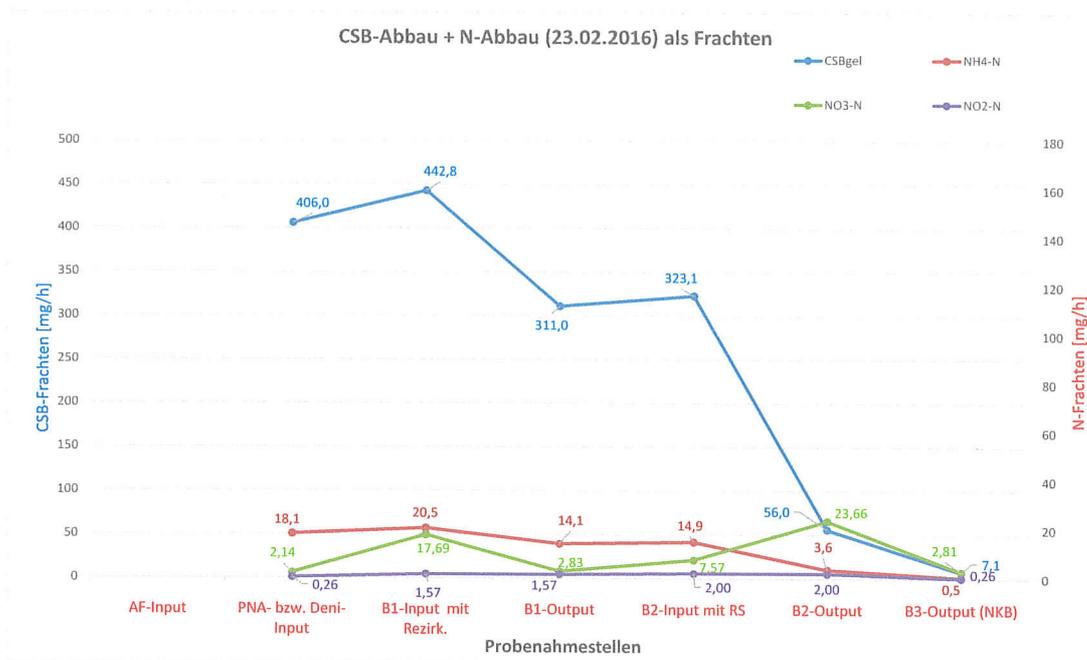
A) nur PNA mit sehr starker Belüftung Qzu,PNA = 0,51l/h, RV=5,16, RS=1,69



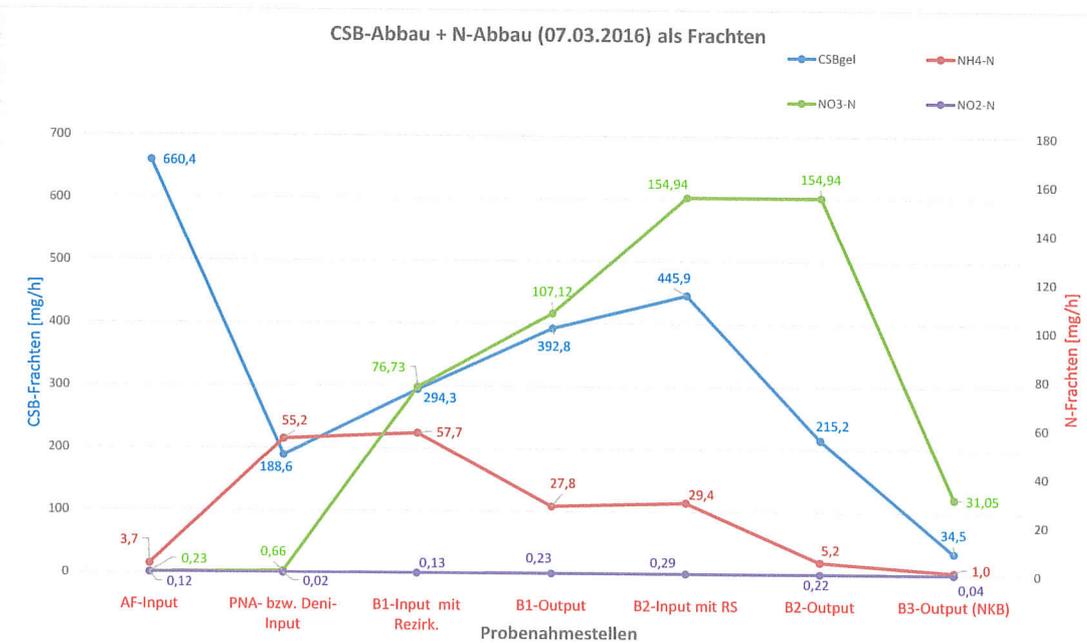
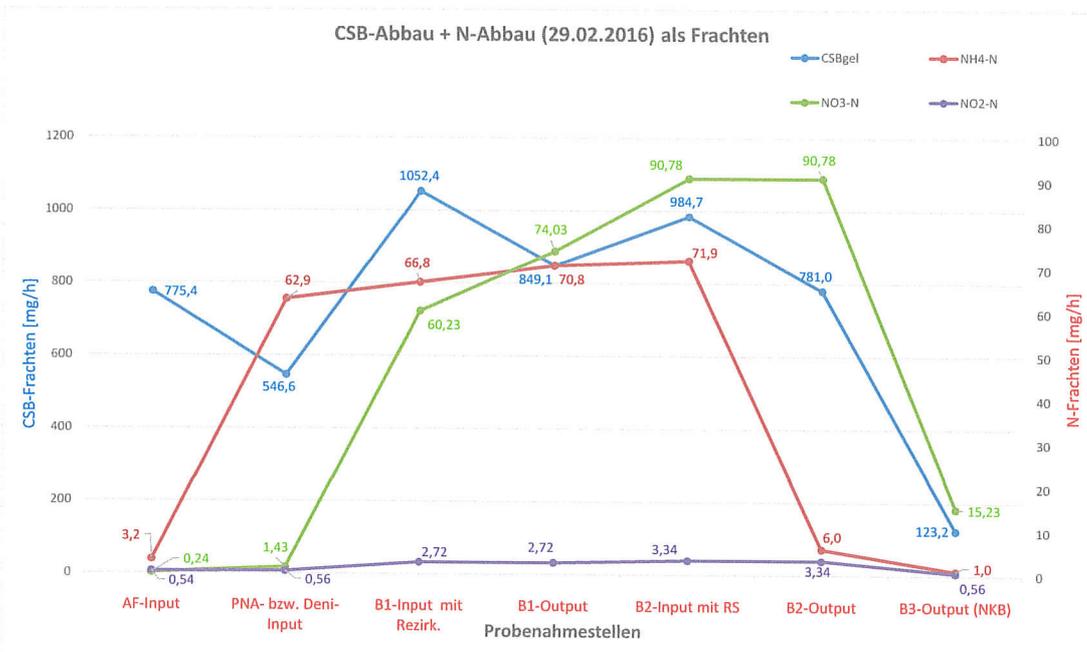
B) AF+PNA mit starker Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,12-1,17l/h, RV=2,23-3,86, RS=1,10-1,54



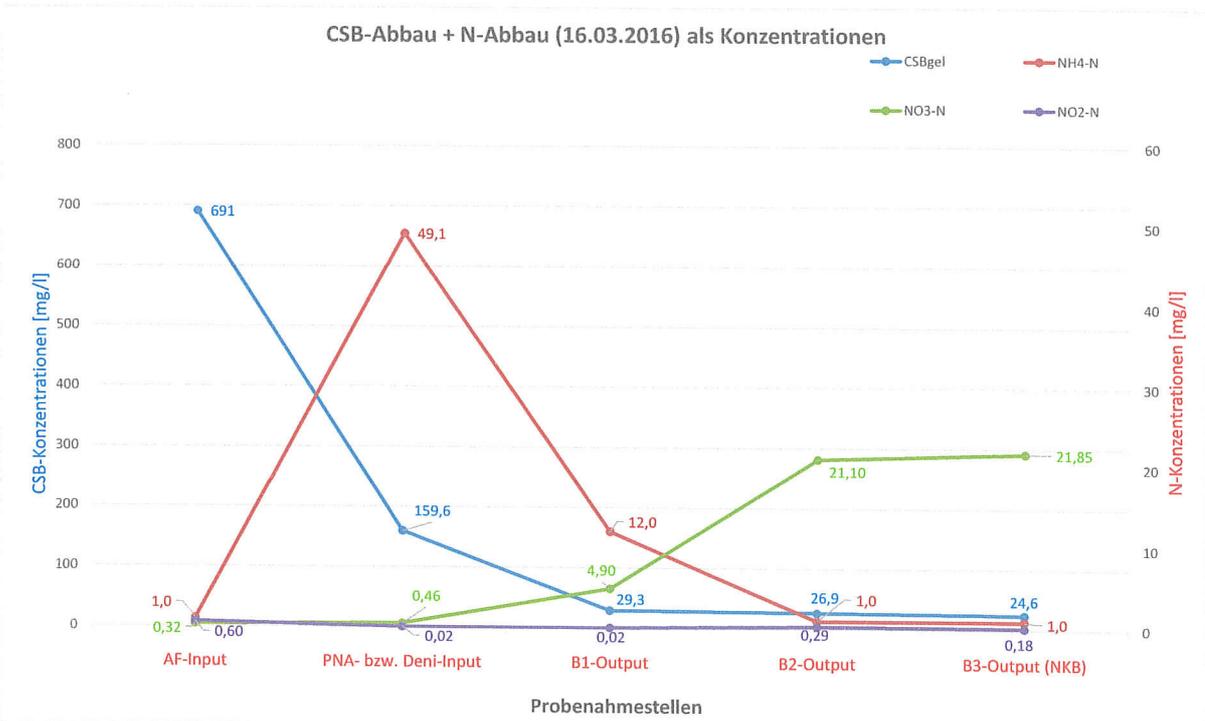
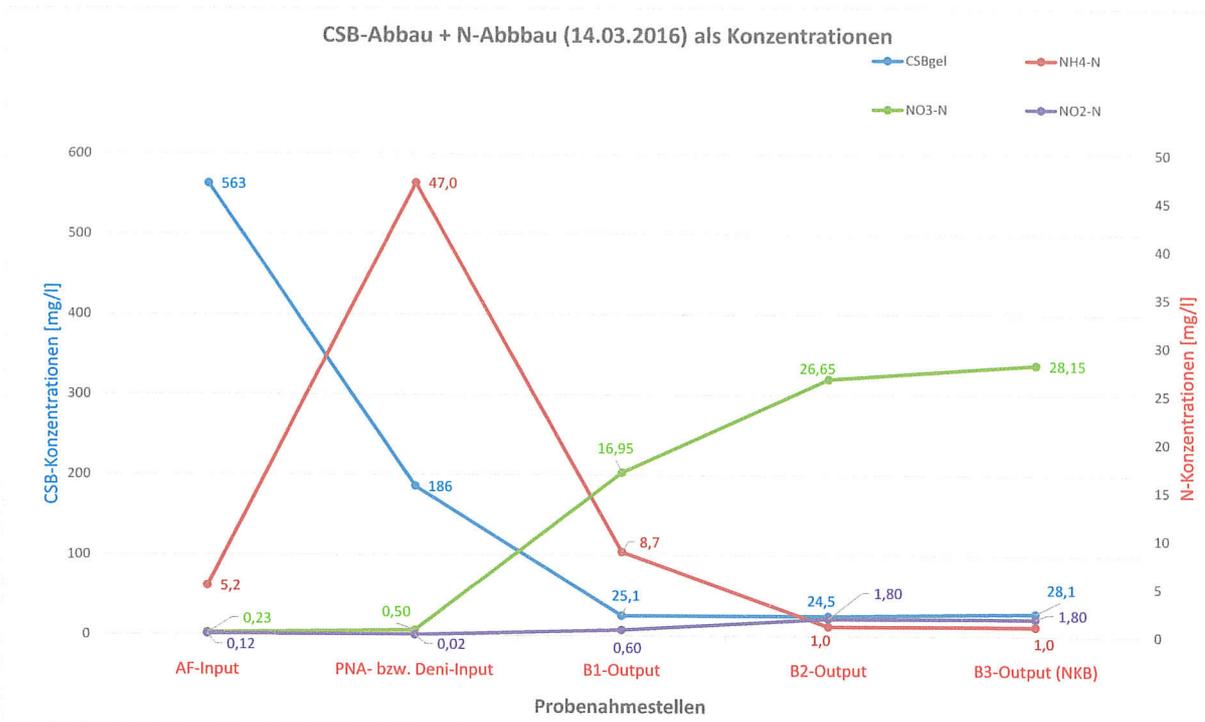
A) nur PNA mit sehr starker Belüftung Qzu,PNA = 0,51l/h, RV=5,16, RS=1,69



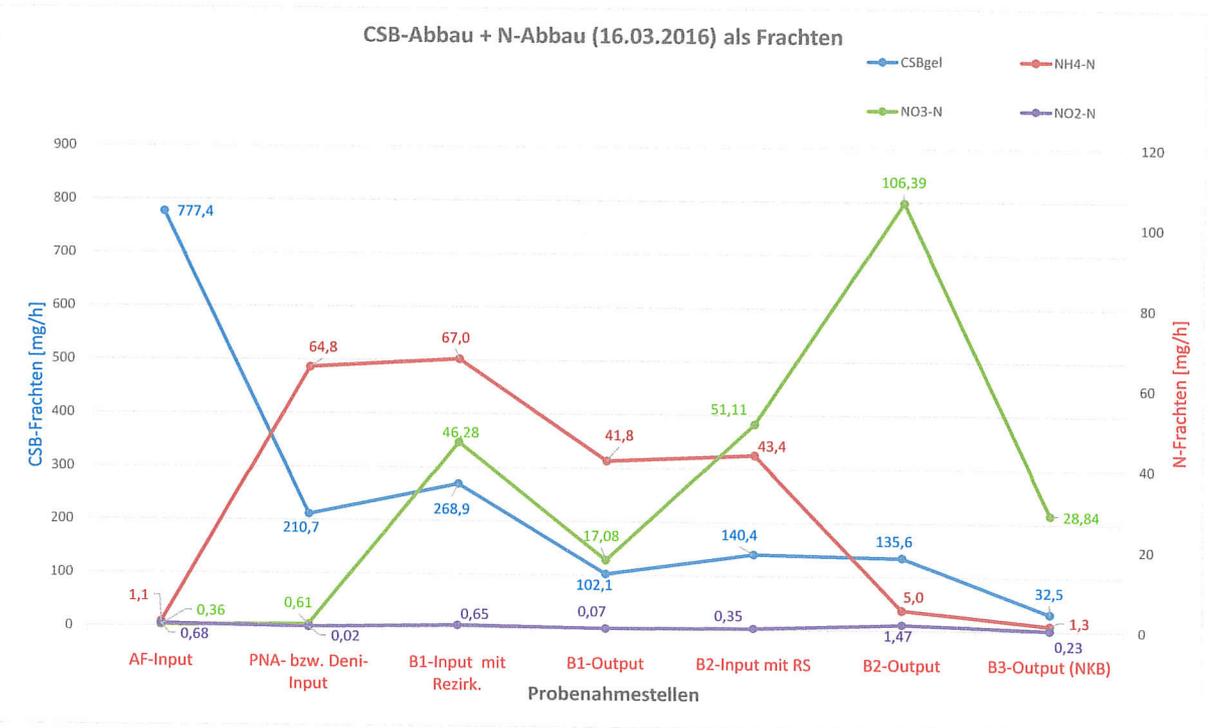
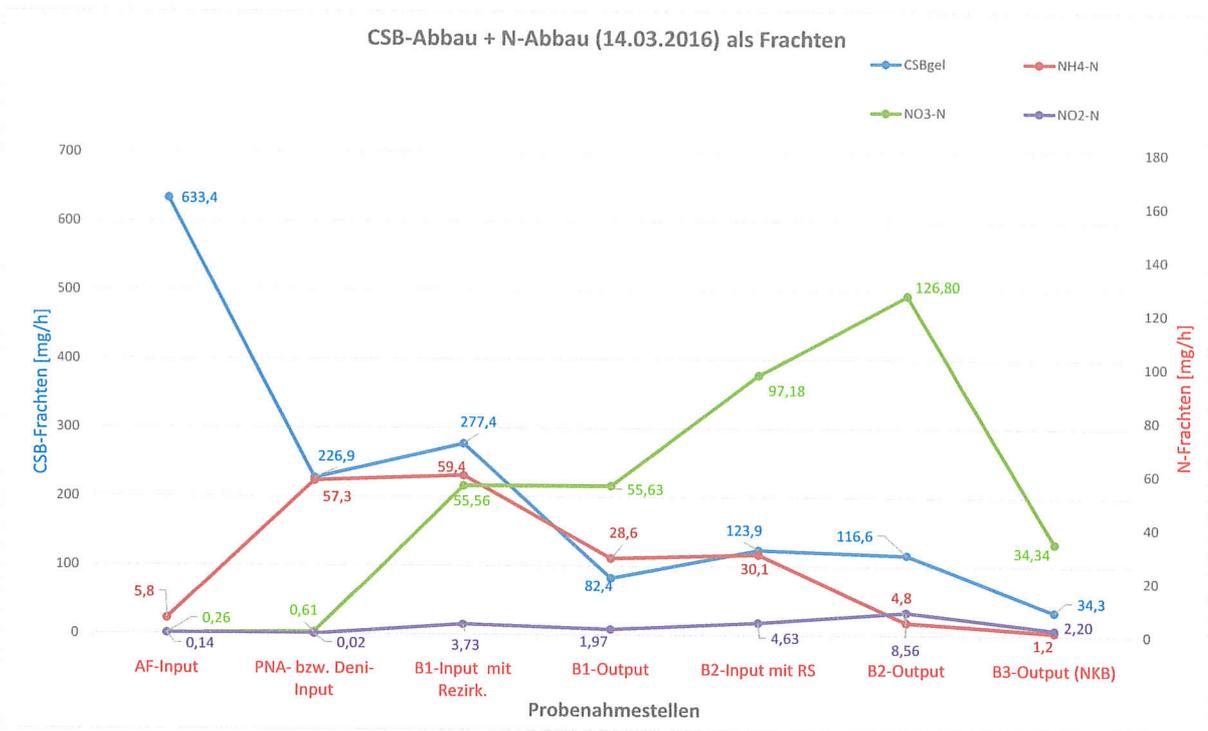
B) AF+PNA mit starker Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,12-1,17l/h, RV=2,23-3,86, RS=1,10-1,54



