

Abschlussbericht – Arbeitsversion

DBU-Fördervorhaben

Algenprojekt AZ 32197

Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Behandlung von Sickerwasser mit Hilfe eines identifizierten Algentypus unter Verwendung von CO₂ aus dem Rotteprozess einer MBA-Deponie mit Energiebilanz

Labor und Feldversuche zu Green Technology

Durchführung: GVoA mbH & Co. KG
Pohlsche Heide 1, 32479 Hille
T. Kropp, B. Büscher
ab. 01.01.2017
GVA mbH
Am Kompostwerk 2, 32479 Hille
E. Meyerbröker, B. Büscher

Zusammen mit: Fachhochschule Bielefeld Campus Minden
Artilleriestraße 9, 32427 Minden
Prof. Dr.-Ing. Johannes Weinig

Projektleiter: Dipl. Chemiker Bernd Büscher

Bericht: Büscher, Bernd; Johannes Weinig; Nadine Winkelmann;
Alevtina Kurz und Michael Koltermann

Abkürzungsverzeichnis

AML	Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke
BBM	Bold's Basal Medium
BB-Med.	Bold's Basal Medium
Chlorella sp.	Chlorella Spezies
CSB	Chemische Sauerstoffbedarf in mg/L
Cv; <i>C. vulgaris</i>	Chlorella vulgaris
Eg; <i>E. gracilis</i>	Euglena gracilis
Euglena sp.	Euglena Spezies
FuE	Forschung und Entwicklung
°C	Grad Celsius
GVA	Gesellschaft zur Verwertung von Abfällen im Kreis Minden-Lübbecke mbH
GVoA	Gesellschaft zur Verwertung organischer Abfälle mbH & Co. KG
h	Stunden
HCL	Salzsäure
KAVG	Kreisabfallverwertungsgesellschaft des Kreises Minden-Lübbecke mbH
MBA	Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung
SAG	Culture Collection of Algae
L	Liter
λ (Lambda)	Wellenlänge
PoH	Entsorgungszentrum
mg	Milligramm
μL	Mikroliter
μm	Mikrometer
mL	Milliliter
nm	Nanometer
NH₄⁺	Ammonium
NO₃⁻	Nitrat
N_{organisch} (N_{org.})	Organische Stickstoffgehalt
ortho-PO₄	ortho-Phosphat
PVC	Polyvinylchlorid
rpm	Umdrehungen pro Minute
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff

Verzeichnis der Tabellen und Bilder

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung BoldBasalMedium von Sigma Aldrich (B5282).....	25
Tabelle 2: Zusammensetzung Volvic naturell (Analyseauszug von SGS Institut Fresenius) ..	25
Tabelle 3: Untersuchungsparameter Sickerwasser von der LUFA ITL	30
Tabelle 4: Sickerwassermesswerte eigene Untersuchungen.....	30
Tabelle 5: Anordnung der Beleuchtungsversuche	37
Tabelle 6: Anzahl der Zellen am Anfang (100) und nach 10 Tagen.....	46
Tabelle 7: Ammoniumgehalt in Ansätzen mit 3mal täglich 30 sec CO ₂	51
Tabelle 8: pH-Werte an der Algenrinne vor der Begasung	52
Tabelle 9: Leitfähigkeit der Algenrinne	52
Tabelle 10: Gasbildung Algen, frisch, tiefgefroren, Sickerwasser und Rinnensediment	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau im Bereich der MBA.....	11
Abbildung 2: Schematischer Aufbau im Bereich des Kompostwerkes	12
Abbildung 3: Das Entsorgungszentrum Pohlsche Heide	15
Abbildung 4: Bürker Zählkammer (Quelle: http://scienceservices.de – abgerufen 20.11.2014)	27
Abbildung 5: Beispiel für Kalibriergerade (Quelle: M. Vauth)	28
Abbildung 6: Kleine Algenrinne vierfach (Quelle T. Egemann)	31
Abbildung 7: Algenrinne auf dem Betriebsgelände der Pohlschen Heide (Quelle B. Büscher)	32
Abbildung 8: Aufbau zur Begasung von 12 Kulturen gleichzeitig (Quelle K. J. Schulz)	33
Abbildung 9: Schema der Versuchsreihe (Quelle K.J. Schulz)	33
Abbildung 10: Schematische Zeichnung zur Begasungsvorrichtung im Labor (K. J. Schulz)..	34
Abbildung 11: CO ₂ -Begasung der Algenrinne an der Pohlschen Heide (Quelle K. J. Schulz).	35
Abbildung 12: Laborapparatur zur Ammoniakausgasung.....	41
Abbildung 13: Typischer Wachstumsverlauf der Reinkulturen (Quelle L. Eichner).....	42
Abbildung 14: Korrelierende Zellzahl der Chlorella vulgaris Kultur (Quelle L. Eichner)	43
Abbildung 15: Korrelierende Zellzahl von Euglena gracilis (Quelle L. Eichner).....	44
Abbildung 16: Kalibriergerade für Chlorella vulgaris (Quelle M. Vauth)	44
Abbildung 17: Kalibriergerade für Euglena gracilis (Quelle M. Vauth)	45
Abbildung 18: Wachstum von Chlorella vulgaris mit 15 % Sickerwasser in zwei parallele Versuche (Quelle L. Eichner)	46
Abbildung 19: Wachstum in einer 50 % Mischkultur (Quelle L. Eichner)	47
Abbildung 20: Grünfärbung der Ansätze (in den Flaschen die Reinkulturen, in den Rundgefäßen die Mischungen) (Quelle L. Eichner).....	47
Abbildung 21: Optische Dichte einer Mischkultur (L. Eichner)	48
Abbildung 22: Ammoniumgehalt einer Mischkultur in mg Ammonium /L (L. Eichner)	48

Abbildung 23: pH-Wert einer Mischkultur (Ansatz 2) zu verschiedenen Tageszeiten (L. Eichner).....	48
Abbildung 24: Wachstum einer Reinkultur von <i>Chlorella vulgaris</i> mit CO ₂ Begasung (Quelle K. J. Schulz)	49
Abbildung 25: <i>Chlorella vulgaris</i> mit 30 sec CO ₂ –Zufuhr (Quelle K. J. Schulz)	50
Abbildung 26: Schema der Algenrinne (Quelle K. J. Schulz)	51
Abbildung 27: Abtropfgitter nach der Besiedelung, vor Abstreichen und nach dem Abstreichen der Biomasse (Quelle K. J. Schulz)	53
Abbildung 28: Algenrinne zu Beginn und Ende Woche 1 (Quelle T. Egemann).....	58
Abbildung 29: Mikroskopische Aufnahmen der Algenmischung, Skalierung gilt für alle Aufnahmen (Quelle N. Winkelmann).....	60
Abbildung 30: Veränderung der Leitfähigkeit in Woche 1 (Quelle T. Egemann).....	60
Abbildung 31: Änderung des pH-Wertes in Woche 1 (Quelle T. Egemann)	61
Abbildung 32: Änderung des Sauerstoffgehalts in Woche 1 (Quelle T. Egemann).....	61
Abbildung 33: Veränderung der Temperatur in den Rinnen (Quelle T. Egemann)	61
Abbildung 34a+b: Nitrat- und Nitritgehalt im Verlauf Woche 1 (Quelle T. Egemann)	63
Abbildung 35: Ammoniumgehalt in Woche 1 (Quelle T. Egemann)	63
Abbildung 36a+b: CSB und TOC in Woche 1 (Quelle T. Egemann)	64
Abbildung 37: Leitfähigkeit in Woche 2 (Quelle T. Egemann)	65
Abbildung 38a+b: Rinne zu Beginn(o) und Ende(u) von Woche 2 (Quelle T. Egemann)	66
Abbildung 39: Sauerstoffgehalt in Woche 2 (Quelle T. Egemann).....	67
Abbildung 40: pH-Wert in Woche 2 (Quelle T. Egemann)	67
Abbildung 41a-c: Werte der Stickstoffkomponenten in Woche 2 (Quelle T. Egemann).....	68
Abbildung 42a+b: CSB und TOC in Woche 2 (Quelle T. Egemann)	69
Abbildung 43: Extinktion in Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann).....	70
Abbildung 44: Leitfähigkeit Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann).....	71
Abbildung 45: Sauerstoffgehalt Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann)	71
Abbildung 46: pH-Wert Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann).....	72
Abbildung 47a-c: Stickstoffkomponenten in Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann)	73
Abbildung 48a+b: CSB und TOC der Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann).....	74
Abbildung 49: Algenrinne am 02.12.2015.....	79