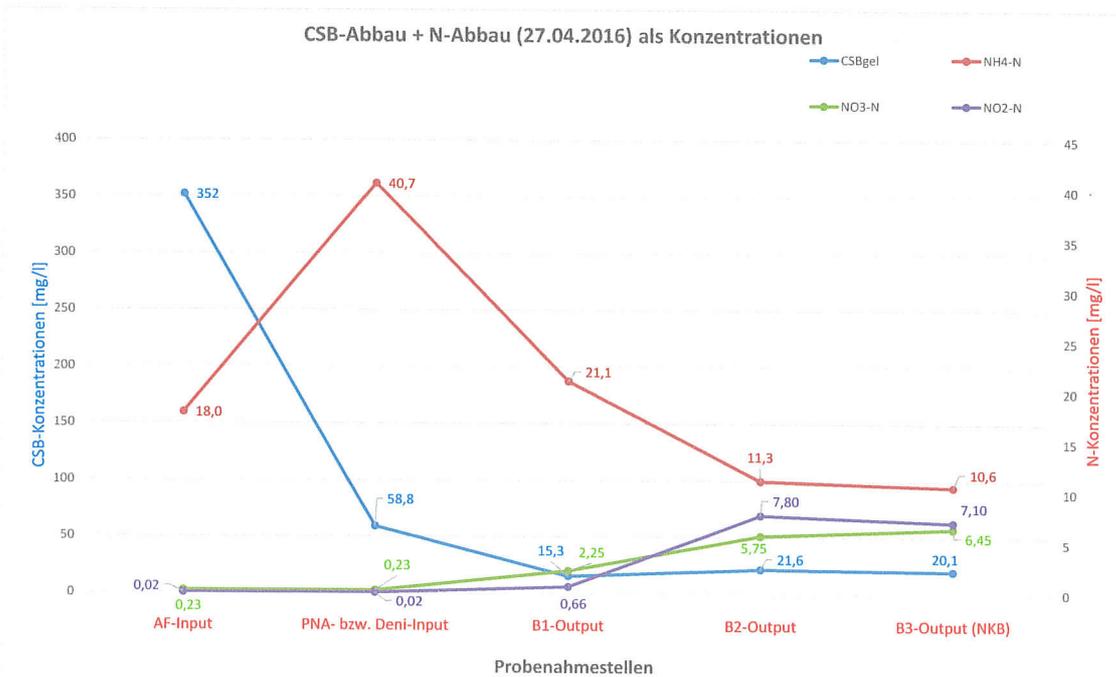
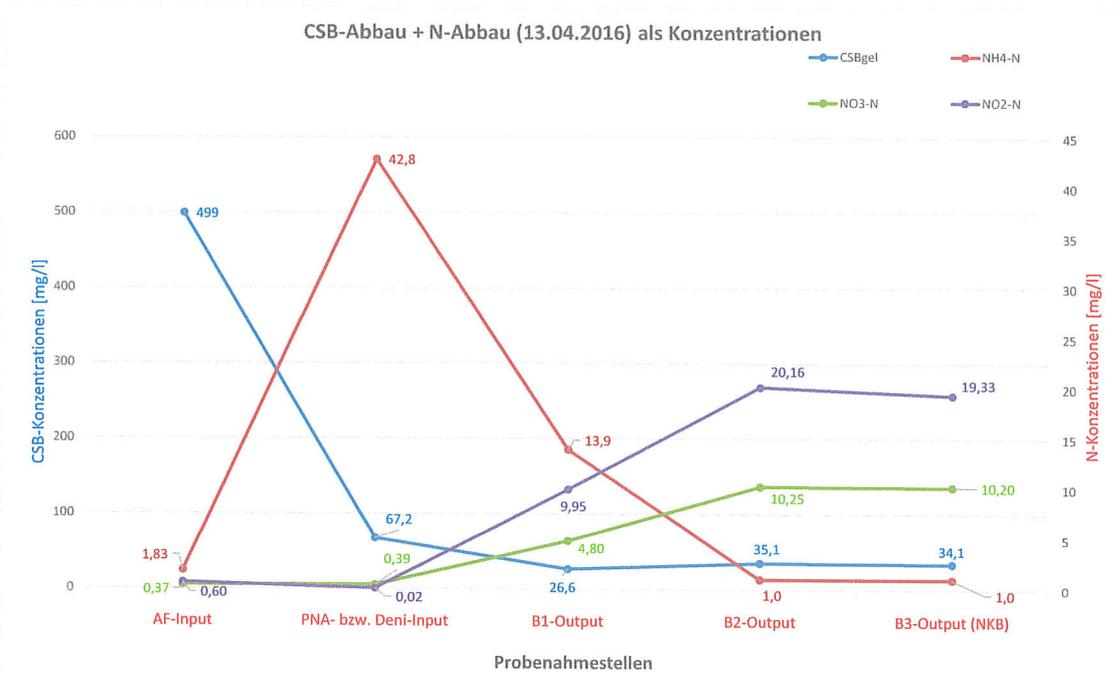
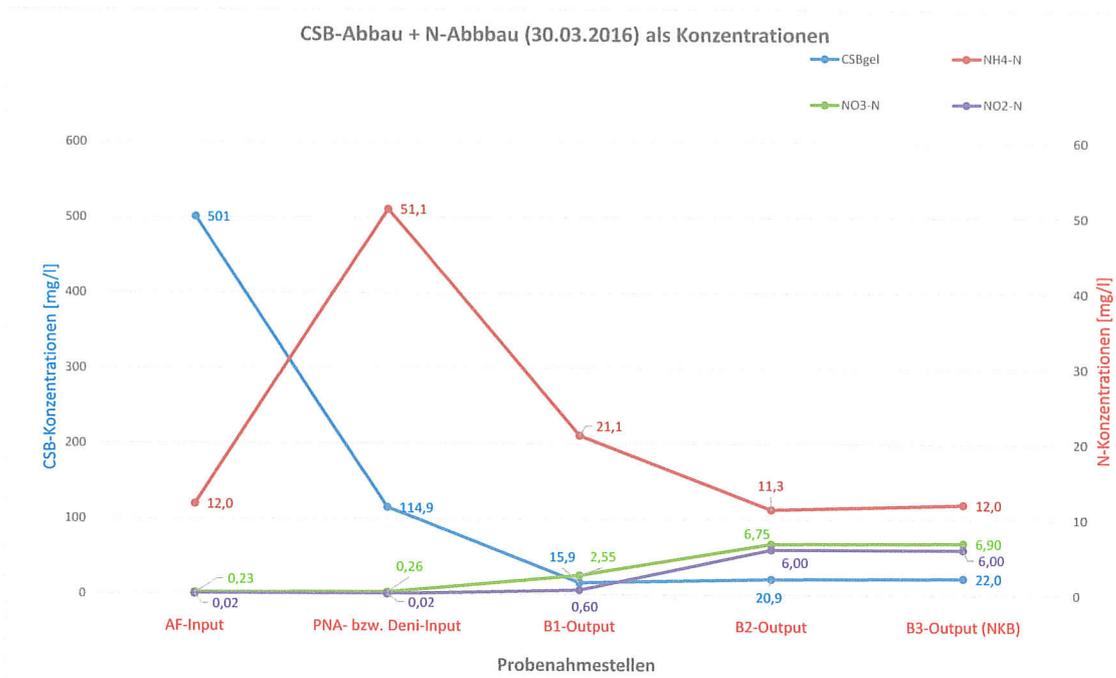
C) AF+PNA mit mittlerer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,17-1,33l/h, RV=0,69-2,40 , RS=1,17-1,38



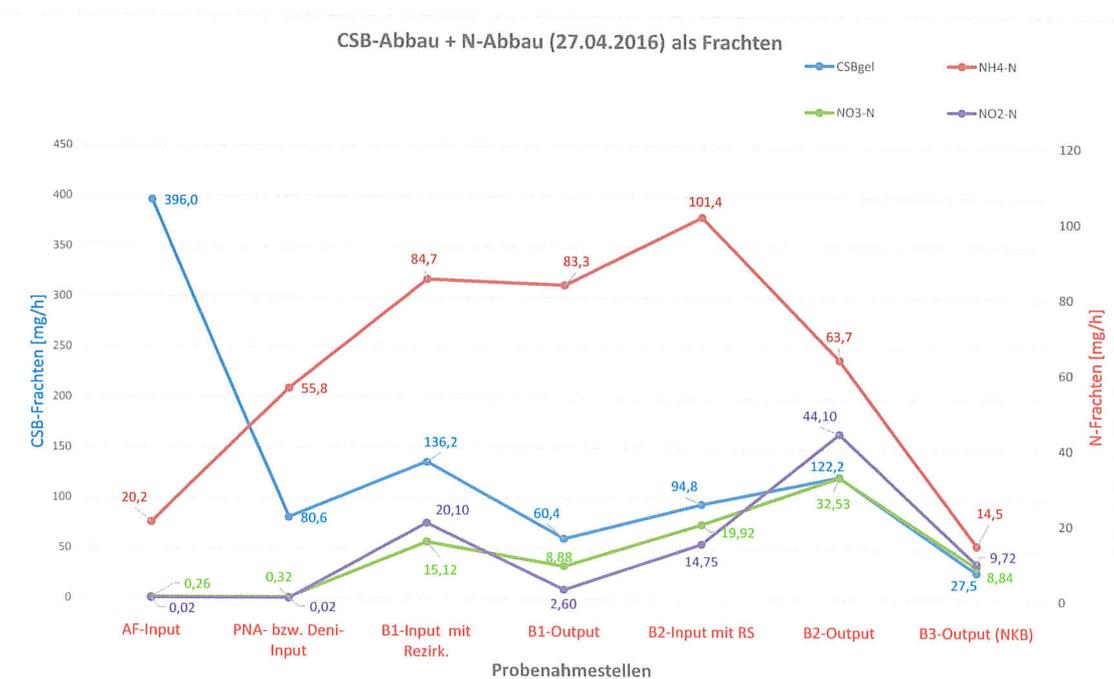
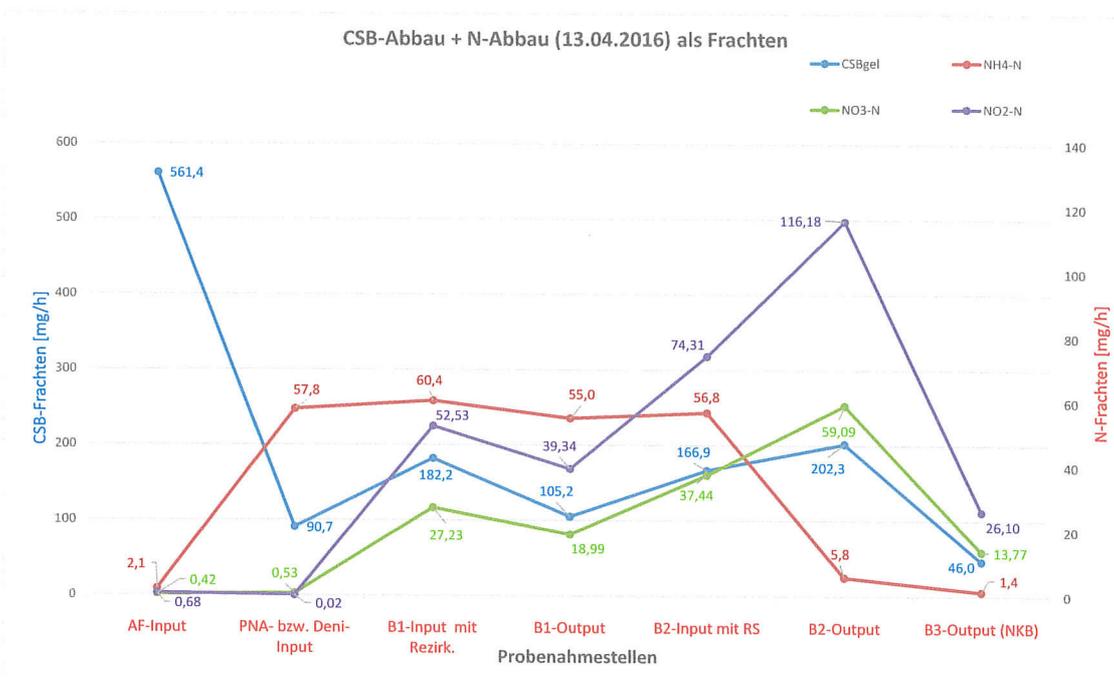
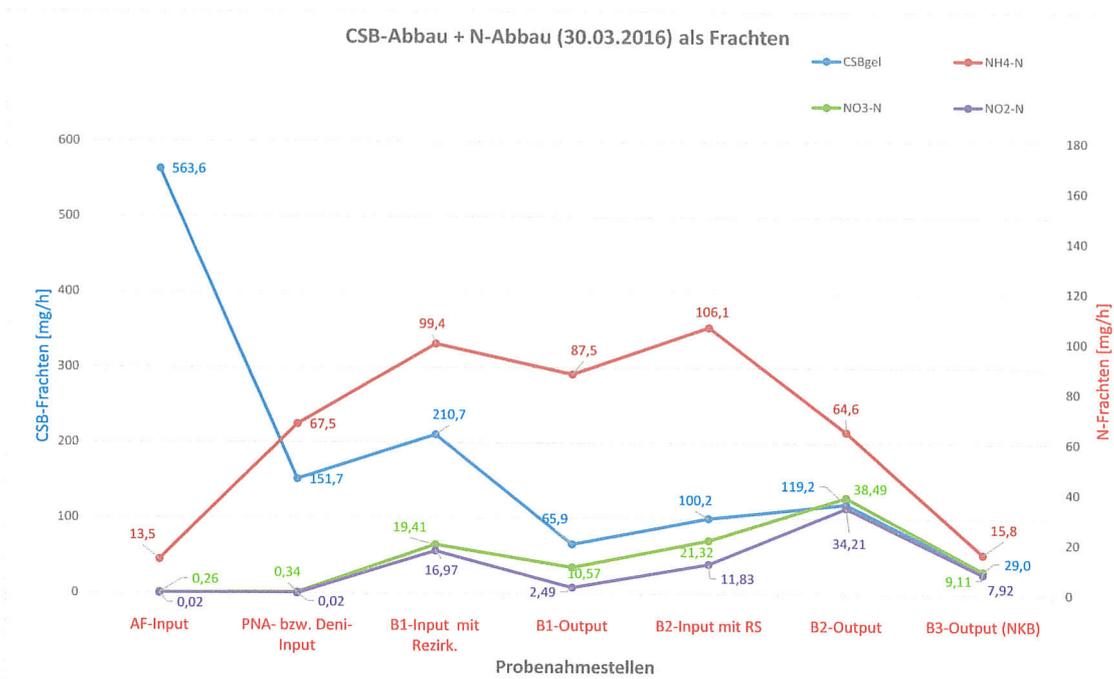
C) AF+PNA mit mittlerer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,17-1,33l/h, RV=0,69-2,40 , RS=1,17-1,38



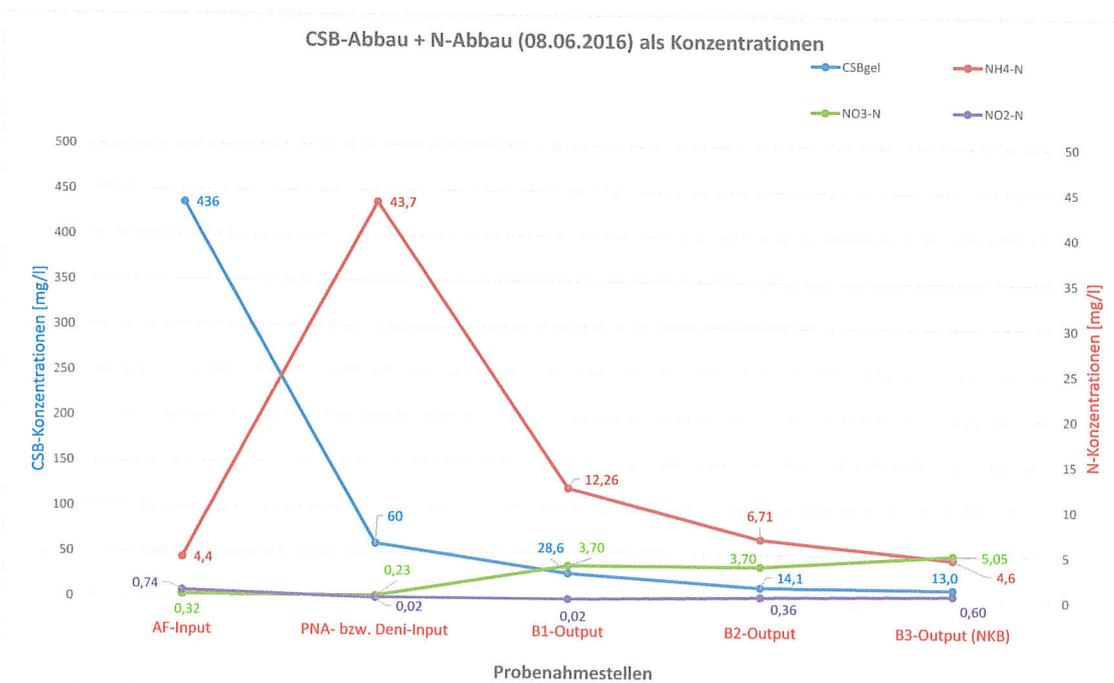
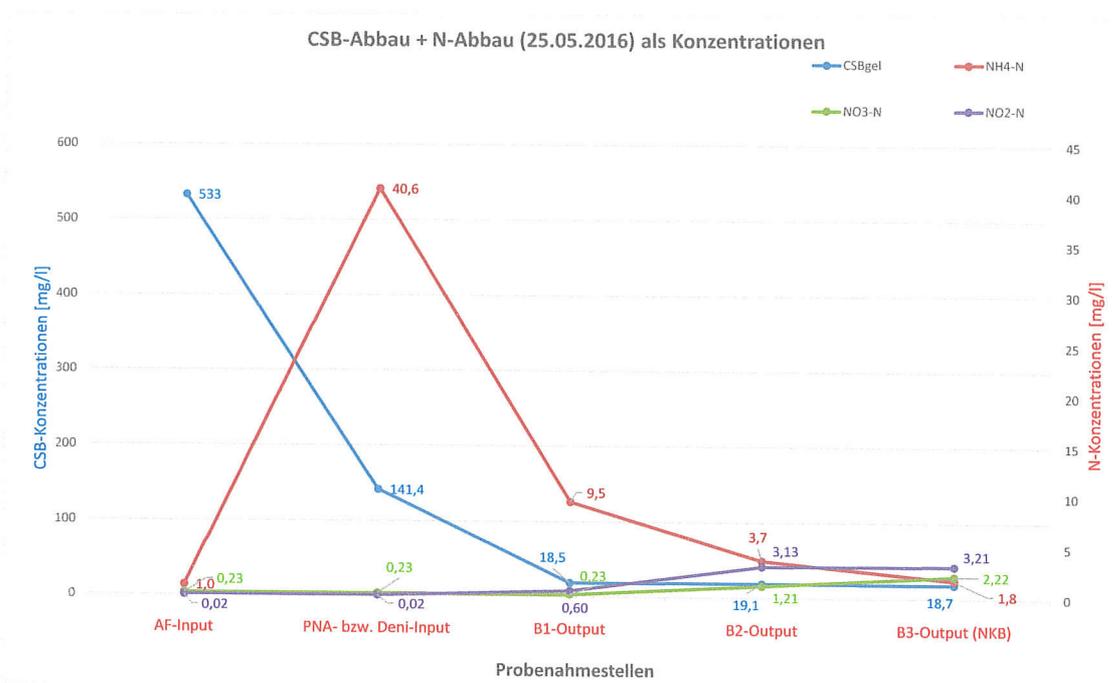
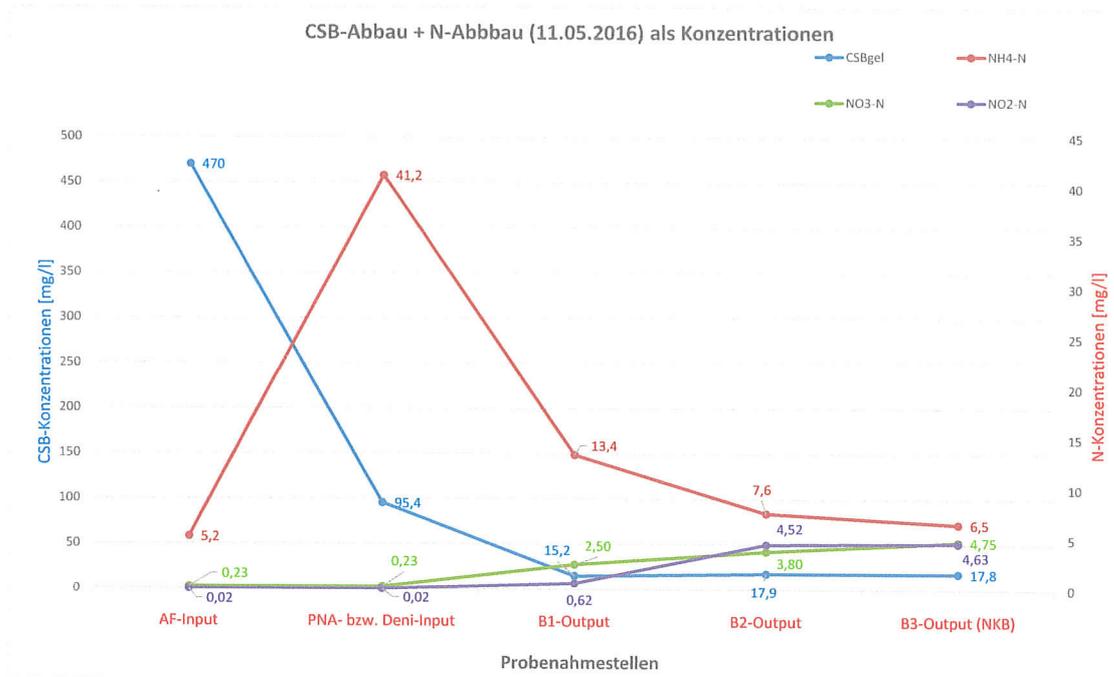
D) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu, AFund Qzu, PNA = 1,31-1,38l/h, RV=1,74-3,48 , RS=1,04-1,44



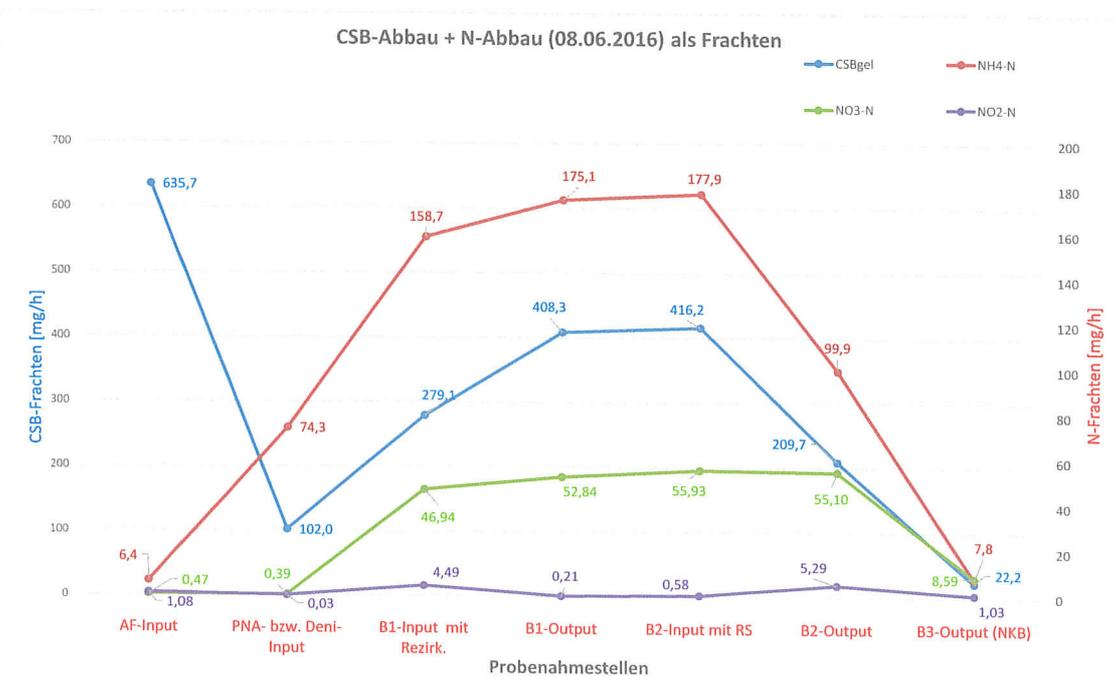
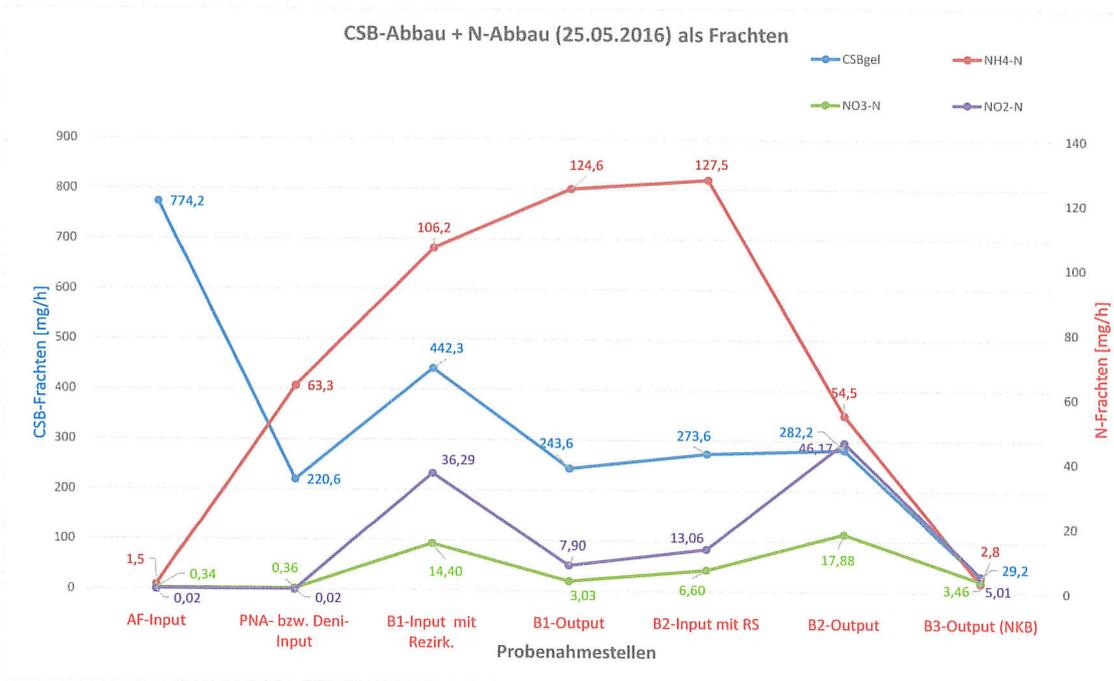
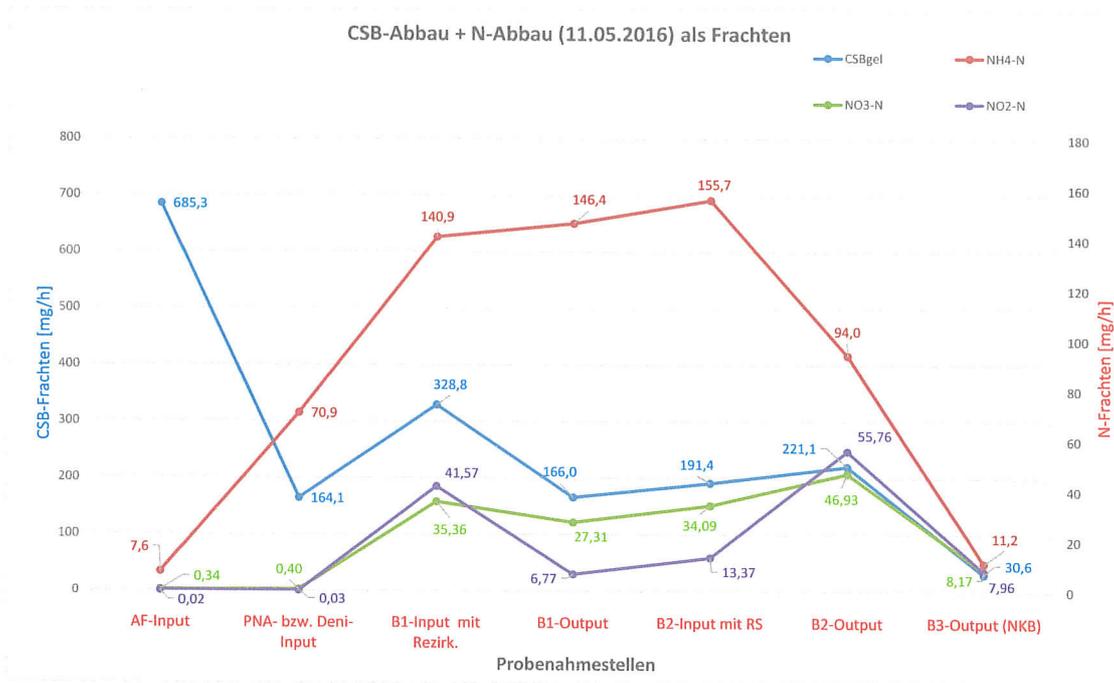
D) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,31-1,38l/h, RV=1,74-3,48 , RS=1,04-1,44