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen

Verzeichnis der Tabellen und Bilder

Inhaltsverzeichnis	5
0. Zusammenfassung:	8
1. Vorstellung des Projektes und der Projektpartner	10
1.1. Das Projekt	10
1.2. Die Projektpartner	13
2. Einleitung	18
2.1. Algen	19
2.2. Chlorella vulgaris	20
2.3. Euglena gracilis	20
2.4. Physiologie der untersuchten Algen	21
2.5. Photosynthese und ihre limitierenden Faktoren	22
2.5.1. Licht	22
2.5.2. Temperatur und Wasser	23
2.5.3. Kohlendioxid	23
3. Material & Methoden	24
3.1. Organismen und Wachstumsmedien	24
3.2. Bestimmung der Zellzahl	26
3.2.1. Bürker-Zählkammer	26
3.2.2. Photometrie	27
3.2.3. Bestimmung der Zellzahl mit Hilfe einer Ausgleichsgerade	28
3.3. Sickerwasser	29
3.4. Algenrinnen	31
3.5. CO₂ Begasung	32
3.5.1. CO₂-Begasung in kleinen Kulturgefäßen	33
3.5.2. CO₂-Begasung in der Algenrinne	35
3.6. Erntetechnik	35
3.6.1. Abstreichgitter	36
3.6.2. Filtration	36
3.6.3. Zentrifugation	36
3.6.4. Abschöpfen bzw. Sedimentieren lassen	37

3.7.	Beleuchtungsdauer	37
3.8.	Messparameter und verwendete Methode	38
3.8.1.	Ammoniumgehalt	38
3.8.2.	pH-Wert, Sauerstoffsättigung, Leitfähigkeit und Temperatur.....	38
3.8.3.	Nitrat-/ Nitritgehalt	39
3.8.4.	Phosphatgehalt.....	39
3.8.5.	CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf)	39
3.8.6.	TOC (Total Organic Carbon).....	39
3.8.7.	Trockenrückstand und Glühverlust.....	39
3.9.	Geräteliste	40
3.10.	Ammoniak-Ausgasung	41
3.11.	Aufzeichnung Freiland Wetterdaten	41
4.	Ergebnisse	42
4.1.	Wachstum der Reinkulturen im optimalen Medium	42
4.2.	Wachstum, verschiedenen Sickerwasserkonzentrationen	45
4.3.	Wachstum in verschiedenen Mischverhältnissen	46
4.4.	Änderungen des pH-Wertes und des Ammoniumgehalts im Kulturverlauf.....	47
4.5.	Begasung mit technischem CO ₂ im Labor	49
4.6.	Begasung in der Algenrinne.....	51
4.7.	Erntetechnik	53
4.7.1.	Abstreichgitter	53
4.7.2.	Filtration.....	54
4.7.3.	Zentrifugation	54
4.8.	Langzeitversuche Algenrinne.....	54
4.8.1.	pH-Wert.....	56
4.8.2.	Leitfähigkeit	56
4.8.3.	Stickstoffverbindungen	56
4.8.4.	CSB und TOC.....	57
4.9.	Versuche an Parallelrinnen im Labormaßstab.....	58
4.9.1.	Versuch zur Parallelität der Rinnen	59
4.9.2.	Unterschiedliche Sickerwasserkonzentrationen in Parallelrinnen.....	64
4.9.3.	Einflussnahme durch Mikroalgen oder Mikrobiota des Sickerwassers.....	69
4.10.	Gasbildungsraten	75
5.	Wirtschaftliche Betrachtung	76

6. Diskussion	77
7. Fazit und Ausblick	80
8. Danksagung.....	82
9. Literaturverzeichnis	83

Anhang

0. Zusammenfassung:

Im vorliegenden Bericht wird über die Versuche und Ergebnisse des Projekts zur „Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Behandlung von Sickerwasser mit Hilfe eines identifizierten Algentypus unter Verwendung von CO₂ aus dem Rotteprozess einer MBA-Deponie mit Energiebilanz“ berichtet. Dieses Projekt stellt die Fortsetzung des DBU-Projektes AZ28741 dar. Im ersten Projekt wurden orientierende Versuche durchgeführt, die in dem vorliegenden Projekt verifiziert und erweitert wurden.

In diesem Projekt wurde in zwei vollständige Vegetationsperioden in der Algenrinne am Deponiestandort und im Labor untersucht:

- Bestimmung der Algentypen;
- Einflussfaktoren auf die Wachstumsbedingungen;
- Optimale Milieubedingungen für die geeigneten Algenkulturen;
- Ansatz für eine Energie- und CO₂-Bilanz;

Im Vorfeld der Versuche wurden die in der Ringdrainage der Deponie natürlich auftretenden Algen so weit wie möglich identifiziert und nah verwandte Algen mit ähnlichem beschriebenen Habitus aus der Algensammlung der SAG Göttingen bezogen. Von den ausgewählten Algenstämmen *Chlorella vulgaris* (SAG 211-11b) und *Euglena gracilis* (SAG 1224-5/25) lagen die Sequenzdaten vor und die Kulturen waren axenisch. Beide Stämme sind bereits sehr früh isoliert worden und wurden als robust beschrieben.