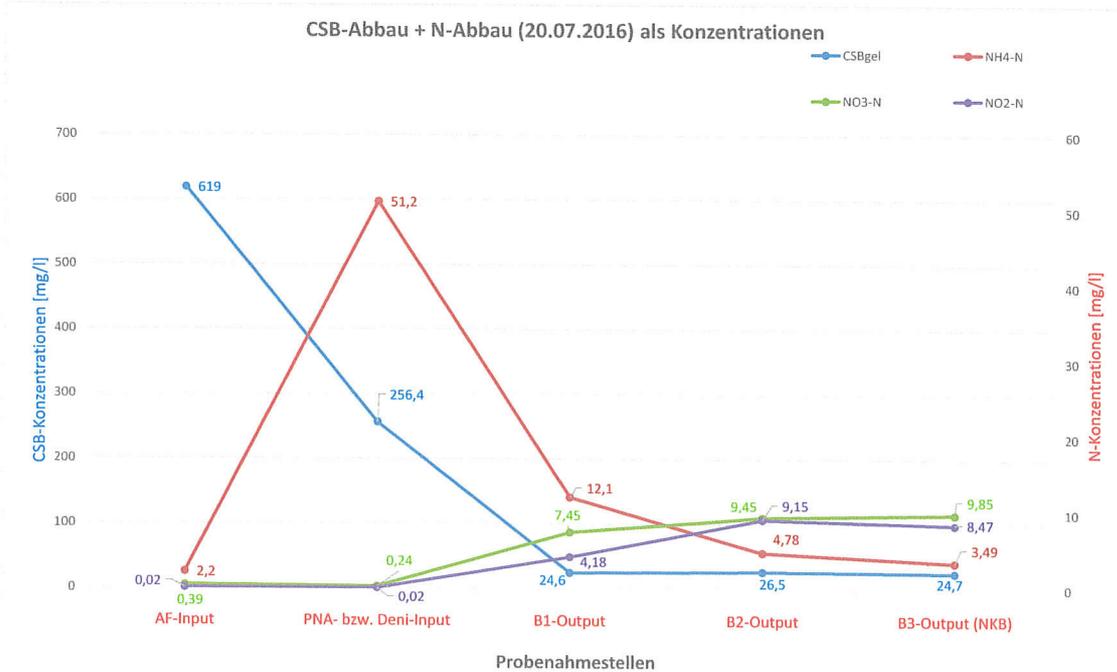
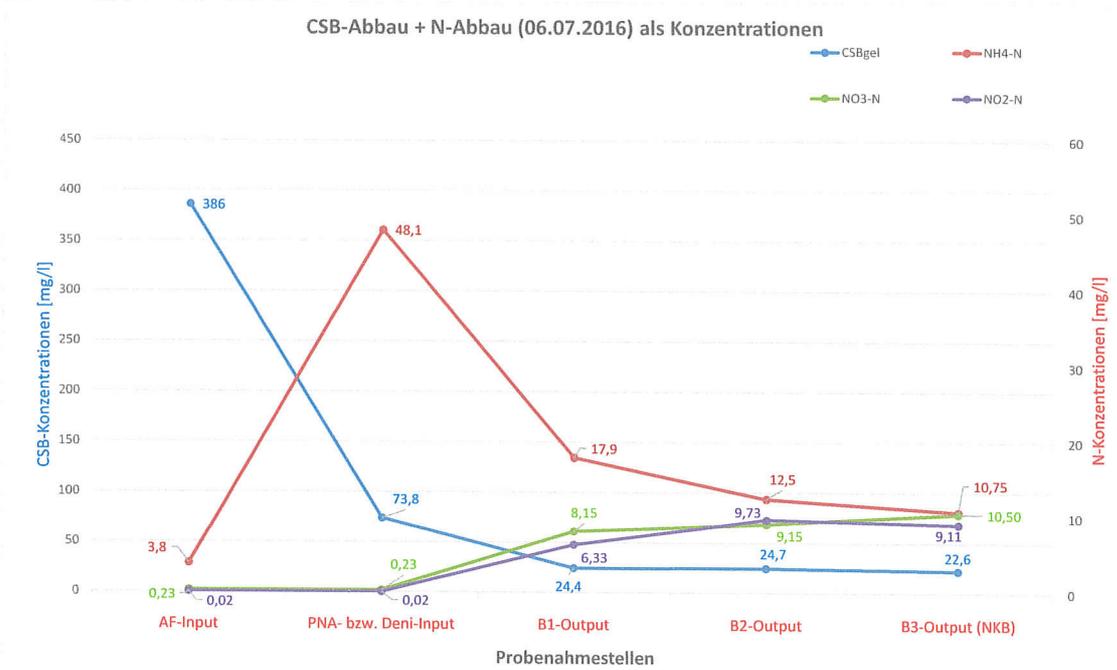
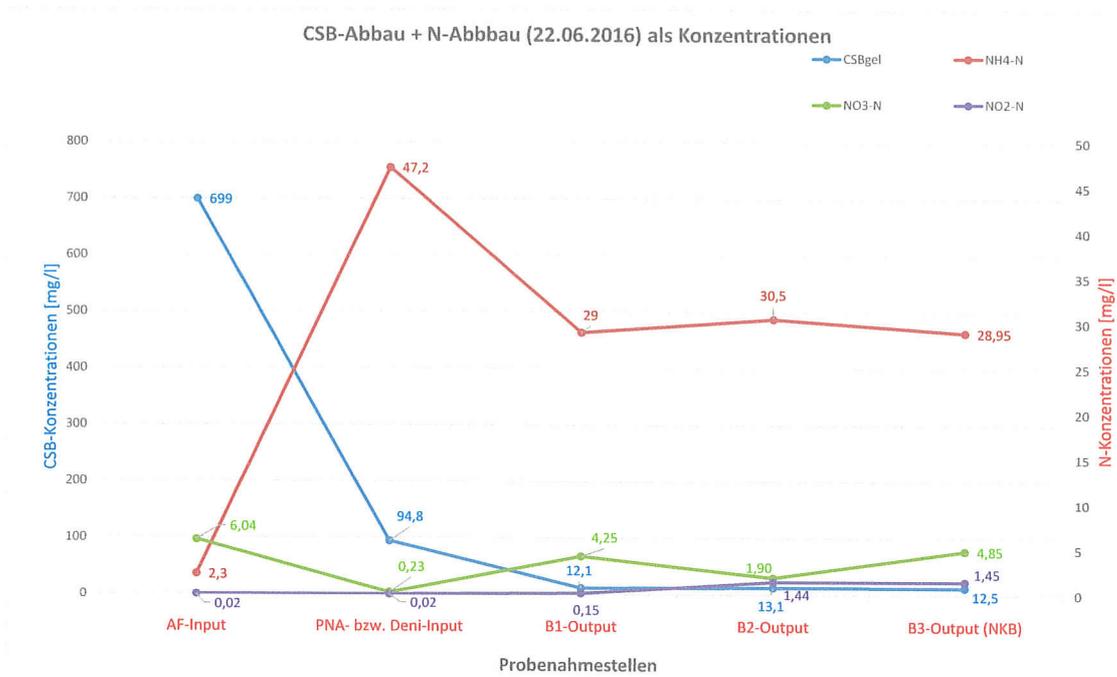
E) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,40-1,74l/h, RV=5,35-8,33 , RS=0,36-1,03



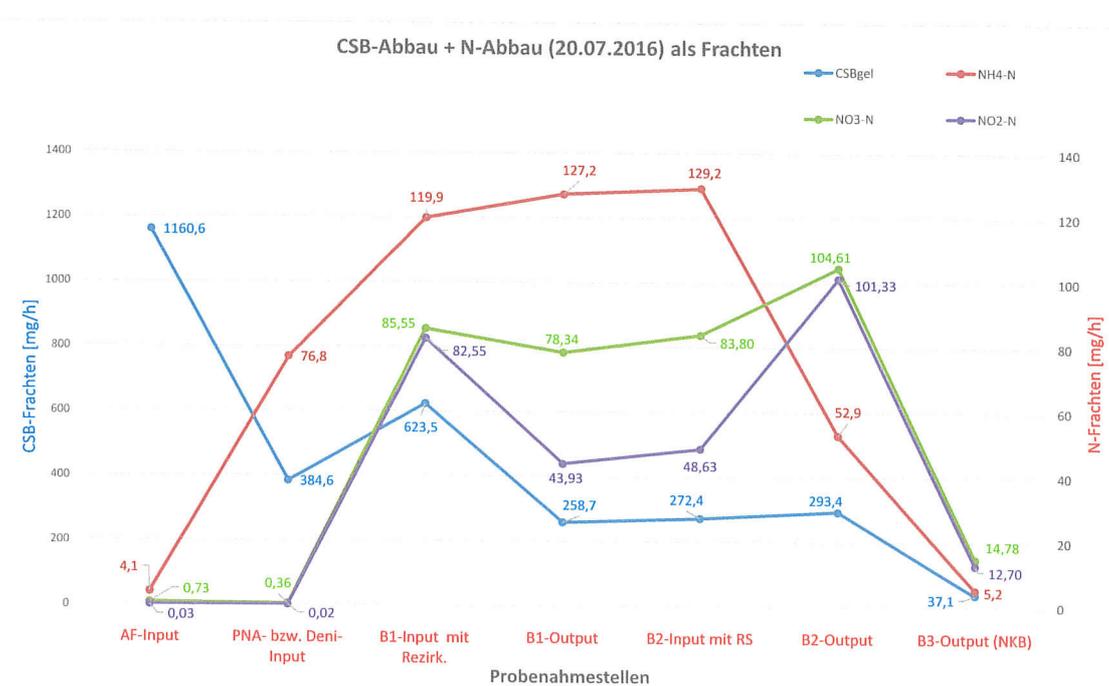
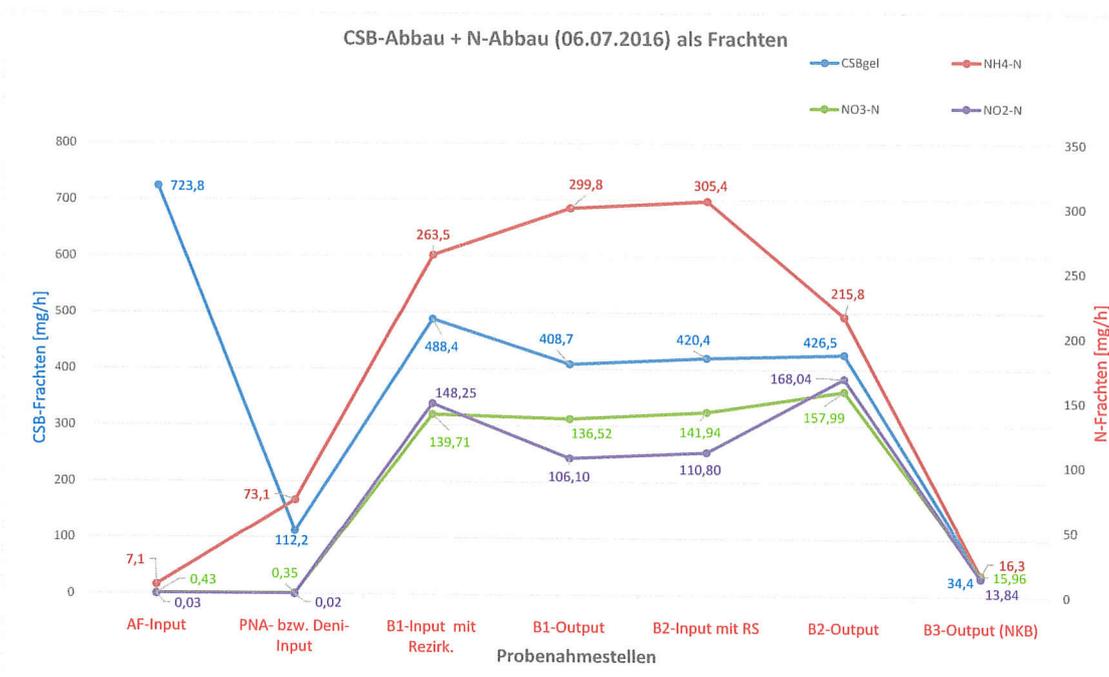
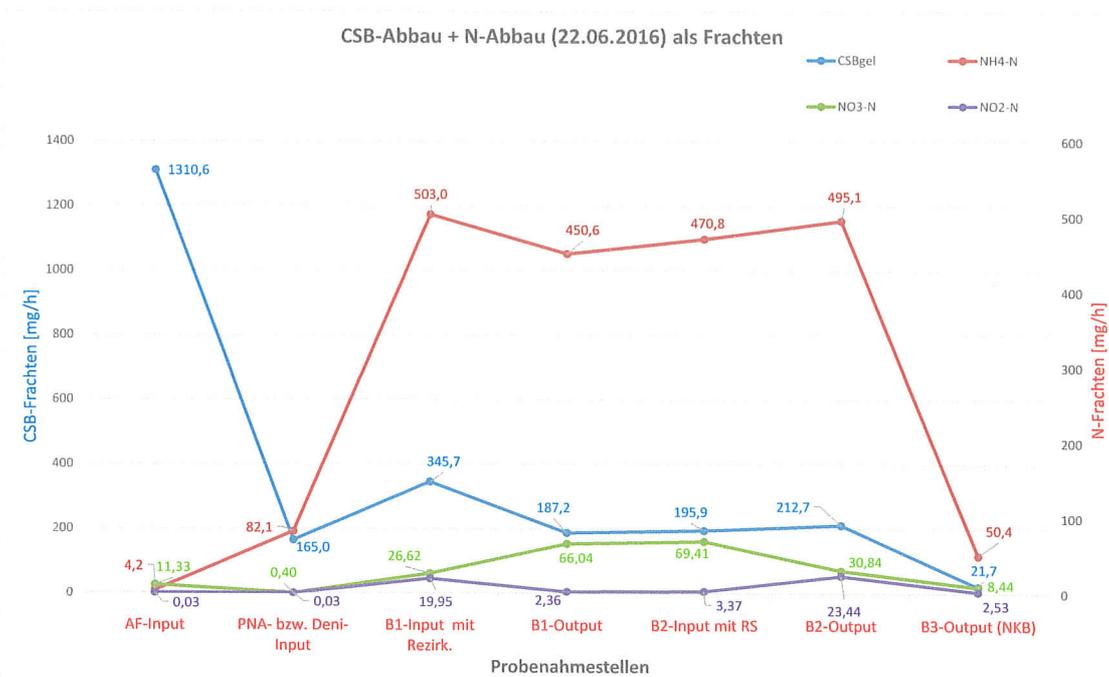
E) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,40-1,74l/h, RV=5,35-8,33 , RS=0,36-1,03



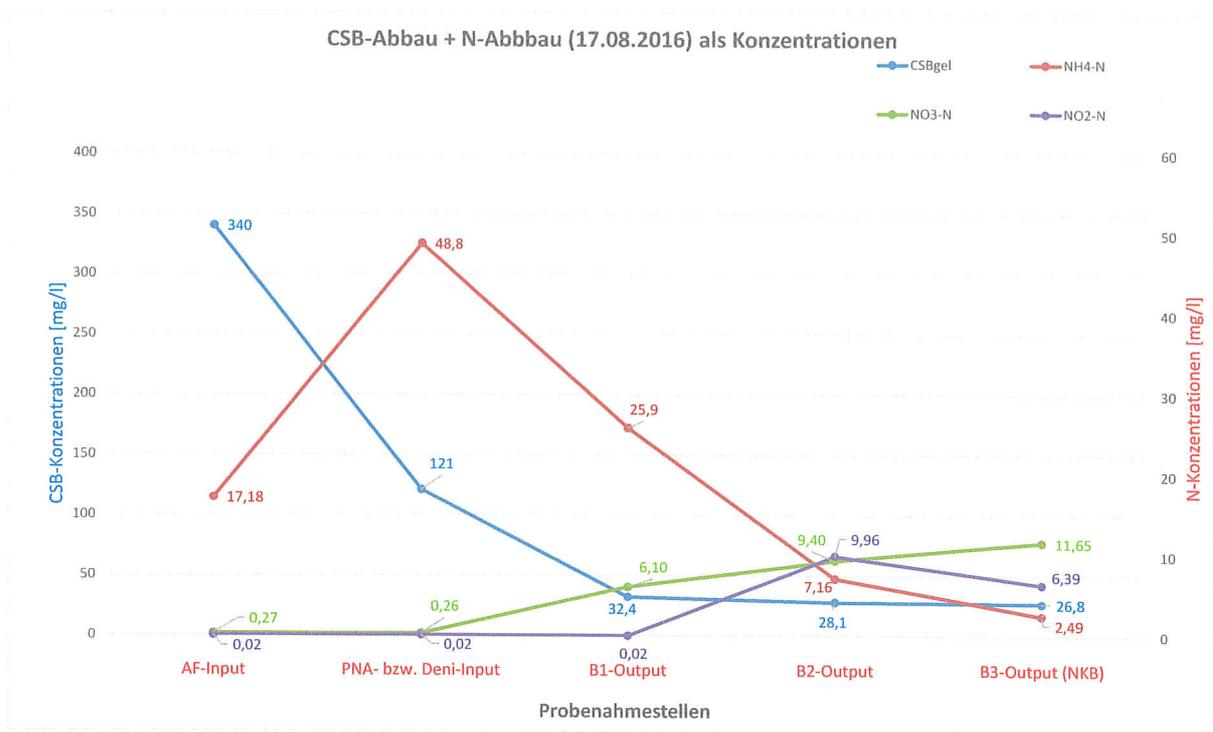
F) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,50-1,86l/h, RV=6,01-10,02 , RS=0,34-0,40



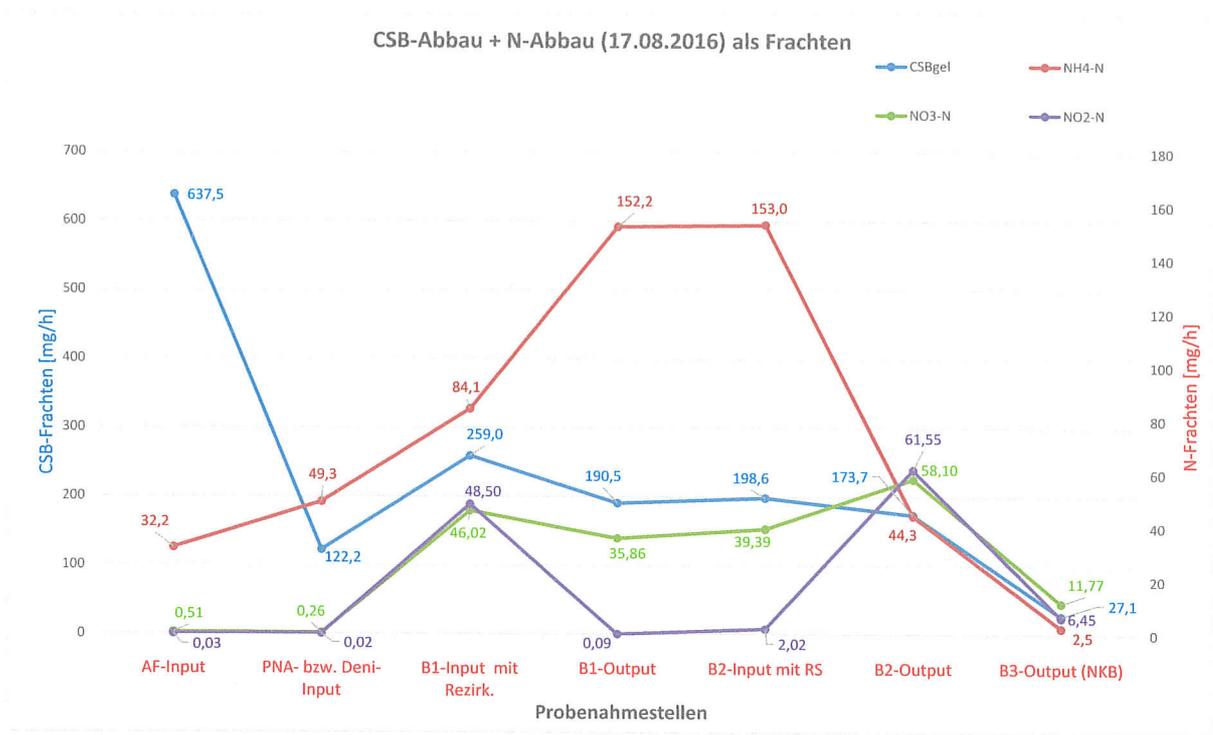
F) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,50-1,86l/h, RV=6,01-10,02 , RS=0,34-0,40



G) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,01-1,68l/h, RV=2,36-4,82 , RS=0,17-0,35



G) AF+PNA mit geringer Belüftung Qzu,AFund Qzu,PNA = 1,01-1,68l/h, RV=2,36-4,82 , RS=0,17-0,35



Bemessungsdaten: Durchflüsse und Frachten

| Durchfluss-/Frachtdaten | | Berechnung | | Ergebnis |
|---------------------------|--|-------------------|--|----------|
| Formelzeichen / Abkürzung | Bezeichnung | Einheit | | |
| $Q_{S,aM}$ | Schmutzwasserzufluss im Jahresmittel | l/s | $EW \cdot w_s / (s \cdot d)$ | 13,89 |
| $Q_{F,aM}$ | Fremdwasserzufluss im Jahresmittel | l/s | $FWZ \cdot Q_{S,aM}$ | 2,78 |
| $Q_{T,aM}$ | Trockenwetterzufluss im Jahresmittel | l/s | $Q_{S,aM} + Q_{F,aM}$ | 16,67 |
| $Q_{T,d,aM}$ | Mittlerer täglicher Trockenwetterzufluss | m ³ /d | $Q_{T,aM} \cdot (86.400/1000)$ | 1.440,00 |
| $Q_{T,h,max}$ | Maximaler täglicher Trockenwetterzufluss | m ³ /h | $((24 \cdot Q_{S,aM} / X_{0,max}) + Q_{F,aM}) \cdot 3,6$ | 102,31 |
| $f_{S,0M}$ | Faktor MW-Abfluss zur Kläranlage | - | | 6 |
| Q_M | Zufluss im Mischwasserfall bei Regenwetter | l/s | $f_{S,0M} \cdot Q_{S,aM} + Q_{F,aM}$ | 86,11 |
| $Q_{M,h}$ | Zufluss im Mischwasserfall bei Regenwetter | m ³ /h | $Q_M \cdot 3,6$ | 310,00 |
| $B_{d,CSB,ZKA}$ | Tägliche Zulauffracht Kläranlage (KA) | kg/d | $120^{*1} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 1.200,00 |
| $B_{d,CSB,ZBB}$ | Tägliche Zulauffracht Belebungsbecken (BB) | kg/d | $90^{*2} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 900,00 |
| $B_{d,CSB,ZAF}$ | Tägliche Zulauffracht Anaerobifilter (AF) | kg/d | $100^{*3} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 1.000,00 |
| $B_{d,BSS,ZKA}$ | Tägliche Zulauffracht Kläranlage (KA) | kg/d | $60^{*1} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 600,00 |
| $B_{d,BSS,ZBB}$ | Tägliche Zulauffracht Belebungsbecken (BB) | kg/d | $45^{*2} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 450,00 |
| $B_{d,BSS,ZAF}$ | Tägliche Zulauffracht Anaerobifilter (AF) | kg/d | $50^{*3} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 500,00 |
| $B_{d,TS,ZKA}$ | Tägliche Zulauffracht Kläranlage (KA) | kg/d | $70^{*1} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 700,00 |
| $B_{d,TS,ZBB}$ | Tägliche Zulauffracht Belebungsbecken (BB) | kg/d | $35^{*2} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 350,00 |
| $B_{d,TS,ZAF}$ | Tägliche Zulauffracht Anaerobifilter (AF) | kg/d | $50^{*3} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 500,00 |
| $B_{d,N,ZKA}$ | Tägliche Zulauffracht Kläranlage (KA) | kg/d | $11^{*1} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 110,00 |
| $B_{d,N,ZBB}$ | Tägliche Zulauffracht Belebungsbecken (BB) | kg/d | $10^{*2} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 100,00 |
| $B_{d,N,ZAF}$ | Tägliche Zulauffracht Anaerobifilter (AF) | kg/d | $10^{*3} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 100,00 |
| $B_{d,P,Z}$ | Tägliche Zulauffracht P | kg/d | $1,8^{*1} \cdot (g/(EW \cdot d)) \cdot EW/1000$ | 18,00 |

Erklärung Abkürzungen

EW = Einwohnerwert
 w_s = spez. Wasserverbrauch:
 s/d = Sekunden pro Tag
 FWZ = Fremdwasserzuschlag
 X_{0,max} = Divisor
 für Spitzenabfluss bei Trockenwetter
 f_{S,0M} = Faktor MW-Abfluss zur Kläranlage

10.000
 120
 86.400
 20
 13
 6

EW
 l/(E·d)
 s/d
 %
 h/d
 vgl. Bild 2 A198
 vgl. Bild 1 A198

*1) = Einwohner spezifische Frachten Rohabwasser
 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 *2) = Einwohner spezifische Frachten nach Vorklärung
 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000 bei Durchflusszeit Vorklärung bei QT,aM von 0,5 bis 1,0 h
 *3) = Einwohner spezifische Frachten nach Separation
 z.B. Siebschnecke Fa. Huber, geschätzter Abbaugrad 15-20%, gew. 16,66 %

CSB - Bilanz
Varianten 0 bis 3

Anlage AVIII-2

| CSB - Frachten | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|--------|--------|---|--------|---------|---|---------|--------|---|---------|---------|---|--------|---------|---------|
| | Variante 0: "konventionelle KA" | | | Variante 1a: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + Nitrifikation" | | | Variante 1b: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + Nitrifikation" | | | Variante 2: "AF (C-Abbau) + 2-stufige Deammonifikation (PNA)" | | | Variante 3: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + 2-stufige Deammonifikation (PNA)" | | | |
| | Einwohnerspez. Fracht **1) | Fracht | | Einwohnerspez. Fracht **1) | Fracht | | Einwohnerspez. Fracht **1) | Fracht | | Einwohnerspez. Fracht **1) | Fracht | | Einwohnerspez. Fracht **1) | Fracht | | |
| | [g/(E*0)] | [kg/d] | [kg/a] | [g/(E*0)] | [kg/d] | [kg/a] | [g/(E*0)] | [kg/d] | [kg/a] | [g/(E*0)] | [kg/d] | [kg/a] | [g/(E*0)] | [kg/d] | [kg/a] | |
| Abbaustufen / Abbauweg | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf KA | 120 | 43.800 | 1.200 | 43.800 | 1.200 | 438.000 | 120 | 43.800 | 1.200 | 438.000 | 1.200 | 438.000 | 120 | 43.800 | 1.200 | 438.000 |
| Ablauf KA *2) | 6 | 2.190 | 60 | 2.190 | 60 | 21.900 | 6 | 2.190 | 60 | 21.900 | 60 | 21.900 | 6 | 2.190 | 60 | 21.900 |
| Mechanische Stufe | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Mechanische Stufe | 120 | 43.800 | 1.200 | 43.800 | 1.200 | 438.000 | 120 | 43.800 | 1.200 | 438.000 | 1.200 | 438.000 | 120 | 43.800 | 1.200 | 438.000 |
| Ablauf Vorklärbecken | 90 | 32.850 | 900 | 328.500 | | | | | | | | | | | | |
| Ablauf Separator | | | | 100 | 36.500 | 1.000 | 365.000 | 100 | 36.500 | 1.000 | 365.000 | 1.000 | 36.500 | 1.000 | 365.000 | 1.000 |
| Primärschlamm (PS) | 30 | 10.950 | 300 | 109.500 | 20 | 7.300 | 200 | 73.000 | 20 | 7.300 | 200 | 73.000 | 20 | 7.300 | 200 | 73.000 |
| Biologische Stufe aerob | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Bildung (ZB) | 90 | 32.850 | 900 | 328.500 | | | | | | | | | | | | |
| Abbau Bildung; Kohlenstoffminimierung + Nitrifikation + Denitrifikation *3) | 42,0 | 15.330 | 420 | 153.300 | | | | | | | | | | | | |
| Überschussschlamm (US) *3) | 42,0 | 15.330 | 420 | 153.300 | | | | | | | | | | | | |
| Biologische Stufe anaerob | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Anaerobstufe (AF) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Abbau Anaerobstufe (AF); Kohlenstoffminimierung *5) | | | | 100 | 36.500 | 1.000 | 365.000 | 100 | 36.500 | 1.000 | 365.000 | 1.000 | 36.500 | 1.000 | 365.000 | 1.000 |
| Faulgas | | | | 60 | 21.900 | 600 | 219.000 | 70 | 25.550 | 700 | 255.500 | 700 | 25.550 | 700 | 255.500 | 700 |
| Überschussschlamm (US) *3) | | | | 57,000 | 20.805 | 570 | 208.050 | 66,500 | 24.273 | 665 | 242.725 | 665 | 24.273 | 665 | 242.725 | 665 |
| Überschussschlamm (US) *3) | | | | 3,000 | 1.095 | 30 | 10.950 | 3,500 | 1.275 | 35 | 12.775 | 3,500 | 1.275 | 35 | 12.775 | 3,500 |
| Nachbehandlung aerob / anaerob | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Nachbehandlung aerob | | | | 40 | 14.600 | 400 | 146.000 | 30 | 10.950 | 300 | 109.500 | 30 | 10.950 | 300 | 109.500 | 300 |
| Abbau Bildung; Denitrifikation bzw. Denitrifikation + C-Elimination (Red) | | | | 17 | 6.205 | 170 | 62.050 | 12 | 4.350 | 120 | 43.800 | 12 | 4.350 | 120 | 43.800 | 120 |
| Abbau Bildung; Nitrifikation + Ammoniak (C-Denitrifikation) + C-Elimination (Red) | | | | | | | | | | | | | 12,0 | 4.350 | 120 | 43.800 |
| Überschussschlamm (US) *3) | | | | 17,0 | 6.205 | 170 | 62.050 | 12,0 | 4.350 | 120 | 43.800 | 12,0 | 4.350 | 120 | 43.800 | 120 |
| Faulung | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Faulung (PS-US) | 72,0 | 25.280 | 720 | 252.800 | 40,000 | 14.600 | 400 | 146.000 | 35,500 | 12.958 | 355 | 129.575 | 35,500 | 12.958 | 355 | 129.575 |
| Faulgas *4) | 30,00 | 11.109 | 300,00 | 111.090 | 18,00 | 6.570 | 180 | 65.700 | 16,650 | 6.077 | 167 | 60.773 | 16,650 | 6.077 | 167 | 60.773 |
| Faulschlamm | 41,40 | 15.111 | 414,00 | 151.110 | 22,000 | 8.030 | 220 | 80.300 | 18,850 | 6.880 | 189 | 68.803 | 18,850 | 6.880 | 189 | 68.803 |

*1) vgl. Anlage A1

*2) Gesetzl. Mindestabwert vor Gewässerabfuhr für CSB an Ortseinstrom GK 4: mit %; = spez. Wasserzucht; sichere Einhaltung des Abaufwertes wird angestrebt; deshalb gewählt: EW = Einwertwert

*3) Überschussschlammproduktion in Abhängigkeit von den Abbaustufen 1993 und 2015 wird von ca. 50% CSB als im US folierte über abbaubare Anteil beträgt somit: im Vergleich mit Überschuss ab ca. 2015 wird von ca. 5% CSB als im US folierte Biomasse über abbaubare Anteil beträgt somit: biologg. P-Elimination wird nicht berücksichtigt

*4) Faulgasproduktion in Abhängigkeit von den Abbaustufen 2014 bei mesophil: Primärschlamm Abbaugrad in %: Überschussschlamm Abbaugrad in %:

| | |
|----------|----|
| Faulung: | 60 |
| Faulgas: | 30 |

Energieausbeute elektrisch

Varianten 0 bis 3

Anlage AVIII-3

| Abbaustufen / Abbauweg (vgl. Anlage AVIII-2) | Energieausbeute *1) | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---------------------------|-------------------------------|---|---------------------------|-------------------------------|---|---------------------------|-------------------------------|---|---------------------------|-------------------------------|---|---------------------------|-------------------------------|
| | Variante 0: "Konventionelle KA" | | | Variante 1a: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + Nitrifikation" | | | Variante 1b: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + Nitrifikation" | | | Variante 2a/2b: "AF (C-Abbau) + 2-stufige Deammonifikation (PNA)" | | | Variante 3: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + 2-stufige Deammonifikation (PNA)" | | |
| | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E·q)] | Energiegehalt *2) [kWh/d] | Energiegehalt *2) [kWh/(E·q)] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E·q)] | Energiegehalt *2) [kWh/d] | Energiegehalt *2) [kWh/(E·q)] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E·q)] | Energiegehalt *2) [kWh/d] | Energiegehalt *2) [kWh/(E·q)] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E·q)] | Energiegehalt *2) [kWh/d] | Energiegehalt *2) [kWh/(E·q)] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E·q)] | Energiegehalt *2) [kWh/d] | Energiegehalt *2) [kWh/(E·q)] |
| Zulauf KA | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 |
| Ablauf KA | 0,020 | 7,41 | 203,01 | 0,020 | 7,41 | 203,01 | 0,020 | 7,41 | 203,01 | 0,020 | 7,41 | 203,01 | 0,020 | 7,41 | 203,01 |
| Mechanische Stufe | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Mechanische Stufe | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 1,481,973 |
| Ablauf Vorklärbecken | 0,305 | 111,15 | 3,046,15 | | | | | | | | | | | | |
| Ablauf Separator | | | | 0,338 | 123,50 | 3,383,50 | 0,338 | 123,50 | 3,383,50 | 0,338 | 123,50 | 3,383,50 | 0,338 | 123,50 | 3,383,50 |
| Primärschlamm (PS) | 0,102 | 37,05 | 1,016,05 | 0,088 | 24,70 | 676,70 | 0,088 | 24,70 | 676,70 | 0,088 | 24,70 | 676,70 | 0,088 | 24,70 | 676,70 |
| Biologische Stufe aerob | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Belebungs (ZB) | 0,395 | 111,15 | 3,046,15 | | | | | | | | | | | | |
| Abbau Belebungs: Kohlenstoffelimination + Nitrifikation + Denitrifikation | 0,142 | 51,87 | 1,421,07 | | | | | | | | | | | | |
| Überschussschlamm (ÜS) | 0,142 | 51,87 | 1,421,07 | | | | | | | | | | | | |
| Biologische Stufe anaerob | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Anaerobic (AF) | | | | 0,338 | 123,50 | 3,383,50 | 0,338 | 123,50 | 3,383,50 | 0,338 | 123,50 | 3,383,50 | 0,338 | 123,50 | 3,383,50 |
| Abbau Anaerobic (AF): Kohlenstoffelimination | | | | | | | | | | | | | | | |
| Faulgas (Biogas: CH ₄ -Anteil) | | | | 0,193 | 70,39 | 1,928,60 | 0,225 | 82,13 | 2,250,03 | 0,225 | 82,13 | 2,250,03 | 0,225 | 82,13 | 2,250,03 |
| Überschussschlamm (ÜS) | | | | 0,010 | 3,70 | 101,51 | 0,012 | 4,32 | 118,42 | 0,012 | 4,32 | 118,42 | 0,012 | 4,32 | 118,42 |
| Nachbehandlung aerob / anaerob | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Nachbehandlung aerob | | | | 0,135 | 49,40 | 1,353,40 | 0,102 | 37,05 | 1,016,05 | 0,102 | 37,05 | 1,016,05 | 0,102 | 37,05 | 1,016,05 |
| Abbau Belebungs: Denitrifikation bzw. Denitrifikation + C-Elimination (Reif) | | | | 0,058 | 20,89 | 575,20 | 0,041 | 14,82 | 406,02 | 0,041 | 14,82 | 406,02 | 0,041 | 14,82 | 406,02 |
| Abbau Belebungs: Nitrifikation + Anammox (e-Deammonifikation) + C-Eliminator (Reif) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Überschussschlamm (ÜS) | | | | 0,058 | 20,89 | 575,20 | 0,041 | 14,82 | 406,02 | 0,041 | 14,82 | 406,02 | 0,041 | 14,82 | 406,02 |
| Faulung | | | | | | | | | | | | | | | |
| Zulauf Faulung (PS+ÜS) | 0,244 | 88,82 | 2,430,12 | 0,135 | 49,40 | 1,353,40 | 0,120 | 43,84 | 1,201,14 | 0,120 | 43,84 | 1,201,14 | 0,120 | 43,84 | 1,201,14 |
| Faulgas (Biogas: CH ₄ -Anteil) | 0,104 | 37,79 | 1,035,35 | 0,081 | 28,23 | 800,03 | 0,056 | 20,56 | 583,35 | 0,056 | 20,56 | 583,35 | 0,056 | 20,56 | 583,35 |
| Fäulgaschlamm | 0,140 | 51,13 | 1,400,77 | 0,074 | 27,17 | 744,37 | 0,064 | 23,28 | 637,79 | 0,064 | 23,28 | 637,79 | 0,064 | 23,28 | 637,79 |
| Energieausbeute BHKW | | | | | | | | | | | | | | | |
| Faulgas gesamt (Anaerobstufe + Faulung alle Biogas (CH ₄ -Anteil)) | 0,104 | 37,79 | 1,035,35 | 0,254 | 92,62 | 2,537,63 | 0,281 | 102,69 | 2,813,38 | 0,281 | 102,69 | 2,813,38 | 0,281 | 102,69 | 2,813,38 |
| Elektrische Energieausbeute *3) | 0,041 | 15,12 | 414,14 | 0,102 | 37,05 | 1,016,05 | 0,113 | 41,09 | 1,125,35 | 0,113 | 41,09 | 1,125,35 | 0,113 | 41,09 | 1,125,35 |

***1) Energiegehalt**
 Methangehalt (Biogasgehalt pro CSB
 vgl. HARTWIG GWA, Fulu 2013)
 $\frac{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kgCSB}}{1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kgCSB}}$
 spez. Methanwert
 Spez. Energiegehalt pro CH₄
 vgl. ROSENWINKEL ET AL. "Acetatsensitivität" 36,4 MJ/m³ =
 spez. Energiegehalt pro CH₄ (spez. Energiegehalt pro CH₄ =
 spez. Energiegehalt pro CH₄ / spez. Methanwert)
 spez. Energiegehalt pro CSB: z.B. 120 g(E·q) / 1000 = 3,3835 kWh / kgCSB
 spez. Energiegehalt pro CSB: z.B. 120 g(E·q) / 1000 = 3,3835 kWh / kgCSB

*2) EW = Einwohnerwert
 *3) Wirkungsgrad BHKW

Sauerstoffverbrauch Kohlenstoff-/Stickstoffelimination
 Variante 0: "Konventionelle KA"

| Durchfluss-/Frachtdaten | | Berechnung *1) | | Ergebnis | |
|---|--|---------------------------------------|--|--|------------|
| Formelzeichen / Abkürzung | Bezeichnung | Einheit | | | |
| Schlammalter | | | | | |
| $t_{S,aerob,Biem}$ | Bemessungsschlammalter aerob | d | $SF * 3,4 * 1,103^{(15-T)}$ | $1,647 * 3,4 * 1,103^{(15-20)}$ | 3,43 |
| $t_{S,Biem}$ | Bemessungsschlammalter | d | $t_{S,aerob,Biem} * 1/(1-V_G/V_{BB})$ | $3,43 * 1/(1-0,5)$ | 6,86 |
| Sauerstoffverbrauch Kohlenstoffelimination | | | | | |
| $OV_{C,BSS}$ | Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination, bezogen auf den BSB ₅ | kg O ₂ /kgBSB ₅ | $OV_{C,BSS} = 0,56 + (0,15 * t_{TS} * F_T) / (1 + 0,17 * t_{TS} * F_T)$ | $0,56 + (0,15 * 6,86 * 1,4157) / (1 + 0,17 * 6,86 * 1,4157)$ | 1,11 |
| $OV_{d,C}$ | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination | kg O ₂ /d | $OV_{d,C} = B_{d,BSS} * 5) * OV_{C,BSS}$ | $450 * 1,11$ | 500 |
| Sauerstoffverbrauch Stickstoffelimination | | | | | |
| $OV_{d,N}$ | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Nitrifikation | kg O ₂ /d | $OV_{d,N} = Q_{T,d,AM} * 4,3 * (S_{NO3,D} - 0) / 1440 * 4,3 * (51,30 - 0 + 10,8) / 1000 + S_{NO3,AM} / 1000$ | | 385 |
| $OV_{d,D}$ | Täglich für die Kohlenstoffelimination aus der Denitrifikation verfügbarer O ₂ (Sauerstoffgewinn) | kg O ₂ /d | $OV_{d,D} = Q_{T,d,AM} * 2,9 * S_{NO3,D} / 1000$ | $1440 * 2,9 * 51,30 / 1000$ | 214 |
| Sauerstoffverbrauch Gesamt | | | | | |
| ΣOV_d | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoff- / Stickstoffelimination | kg O ₂ /d | $\Sigma_{Ovd} = OV_{d,C} + OV_{d,N} - OV_{d,D}$ | $500 + 385 - 214$ | 670 |
| | | | | optimierte Belüftung | 12,22 |
| | | | | 335 | 122.239 |
| | | | | 447 | 162.985 |
| | | | | 447 | 16,30 |
| | | | | kWh/a | kWh/(EW*a) |
| | | | | 335 | 122.239 |
| | | | | 447 | 16,30 |
| | | | | kWh/d | kWh/(EW*a) |

Erklärung Abkürzungen

T = mittlere Abwassertemperatur ° C
 SF = Sicherheitsfaktor
 VD/VBS = Verhältnis Denitrifikations- zu Nitrifikationsvolumen
 F_T = Temperaturfaktor = 1,072^(T-15)
 EW = Einwohnerwert

* 1) = Formeln vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 * 2) = spez. Sauerstoffbedarf Nitrifikation vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 * 3) = spez. Sauerstoffgewinn Denitrifikation vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 * 4) Sauerstofftrag Belüftung : Mittl. Wert vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 * 5) vgl. Anlage A1 energetisch optimiert:

20 ° C
 1,647 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000; bis 20.000 EW
 0,5 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000; gewählt
 1,415708764 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 10,000 EW
 4,3 gO₂ / g NH₄-N
 2,9 gO₂ / g NH₄-N
 1,5 kgO₂ / kWh
 2,0 kgO₂ / kWh

Sauerstoffverbrauch Kohlenstoff-/Stickstoffelimination
Variante 1a: "AF (C-Abbau) + zweistufige Denitrifikation/Nitrifikation"

| Durchfluss-/Frachtdaten | | Berechnung *1) | | Ergebnis | |
|--|--|---------------------------------------|---|--|---------|
| Formelzeichen / Abkürzung | Bezeichnung | Einheit | | | |
| Schlammalter | | | | | |
| $t_{TS,aerob,Bem}$ | Bemessungsschlammalter aerob | d | $SF \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-T)}$ | $1,647 \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-20)}$ | 3,43 |
| $t_{TS,Bem}$ | Bemessungsschlammalter | d | $t_{TS,aerob,Bem} \cdot 1 / (1 - V_G/V_{GB})$ | $3,43 \cdot 1 / (1 - 0,5)$ | 6,86 |
| Sauerstoffverbrauch Kohlenstoffelimination (Nachbehandlung aerob) | | | | | |
| $OV_{C,BSB}$ | Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination, bezogen auf den BSB ₅ | kg O ₂ /kgBSB ₅ | $OV_{C,BSB} = 0,56 + ((0,15 \cdot t_{TS} \cdot F_T) / (1 + 0,17 \cdot t_{TS} \cdot F_T))$ | $0,56 + ((0,15 \cdot 6,86 \cdot 1,4157) / (1 + 0,17 \cdot 6,86 \cdot 1,4157))$ | 1,11 |
| $OV_{d,C}$ | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination | kg O ₂ /d | $OV_{d,C} = B_{UBSB} \cdot OV_{C,BSB}$ | $200 \cdot 1,11$ | 278 |
| Sauerstoffverbrauch Stickstoffelimination (Nitrifikation) | | | | | |
| OV_{d,NH_4,NO_2} | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Nitrifikation | kg O ₂ /d | $OV_{d,N} = Q_{T,d,akt} \cdot 4,3 \cdot (S_{NO_3,D} \cdot 0) + S_{NO_3,AN} / 1000$ | $1440 \cdot 4,3 \cdot (50,44 - 0 - 10,8) / 1000$ | 379 |
| $OV_{d,DL}$ | Täglich für die Kohlenstoffelimination aus der Denitrifikation verfügbarer O ₂ (Sauerstoffgewinn) | kg O ₂ /d | $OV_{d,D} = Q_{T,d,akt} \cdot 2,9 \cdot S_{NO_3,D} / 1000$ | $1440 \cdot 2,9 \cdot 50,44 / 1000$ | 211 |
| Sauerstoffverbrauch Gesamt | | | | | |
| ΣOV_d | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoff- / Stickstoffelimination | kg O ₂ /d | $\Sigma OV_d = OV_{d,C} + OV_{d,N}$ | $278 + 379 = 211$ | 446 |
| | | | | Energieverbrauch Belüftung *5) | |
| | | | | kWh/a | 108.540 |
| | | | | kWh/d | 297 |
| | | | | kWh/a | 81.405 |
| | | | | kWh/d | 223 |
| | | | | kWh/a | 8,14 |

Erklärung Abkürzungen

T = mittlere Abwassertemperatur
 SF = Sicherheitsfaktor
 VD/VBB = Verhältnis Denitrifikations- zu Nitrifikationsvolumen
 F_T = Temperaturfaktor: 1,072^(15-T)
 EW = Einwohnerwert

* 1) = Formeln vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 * 2) = spez. Sauerstoffbedarf Nitrifikation
 * 3) = spez. Sauerstoffgewinn Denitrifikation vgl. Rosenwinkel et al. 2015

* 4) CSB-Abbaugrad vgl. Versuchsergebnisse AF und Anlage A1-B_{UBSB,AN} = 500 kg/d; für BSB₅ analog
 --> BSB₅-Zulauf zur Nachbehandlung: 500^(1-0,60)

* 5) Sauerstofftrag Belüftung : Mittl. Wert vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 energetisch optimiert: 2,0 kgO₂ / kWh

20 °C
 1,647 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000, bis 20.000 EW
 0,5
 1,415708784 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 10,000 EW

4,3 gO₂ / g NH₄-N
 2,9 gO₂ / g NH₄-N

50 %
 250,00 kgBSB₅/d
 1,5 kgO₂ / kWh
 2,0 kgO₂ / kWh

Sauerstoffverbrauch Kohlenstoff-/Stickstoffelimination
 Variante 1b: "AF (C-Abbau) + zweistufige Denitrifikation/Nitrifikation"

| Durchfluss-/Frachtdaten | | Berechnung *1) | | Ergebnis | |
|--|--|---------------------------------------|---|--|--------|
| Formelzeichen / Abkürzung | Bezeichnung | Einheit | | | |
| Schlammalter | | | | | |
| $t_{S,aerob,Bem}$ | Bemessungsschlammalter aerob | d | $SF \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-T)}$ | $1,647 \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-20)}$ | 3,43 |
| $t_{S,Bem}$ | Bemessungsschlammalter | d | $t_{S,aerob,Bem} \cdot \frac{1}{(1-V_{d,C}V_{d,B})}$ | $3,43 \cdot \frac{1}{(1-0,5)}$ | 6,86 |
| Sauerstoffverbrauch Kohlenstoffelimination (Nachbehandlung aerob) | | | | | |
| $OV_{C,BSB}$ | Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination, bezogen auf den BSB ₅ | kg O ₂ /kgBSB ₅ | $OV_{C,BSB} = 0,56 + ((0,15 \cdot t_{S,aerob} \cdot F_T) / (1 + 0,17 \cdot t_{S,aerob} \cdot F_T))$ | $0,56 + ((0,15 \cdot 6,86 \cdot 1,4157) / (1 + 0,17 \cdot 6,86 \cdot 1,4157))$ | 1,11 |
| $OV_{d,C}$ | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination | kg O ₂ /d | $OV_{d,C} = B_{r,BSB} \cdot OV_{C,BSB}$ | $150 \cdot 1,11$ | 167 |
| Sauerstoffverbrauch Stickstoffelimination (Nitrifikation) | | | | | |
| OV_{d,NH_4,NO_2} | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Nitrifikation | kg O ₂ /d | $OV_{d,N} = Q_{T,d,all} \cdot 3,4 \cdot (S_{NO_3,D} \cdot 0 + S_{NO_3,AN}) / 1000$ | $1440 \cdot 3,4 \cdot (50,44 \cdot 0 + 10,8) / 1000$ | 300 |
| $OV_{d,Dk}$ | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination aus der Denitrifikation verfügbarer O ₂ (Sauerstoffgewinn) | kg O ₂ /d | $OV_{d,D} = Q_{T,d,all} \cdot 1,7 \cdot S_{NO_3,D} / 1000$ | $1440 \cdot 1,7 \cdot 50,44 / 1000$ | 123 |
| Sauerstoffverbrauch Gesamt | | | | | |
| ΣOV_d | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoff-/Stickstoffelimination | kg O ₂ /d | $\Sigma OV_d = OV_{d,C} + OV_{d,N}$ | $167 + 300 + 123$ | 343 |
| | | | | Energieverbrauch Belüftung *5) | |
| | | | | kWh/a | 83.425 |
| | | | | kWh/d | 229 |
| | | | | kWh/a | 62.569 |
| | | | | kWh/d | 171 |
| | | | | kWh/a | 6,26 |

Erklärung Abkürzungen

T = mittlere Abwassertemperatur
 SF = Sicherheitsfaktor
 VD/BB = Verhältnis Denitrifikations- zu Nitrifikationsvolumen
 F_T = Temperaturfaktor: 1,072^(T-15)
 EW = Einwohnerwert

* 1) = Formeln vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 * 2) = spez. Sauerstoffbedarf Nitrifikation
 * 3) = spez. Sauerstoffgewinn Denitrifikation
 vgl. Rosenwinkel et al. 2015

* 4) CSB-Abbaugrad vgl. Versuchsergebnisse AF und Anlage A11_{B,sebazur} = 500 kg/d; für BSB₅ analog
 → BSB₅-Zulaufkonz. zur Nachbehandlung: 500 (1-0,60)

* 5) Sauerstofftrag Belüftung : Mittl./Wert vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000 energetisch optimiert: 2,0 kgO₂ / kWh

20 °C
 1,647 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000; bis 20.000 EW
 0,5 hier: Denitrifikation/Nitrifikation
 1,4157/08784 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 10.000 EW

3,4 gO₂ / g NH₄-N
 1,7 gO₂ / g NH₄-N

70 %

150,00 kgBSB₅/d

1,5 kgO₂ / kWh

2,0 kgO₂ / kWh

Sauerstoffverbrauch Kohlenstoff-/Stickstoffelimination
 Variante 2a/2b: "AF (C-Abbau) + 2-stufige Deammonifikation"

| Durchfluss-/Frachtdaten | | Berechnung *1) | | Ergebnis | |
|--|--|---------------------------------------|---|--|--------|
| Formelzeichen / Abkürzung | Bezeichnung | Einheit | | | |
| Schlammalter | | | | | |
| $t_{TS,aerob,Bem}$ | Bemessungsschlammalter aerob | d | $SF \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-T)}$ | $1,647 \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-20)}$ | 3,43 |
| $t_{TS,Bem}$ | Bemessungsschlammalter | d | $t_{TS,aerob,Bem} \cdot 1/(1-\sqrt{V_{AB}})$ | $3,43 \cdot 1/(1-0,5)$ | 6,86 |
| Sauerstoffverbrauch Kohlenstoffelimination (Nachbehandlung aerob) | | | | | |
| $OV_{C,BSB}$ | Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination, bezogen auf den BSB ₅ | kg O ₂ /kgBSB ₅ | $OV_{C,BSB} = 0,56 \cdot (0,15^{t_{TS}} \cdot F_T) / (1+0,17^{t_{TS}} \cdot F_T)$ | $0,56 \cdot ((0,15 \cdot 6,86 \cdot 1,4157) / (1+0,17 \cdot 6,86 \cdot 1,4157))$ | 1,11 |
| $OV_{d,C}$ | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination | kg O ₂ /d | $OV_{d,C} = B_{d,BSB} \cdot *3) \cdot OV_{C,BSB}$ | $150 \cdot 1,11$ | 167 |
| Sauerstoffverbrauch Stickstoffelimination (Deammonifikation: partielle Nitrifikation) | | | | | |
| OV_{d,NH_4,NO_2} | Täglicher Sauerstoffverbrauch für partielle Nitrifikation | kg O ₂ /d | $OV_{d,N} = C_{T,NH_4} \cdot 3,4 \cdot 1,32/2,32 \cdot *2) + 1440 \cdot 3,4 \cdot 1,32/2,32 \cdot (50,44 - (S_{NO_3,d} - 0 + S_{NO_3,N}) / 1000)$ | | 171 |
| Sauerstoffverbrauch Gesamt | | | | | |
| ΣOV_d | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoff- / Stickstoffelimination | kg O ₂ /d | $\Sigma OV_d = OV_{d,C} + OV_{d,N}$ | $167 + 171$ | 337 |
| | | | | Energieverbrauch Belüftung *4) | |
| | | | | kWh/a | 82.023 |
| | | | | kWh/d | 225 |
| optimierte Belüftung | | | | kWh/a | 61.518 |
| | | | | kWh/d | 169 |

Erklärung Abkürzungen

- T = mittlere Abwassertemperatur
- SF = Sicherheitsfaktor
- VD/BB = Verhältnisse Anammox- zu Nitrifikationsvolumen
- F_T = Temperaturfaktor : 1,072^(T-15)
- EW = Einwohnerwert
- * 1) = Formeln vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
- * 2) = spez. Sauerstoffbedarf Nitrifikation
- Verhältnis Ammonium zu Nitrit bei Anammox: 1/1,32
- * 3) CSB-Abbaugrad vgl. Versuchsergebnisse AF und Anlage A1; B_{5,ss,zp} = 500 kg/d; für BSB₅ analog → BSB₅-Zulaufkonz. zur Nachbehandlung: 500 * (1-0,55)
- * 4) Sauerstofftrag Belüftung : Mittl.Wert vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000 energetisch optimiert: 2,0 kgO₂/kWh

20 °C
 1,647 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000; bis 20.000 EW
 0,5 hier: Anammox/Nitrifikation
 1,4157/08784 vgl. ATV-DVWK-A 131, 2000
 10.000 EW
 3,4 gO₂/g NH₄-N
 1/1,32
 70 %
 150,00 kgBSB₅/d
 1,5 kgO₂/kWh
 2,0 kgO₂/kWh

Sauerstoffverbrauch Kohlenstoff-/Stickstoffelimination
 Variante 3: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + 2-stufige Deammonifikation"

| Durchfluss-/Frachtdaten | | Berechnung *1) | | Ergebnis | | |
|---|---|--|---|--|--------------|-------------------|
| Formelzeichen / Abkürzung | Bezeichnung | Einheit | | | | |
| Schlammalter | | | | | | |
| $t_{FS,aerob,Bem}$ | Bemessungsschlammalter aerob | d | $SF \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-T)}$ | $1,647 \cdot 3,4 \cdot 1,103^{(15-20)}$ | 3,43 | |
| $t_{FS,Bem}$ | Bemessungsschlammalter | d | $t_{FS,aerob,Bem} \cdot 1/(1-V_D/V_{BB})$ | $3,43 \cdot 1/(1-0,5)$ | 6,86 | |
| Sauerstoffverbrauch Kohlenstoffelimination (Nachbehandlung aerob) | | | | | | |
| $OV_{C,BSS}$ | Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination, bezogen auf den BSB ₅ | kg O ₂ /kg BSB ₅ | $OV_{C,BSS} = 0,56 + (0,15 \cdot t_{FS} \cdot F_T) / (1 + 0,17 \cdot t_{FS} \cdot F_T)$ | $0,56 + ((0,15 \cdot 6,86 \cdot 1,4157) / (1 + 0,17 \cdot 6,86 \cdot 1,4157))$ | 1,11 | |
| $OV_{d,C}$ | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoffelimination | kg O ₂ /d | $OV_{d,C} = B_{d,BSS} \cdot OV_{C,BSS}$ | $150 \cdot 1,11$ | 167 | |
| Sauerstoffverbrauch Stickstoffelimination (Denitrifikation + partielle Nitrifikation und Deammonifikation) | | | | | | |
| OV_{d,NH_4,NO_2} | Täglicher Sauerstoffverbrauch für partielle Nitrifikation für Anammox | kg O ₂ /d | $OV_{d,N} = Q_{T,d,AM} \cdot 3,4 \cdot 1,32/2,32 \cdot (S_{NO_3,D} - 0 + S_{NO_3,AN}) / 1000 \cdot 1/3$ *2) | $1440 \cdot 3,4 \cdot 1,32/2,32 \cdot (50,44 - 0 + 10,8) / 1000 \cdot 1/3$ | 57 | |
| OV_{d,NH_4,NO_2} | Täglicher Sauerstoffverbrauch für partielle Nitrifikation für Denitrifikation | kg O ₂ /d | $OV_{d,N} = Q_{T,d,AM} \cdot 3,4 \cdot (S_{NO_3,D} - 0 + S_{NO_3,AN}) / 1000 \cdot 2/3$ *5) | $1440 \cdot 3,4 \cdot (50,44 - 0 + 10,8) / 1000 \cdot 2/3$ | 200 | |
| $OV_{d,DK}$ | Täglicher Sauerstoffverbrauch aus der Denitrifikation verfügbarer O ₂ (Sauerstoffgewinn) | kg O ₂ /d | $OV_{d,D} = Q_{T,d,AM} \cdot 1,7 \cdot S_{NO_3,D} / 1000 \cdot 2/3$ *5) | $1440 \cdot 1,7 \cdot 50,44 / 1000 \cdot 2/3$ | 82 | |
| Sauerstoffverbrauch Gesamt | | | | | | |
| ΣOV_d | Täglicher Sauerstoffverbrauch für Kohlenstoff- / Stickstoffelimination | kg O ₂ /d | $\Sigma OV_d = OV_{d,C} + OV_{d,N}$ | $167 + 57 + 200 - 82$ | 341 | |
| | | | | kWh/d | kWh/a | kWh/(EW*a) |
| | | | | 170 | 62.219 | 6,22 |
| | | | | Energieverbrauch Belüftung *4) | | |
| | | | | 227 | 82.958 | 8,30 |
| | | | | 170 | 62.219 | 6,22 |

Erklärung Abkürzungen

T = mittlere Abwassertemperatur °C
 SF = Sicherheitsfaktor
 VD/VBB = Verhältnis Anammox- zu Nitrifikationsvolumen
 F_T = Temperaturfaktor: 1,072^(T-20)
 EW = Einwohnerwert

* 1) = Formeln vgl. ATV-DWK-A 131, 2000
 * 2) = spez. Sauerstoffbedarf Nitrifikation
 Verhältnis Ammonium zu Nitrit bei Anammox: 1/1,32

* 3) CSB-Abbaugrad vgl. Versuchsergebnisse AF und Anlage A1.15_{2,55,2AF} = 500 kgO₂/t für BSB₅ analog
 --> BSB₅-Zulaufnach zur Nachbehandlung: 500¹ (1-0,55)

* 4) Sauerstofftrag Belüftung: Mittl. Wert vgl. ATV-DWK-A 131, 2000 energetisch optimiert: 2,0 kgO₂/kWh

* 5) Verhältnis Anammox zu Denitrifikation: 1/2

Energiebilanz elektrisch
Varianten 0 bis 3

| Energieausbeute / Energieverbrauch | Energieemenge | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---------------------------|---|---------------------------|---|---------------------------|--|---------------------------|---|---------------------------|--|---------------------------|--|
| | Variante 0: "Konventionelle KA" | | Variante 1a: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + Nitrifikation" | | Variante 1b: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + Nitrifikation" | | Variante 2a/b: "AF (C-Abbau) + 2-stufige Deammonifikation (PNA)" | | Variante 3: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + 2-stufige Deammonifikation (PNA)" | | | | |
| | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E*0)] | Energiegehalt *2) [kWh/a] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E*0)] | Energiegehalt *2) [kWh/a] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E*0)] | Energiegehalt *2) [kWh/a] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E*0)] | Energiegehalt *2) [kWh/a] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E*0)] | Energiegehalt *2) [kWh/a] | Einwohnerspez. Energiegehalt [kWh/(E*0)] | Energiegehalt *2) [kWh/a] | |
| Energiepotential Zulauf KA (Vgl. Anlage A3) | 0,406 | 148,20 | 4,060,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 4,060,20 | 1,481,973 | 0,406 | 148,20 | 4,060,20 | 1,481,973 | |
| Energieausbeute (vgl. Anlage A3) | | | | | | | | | | | | | |
| Biologische Stufe anaerob | | | | | | | | | | | | | |
| Faulgas (Biogas, CH ₄ -Anteil) | | | | | | | | | | | | | |
| Faulung (PS+DS) | | | | | | | | | | | | | |
| Faulgas (Biogas: CH ₄ -Anteil) | 0,104 | 37,79 | 1,035,35 | 377,903 | 0,061 | 22,23 | 609,03 | 222,296 | 0,056 | 20,56 | 563,35 | 205,624 | |
| Energieausbeute BHKW | | | | | | | | | | | | | |
| Elektrische Energieausbeute | 0,041 | 15,12 | 414,14 | 151,161 | 0,102 | 37,05 | 1,015,05 | 370,493 | 0,113 | 41,08 | 1,125,35 | 410,754 | |
| Energieverbrauch | | | | | | | | | | | | | |
| Belüftung (vgl. Anlagen 4a, 4b, 4c-4d, 4e) | 0,045 | 16,30 | 446,54 | 162,985 | 0,030 | 10,85 | 297,37 | 108,540 | 0,023 | 8,34 | 228,56 | 83,425 | |
| durchschnittliche KA | | | | | | | | | | | | | |
| optimiert | 0,033 | 12,22 | 334,90 | 122,239 | 0,022 | 8,14 | 223,03 | 81,405 | 0,017 | 6,26 | 171,42 | 62,669 | |
| Sonstige (Pumpen, Rührwerke etc.) *) | 0,045 | 16,30 | 446,54 | 162,985 | 0,045 | 16,30 | 446,54 | 162,985 | 0,045 | 16,30 | 446,54 | 162,985 | |
| durchschnittliche KA | | | | | | | | | | | | | |
| optimiert | 0,033 | 12,22 | 334,90 | 122,239 | 0,033 | 12,22 | 334,90 | 122,239 | 0,033 | 12,22 | 334,90 | 122,239 | |
| Gesamt durchschnittliche KA | 0,089 | 32,60 | 893,07 | 325,971 | 0,074 | 27,15 | 743,90 | 271,525 | 0,068 | 24,64 | 675,10 | 246,411 | |
| optimiert | 0,067 | 24,45 | 669,80 | 244,478 | 0,056 | 20,36 | 557,93 | 203,644 | 0,051 | 18,48 | 506,32 | 184,808 | |
| Energiebilanz (Energieausbeute - Energieverbrauch) | | | | | | | | | | | | | |
| Energiebeibeh. (+) / Energieüberschuss (+) durchschnittliche KA | -0,048 | -17,48 | -478,93 | -174,809 | 0,027 | 9,90 | 271,15 | 98,968 | 0,045 | 16,43 | 450,25 | 164,343 | |
| optimiert | -0,026 | -9,33 | -255,66 | -93,317 | 0,046 | 16,68 | 457,12 | 166,850 | 0,062 | 22,59 | 619,03 | 225,945 | |
| Eigenversorgungsgrad (Energieausbeute / Energieverbrauch) durchschnittliche KA | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 1,36 | 1,36 | 1,36 | 1,36 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | |
| optimiert | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 2,22 | 2,22 | 2,22 | 2,22 | |

*) Sonstige Energieverbraucher :
Ansatz: gleiche Menge wie Belüftung, vgl. Kap.2.1.2 für Variante 1 = 50 % des Gesamtverbrauchs
Somit ergeben sich einwohnerspezifische Energieverbräuche (Gesamt) von rd.34 kWh/(E*a) bei der durchschnittlichen und rd. 25 kWh/(E*a) bei der optimierten Betriebsweise für Variante 1
Für die Varianten 2 bis 4 wird von den gleichen Mengen wie bei Variante 1 ausgegangen, vgl. auch Kap.5.1

*) EW = Einwohnerwert

*) Wirkungsgrad η_w

Stickstoffbilanz

| Konzentrationen | | Einheit | Berechnung | Ergebnis | |
|--|--|---------|---|----------------------|--------------------|
| Formelzeichen / Abkürzung | Bezeichnung | | | Belebungsbecken (BB) | Anaerobfilter (AF) |
| C _{d,CSB,ZBB} bzw. ZAF | Tägliche Zulaufkonzentration Belebungsbecken (BB) bzw. Anaerobfilter (AF) CSB | mg/l | (EW / Q _{T,d,am}) * B _{d,CSB,ZBB} bzw. ZAF | 625,00 | 694,44 |
| C _{d,BSS,ZBB} bzw. ZAF | Tägliche Zulaufkonzentration Belebungsbecken (BB) bzw. Anaerobfilter (AF) BSS ₅ | mg/l | (EW / Q _{T,d,am}) * B _{d,BSS₅,ZBB} bzw. ZAF | 312,50 | 347,22 |
| C _{N,Z} | Stickstoffkonzentration Zulauf Vorklärung (VK) und Separator | mg/l | (B _{d,N,Z,K/A} / Q _{T,d,am}) * 1000 | 76,39 | 76,39 |
| C _{N,AV} | Stickstoffkonzentration Ablauf Vorklärung (VK) und Separator | mg/l | (B _{d,N,Z,BB} / Q _{T,d,am}) * 1000 | 69,44 | 69,44 |
| X _{orgN,PS} | Org.N aus Primärschlamm, aus Differenz Zulauf VK - Ablauf VK | mg/l | C _{N,Z} - C _{N,AV} | 6,94 | 6,94 |
| X _{orgN,BM} | Stickstoffkonzentration in der Biomasse, vereinfacht zu 0,04... 0,05 * C _{BSS,ZB} | mg/l | 0,05 * C _{d,BSS,ZB} | 15,63 | 17,36 |
| X _{orgN,S} | Organischer Gesamtstickstoff im Gesamtschlamm | mg/l | X _{orgN,PS} + X _{orgN,BM} | 22,57 | 24,31 |
| C _{N,Rück} | Stickstoffkonzentration der Rückbelastung aus der Schlammbehandlung: 0,5 * X _{orgN,S} | mg/l | 0,5 * X _{orgN,S} | 11,28 | 12,15 |
| S _{NO3,AN} u. S _{NO2,AN} | Nitrat- bzw. Nitrit-Stickstoffkonzentration im Ablauf Nachklärung (AN) *1) | mg/l | 0,6 * S _{amorgN,OW} | 10,80 | 10,80 |
| S _{NH4,AN} | Ammonium-Stickstoffkonzentration im Ablauf Nachklärung (AN) *2) | mg/l | | 2,00 | 2,00 |
| S _{orgN,AN} | Organische Stickstoffkonzentration im Ablauf Nachklärung (AN) *3) | mg/l | | 1,00 | 1,00 |
| S _{NO3,D} u. S _{NO2,D} | zu denitrifizierende Nitrat- bzw. zu denitrifizierende Nitrit-Stickstoffkonzentration bzw. über Anammox abzubauenende Nitrit-Stickstoffkonz. | mg/l | C _{N,Z} - X _{orgN,PS} + C _{N,Rück} - S _{NH4,AN} - S _{orgN,AN} - S _{NO3,AN} - X _{orgN,BM} | 51,30 | 50,44 |

Erklärung Abkürzungen

EW = Einwohnerwert 10.000 EW
 Gesetzl. Mindestablaufwert vor Gewässerreinigung für Nges., Größenklasse GK 4 18 mg/l
 s/d = Sekunden pro Tag 86.400 s/d
 FWZ = Fremdwasserzuschlag 20 %
 X_{o,max} = Divisor 13 h/d
 für Spitzenabfluss bei Trockenwetter
 f_{s,om} = Faktor MW-Abfluss zur Kläranlage 6 vgl. Bild 1 A198

* 1) S_{NO3,AN} = 0,6... 0,8 * S_{amorgN,OW}
 (entsprechend den Ablaufanforderungen der jeweiligen Größenklasse der KA) hier: GK 4; 18 mg/l und auf Grund von Zulaufschwankungen 0,6

* 2) Geschätzter Ablauf Ammoniumstickstoff NKB, (l.M. kann mit 1 mg/l gerechnet werden)

* 3) Geschätzter Ablauf Org. N NKB, kann mit 1 mg/l geschätzt werden, bei spez. Gewerbeabwässern auch höher)

10,8 mg/l
 2 mg/l
 1 mg/l

Treibhausgasbilanz
Varianten 0 bis 3 - "Lachgas(N₂O)"

CO₂- bzw. CO_{2,eq}-Emissionen

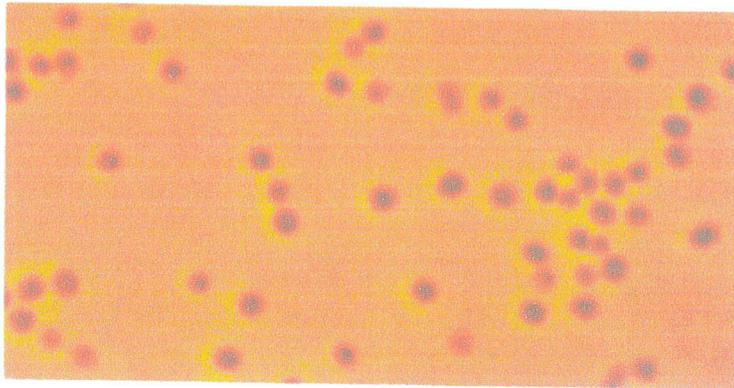
| CO ₂ - Verursacher | Variante 0: "Konventionelle KA" | | Variante 1a: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + Nitrifikation" | | Variante 1b: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + Nitrifikation" | | Variante 2a/b: "AF (C-Abbau) + 2-stufige Deammonifikation (PNA)" | | Variante 3: "AF (C-Abbau) + Denitrifikation + 2-stufige Deammonifikation (PNA)" | |
|---|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|--|-------------------------------|---|-------------------------------|
| | Einwohnerspez. Fracht CO ₂ [kg(E)/d] | Fracht CO ₂ [kg/d] | Einwohnerspez. Fracht CO ₂ [kg(E)/d] | Fracht CO ₂ [kg/d] | Einwohnerspez. Fracht CO ₂ [kg(E)/d] | Fracht CO ₂ [kg/d] | Einwohnerspez. Fracht CO ₂ [kg(E)/d] | Fracht CO ₂ [kg/d] | Einwohnerspez. Fracht CO ₂ [kg(E)/d] | Fracht CO ₂ [kg/d] |
| Netzstrom *1) (Bezug(+)/Einspeisung(-)) = Energiebedarf (+) / Energieüberschuss (-) durchschnittliche KA | 0,0256 | 256,23 | -0,0145 | -145,06 | -0,0241 | -240,89 | -0,0243 | -242,94 | -0,0242 | -241,57 |
| optimiert | 0,0137 | 136,78 | -0,0245 | -244,56 | -0,0331 | -331,18 | -0,0333 | -332,72 | -0,0332 | -331,69 |
| Biologische aerobe Stufe, Nachbehandlung aerob und Denitrifikation bzw. Denitrifikation | | | | | | | | | | |
| CSB _{gesamt} = CSB _{ab} + CSB _{AN} | 0,084 | 840,00 | 0,034 | 340,00 | 0,024 | 240,00 | 0,024 | 240,00 | 0,024 | 240,00 |
| CO _{2,gas} *2) | 0,119 | 1.189,00 | 0,048 | 480,86 | 0,034 | 339,43 | 0,034 | 339,43 | 0,034 | 339,43 |
| CO _{2,biogas} *3) | 0,059 | 594,00 | 0,024 | 240,43 | 0,017 | 169,71 | 0,017 | 169,71 | 0,017 | 169,71 |
| CO _{2,biogas} = CO _{2,gas} + CO _{2,biomasse} | 0,059 | 594,00 | 0,024 | 240,43 | 0,017 | 169,71 | 0,017 | 169,71 | 0,017 | 169,71 |
| Faulgasverwertung *4) | | | | | | | | | | |
| Faulgas gesamt (Anaerobstufe + Faulung) als Biogas (CH ₄ -Anteil) umgerechnet in CO ₂ | 0,0184 | 184,01 | 0,0451 | 451,00 | 0,0500 | 500,01 | 0,0500 | 500,01 | 0,0500 | 500,01 |
| Faulgasproduktion *5) | | | | | | | | | | |
| Faulgas gesamt (Anaerobstufe + Faulung) hier: CO ₂ -Anteil | 0,0045 | 44,61 | 0,0109 | 109,33 | 0,0121 | 121,21 | 0,0121 | 121,21 | 0,0121 | 121,21 |
| Distickstoffmonoxid-Emissionen (N ₂ O = "Lachgas") *6) | | | | | | | | | | |
| N ₂ O-Produktion (CO ₂ -äquivalent) | 0,0083 | 83,16 | 0,0082 | 82,01 | 0,0625 | 624,62 | 0,0360 | 360,38 | 0,0497 | 496,89 |
| GESAMT CO ₂ | | | | | | | | | | |
| durchschnittliche KA | 0,1102 | 1.102,01 | 0,0738 | 737,71 | 0,1175 | 1.174,67 | 0,0908 | 908,37 | 0,1046 | 1.046,25 |
| optimiert | 0,1043 | 1.042,56 | 0,0638 | 638,21 | 0,1084 | 1.084,38 | 0,0819 | 818,59 | 0,0956 | 956,13 |

EW = Einwohnerwert

*1) lt. Umweltbundesamt: CO₂-Emissionsfaktor Strommix 2015: 535 g/kWh = 0,535 kg/kWh
 *2) aus Stöchiometrie: CO_{2,gas} = (18 * 44 g/mol) / (17 * 52 g/mol) * CSB_{gesamt}
 *3) CO_{2,biogas} = 0,5 * CO_{2,gas}

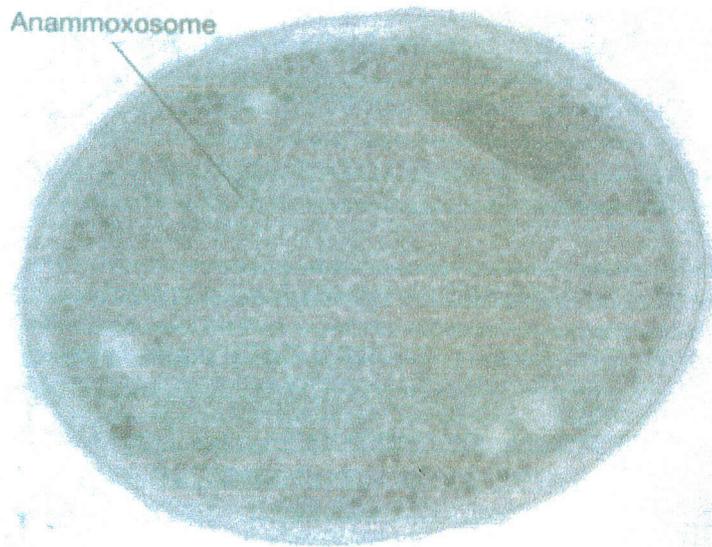
*4) Umrechnung Faulgasemissionen gesamt (CH₄-Anteil) aus Anlage AVIII/3 in CO₂ mit: Spez. Energierichtwert pro CH₄: 10,1 kWh/m³CH₄
 vgl. ROSENWINKEL ET AL. "Anaerobtechnik": 36,4 MJ/m³CH₄
 Dichte CH₄ - temperaturabhängig
 15°C = 288,15 K, z.B. n.: "ABR LIQUIDE DACHSH", vgl. Internet
 35°C = 308,15 K, z.B. n. Gasgesetz (p*V=n*R*T)
 gewährt mittlere Wert
 Umrechnung CH₄ auf CO₂ aus Stöchiometrie:
 M(CH₄) = 16 g/mol
 M(CO₂) = 44 g/mol
 Verhältnis = 2,75 gCO₂/gCH₄

*5) CO₂-Anteil im Faulgas:
 Abhängigkeit vgl. ROSENWINKEL ET AL. "Anaerobtechnik":
 CO₂-Anteil 20% - 45%, gew.: 40 %
 *6) N₂O-Anteil:
 vgl. WEISBERG/BOCHER ET AL. "Hausputzdeammonifikation..."
 Nitrifikation + Denitrifikation: 0,3 % der Stickstofffracht
 Denitrifikation: 1,3 % der Stickstofffracht
 Annahme: Nitrifikation + Denitrifikation: 2,3 % der Stickstofffracht
 Annahme: Anaerobe Nitrifikation-Denitrifikation: 1,8 % der Stickstofffracht
 CO₂-Äquivalente: 310 vgl. Anlage AVIII/1, VIII-4
 Stickstofffracht: 1440 * (51,3-0+10,8) / 1000 kgN/d = 88,42 kgN/d
 V1-3 1440 * (50,44-0+10,8) / 1000 kgN/d = 86,18 kgN/d
 Berechnungsweg allg.: 0,3% von 89,42 kgN/d = 0,26826 kg N₂O/d
 0,26826 kg N₂O/d * 310 = 83,16 kg CO₂/d



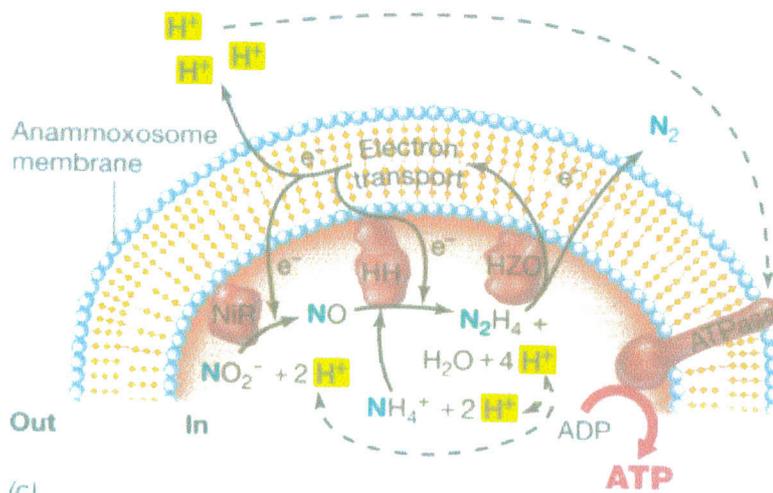
Marc Strous

(a)



Richard Webb and John A. Fuerst

(b)



(c)

Abbildung A1: Anammox-Bakterien: Zellaufbau [Madigan et al./ 2012]

ANLAGE A X

Ermittlung Sauerstoffverbrauch nach A 131 [MILKE/ SAHLBACH, 2014]

→ Der Sauerstoffbedarf für die **Kohlenstoffelimination** berechnet sich wie folgt:

$$OV_{d,C} = B_{d, BSB5, ZB} * OV_{c, BSB} \quad [\text{kg O}_2/\text{d}]$$

mit $B_{d, BSB5, ZB}$: tägliche BSB5-Fracht im Zulauf der Belebung [kg BSB5 /d]
 $OV_{c, BSB}$: spezifischer Sauerstoffverbrauch [kg O₂ /kg BSB5]

→ Die notwendige Sauerstoffzufuhr für die **Nitrifikation** erfolgt nach Formel, mit dem spezifischen Sauerstoffbedarf von 4,3g O₂/g NH₄-N

$$OV_{d,N} = Q_d * 4,3 * \frac{S_{NO3, D} - S_{NO3, ZB} + S_{NO3, AN}}{1000} \quad [\text{kg O}_2 / \text{d}]$$

mit: Q_d : Abwasservolumen pro Tag [m³ /d]
 $S_{NO3, D}$: zu denitrifizierende Nitratkonzentration [mg /l]
 $S_{NO3, ZB}$: Nitratkonzentration im Zulauf / Belebung [mg /l]
 $S_{NO3, AN}$: Ablaufkonzentration Nitrat Nachklärung [mg /l]

→ Bei der **Denitrifikation** kann ein Teil des Sauerstoffbedarfs zurückgewonnen werden, was sich nach folgender Formel berechnet:

$$O_{Vd, DL} = Q_d * 2,9 * \frac{S_{NO3, D}}{1000} \quad [\text{kg O}_2 / \text{d}]$$

→ Bei der **Denitrifikation** kann ebenfalls ein Teil des Sauerstoffbedarfs zurückgewonnen werden, mit folgender Formel:

$$O_{Vd, DK} = Q_d * 1,3 * \frac{S_{NO2, D}}{1000} \quad [\text{kg O}_2 / \text{d}]$$

→ Bei der **Deammonifikation** wird Sauerstoff für die partielle Nitritation benötigt mit einem spezifischen Sauerstoffverbrauch von 3,4 g/O₂ /gNH₄ – N. Zu berücksichtigen ist weiter das Umsatzverhältnis Ammonium zu Nitrit von 1: 1,32:

$$Q_{Vd, PN} = Q_d * 3,4 * \frac{(S_{NO3, ZB} - S_{NO3, ZB} + S_{NO3, AN})}{1000} * \frac{1,32}{(1 + 1,32)} \quad [\text{kg O}_2/\text{d}]$$

Grundlagen Treibhausgasbilanz

■ Netzstrombezug / Netzstromeinspeisung

Es wurde davon ausgegangen, dass der produzierte Strom in der Kläranlage verbraucht wird und im Falle von Stromüberschuss in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden kann. Zur Umrechnung des durch die Stromproduktion erzeugten CO₂, im Falle der Einspeisung vermiedenen CO₂, wurde der CO₂-Emissionsfaktor von 535 g/kWh für den deutschen Strommix für das Jahr 2015 nach Umweltbundesamt angesetzt.

■ Biologische aerobe Reinigungsstufe

Beim Abbau organischer Kohlenstoffverbindungen im Belebungsverfahren (aerobe Abwasserreinigung) setzen heterotrophe Mikroorganismen zum Energiegewinn organische Stoffe zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasser um.

Mit Hilfe nachfolgender Gleichung [KUBIN / 2013] kann die aerobe Umsetzung von organischen Abwasserinhaltsstoffen, bestehend aus Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen näherungsweise beschrieben werden:



wobei die organischen Stoffe C₁₈H₁₉O₉N dem CSB-Substrat entsprechen, das umgesetzt wird:

$$\text{CSB-Substrat} = \text{CSB}_{\text{ZB}} - \text{CSB}_{\text{AN}}$$

Mit

CSB_{ZB}: CSB Zulauf Belebung

CSB_{AN}: CSB Ablauf Nachklärung

M (O₂) = 2 * 16 = 32 g/mol

M (CO₂) = 12 + 2 * 16 = 44 g/mol

Die gesamte CO₂-Menge, die bei der biologischen aeroben Reinigungsstufe emittiert werden kann, ergibt sich aus der Stöchiometrie:

$$\text{CO}_{2, \text{ ges.}} = \frac{18 * 44 \text{ g/mol}}{17,5 * 32 \text{ g/mol}} * \text{CSB}_{\text{Substrat}}$$

[KREBS / 2012] gibt eine Bandbreite für das Verhältnis g Biomasse-CSB/ g oxidierter CSB von 0,38 bis 0,75 für den heterotrophen Abbau an.

Es wird von 50% im Überschussschlamm fixierter Biomasse ausgegangen und von 50% abgebauter („veratmeter“) organischer Stoffe mit entsprechenden CO₂-Emissionen.

Für die Denitrifikation/ Denitritation werden die gleichen Ansätze für die CO₂-Emissionen angenommen.

■ Faulgasverwertung

Bei der Verbrennung des Faulgases im Blockheizkraftwerk (BHKW) entsteht aus einem Mol Methan ein Mol Kohlendioxid aus der Stöchiometrie,

mit:

$M(\text{CH}_4) = 16 \text{ g/mol}$ und $M(\text{CO}_2) = 44 \text{ g/mol}$:

$$\frac{44 \text{ g/mol CO}_2}{16 \text{ g/mol CH}_4} = 2,75 \text{ g CO}_2 / \text{g CH}_4$$

Der spezifische Energiegehalt pro CH_4 beträgt: $10,1 \text{ kWh/m}^3 \text{ CH}_4$

■ Faulgasproduktion:

Es wurde von einem CO_2 -Anteil von 40% im Faulgas ausgegangen, vgl. Ermittlung in *Anlage AVIII-7*.

■ Distickstoffmonoxid-Emissionen:

Bei unvollständiger Umsetzung durch Prozessstörungen können sowohl bei Nitrifikation / Denitrifikation, Nitritation / Denitritation als auch bei der Deammonifikation N_2O und NO gebildet werden, wobei N_2O über ein hohes Treibhausgaspotential verfügt (310 CO_2 -Äquivalente). Es wurden $\text{N}_2\text{-O}$ -Anteile aus Literaturangaben für die $\text{N}_2\text{-O}$ -Emissionen (vergl. *Anlage AVIII-7*) angenommen. [Weisenbacher / 2013]

Für die Denitritation/Nitritation wurde ein höherer N_2O -Wert als bei der Deammonifikation angenommen, da die Nitritation prozessbedingt mit einer größeren Abwassermenge abläuft.