Für beide Algen wurden geeignete Wachstumsbedingungen im Labor und im Freiland erprobt. Dabei standen vor allem ein einfaches Medium und unterschiedliche Umweltbedingungen im Fokus. Im Vorprojekt wurde im Wesentlichen auf Laborergebnisse fokussiert. In diesem Forschungsvorhaben steht die Anwendbarkeit mit den gegebenen Bedingungen auf der Deponie im Vordergrund. Um die wechselnden Umwelteinflüsse trotzdem in einen auswertbaren Kontext stellen zu können, wurden parallel verschiedene Bedingungen in Laborversuchen simuliert.

Der Betrieb einer Algenrinne ist mit einer artifiziellen Algenmischung über einen längeren Zeitraum möglich. In der Algenrinne wurde eine Elimination der Schad- und Störstoffe gemessen. Das Wachstum in der Scale-Up Algenrinne konnte durch die verwendete Isolierung und Begleitheizung auch in den Wintermonaten aufrechterhalten werden. Teilweise wurde in den Wintermonaten eine höhere Wachstumsrate als in den Sommermonaten gemessen.

Eine Konzentration von 20 % Sickerwasser in der Rinne bot für die Algen die besten Wachstumsbedingungen, die eine Eliminierung von Stickstofffracht erzielen konnte. Es wurde kein geschlossener Stoffkreislauf aufgebaut, weil die erzeugte Algenmasse und die erzielten Gasvolumina für einen halbtechnischen Betrieb zu gering waren.

Die Ernte der Algenmasse gelang. Es zeigte sich, dass die erfolgreichste Algenmischung sehr heterogen war und eine Zentrifuge die beste Erntemethode war. Aus wirtschaftlichen

Gründen eignen sich aber eher Separatoren oder Siebbandpressen aus der Abwassertechnik.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Behandlung von Deponie-Sickerwasser mit Hilfe von Algen zu ermöglichen (Green Technology) und auf diese Weise Schad- und Störstoffe aus der wässrigen Phase zu eliminieren. Das für Algenwachstum essentielle Kohlendioxid (CO₂) wird aus dem Abgas eines Blockheizkraftwerkes gewonnen, das mit Deponie- und Biogas als Treibstoff betrieben wird. Die so erzeugte Algen- (Bio-) Masse wird der Vergärungsstufe einer Mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage (MBA) zugeführt. Nach Vergärung und anschließendem Rotteprozess werden die Rückstände deponiert. Die für diesen Ablauf erforderlichen Anlagen und Strukturen sind im Entsorgungszentrum Pohlsche Heide vorhanden.

Mit der Algenproduktion entsteht zusätzliche Biomasse zur anaeroben Behandlung und Gasproduktion zur Verwertung in dem Blockheizkraftwerke. Der zusätzliche apparative und betriebliche Aufwand amortisiert sich noch nicht in betriebswirtschaftlichen Zeiträumen. Als Ergänzung bzw. Kofermentation bringt die Algenmasse jedoch einen zusätzlichen energetischen Nutzen für den Stoffkreislauf.

Das Entsorgungszentrum Pohlsche Heide hat einen unmittelbaren betriebswirtschaftlichen Vorteil. Die teure Behandlung von Deponiesickerwässern (Kläranlage Heisterholz) wird entbehrlich. Das so behandelte Deponiesickerwasser kann in einer kommunalen Kläranlage bis zur Einhaltung der Grenzwerte für Indirekteinleiter aufbereitet werden. Die Kostenersparnis liegt bei etwa 70% der bisherigen Kosten für die Behandlung der Wässer.

1. Vorstellung des Projektes und der Projektpartner

In diesem Gliederungspunkt wird zunächst das Projekt und dann die am Projekt beteiligten Partner und Akteure vorgestellt.

1.1. Das Projekt

Algen werden üblicherweise als Rohstofflieferant z.B. für die Kosmetik- und Farbstoffindustrie eingesetzt und mithilfe von mineralischem Dünger mit Nährstoffen versorgt. Dabei steht die Produktion von reinem, in keiner Weise verunreinigtem Rohstoff im Vordergrund. Bei diesem Forschungsvorhaben jedoch steht die Wachstumsrate der Algen im Fokus. Die genaue Zusammensetzung der erzeugten Biomasse ist nicht entscheidend, sondern die Wachstumsrate, die Gasbildungsrate bei der anaeroben Behandlung der Algen und die Art und Menge der von den Algen aufgenommenen Stör- und Schadstoffen. Das Algenwachstum soll auch in einer Abwassermatrix realisiert werden, die eher am Rand optimaler Milieubedingungen liegt, wie bei Deponiesickerwasser mit hohen Salz- und Ammoniumgehalten und Schwermetallkonzentrationen.

Gleichzeitig wird durch die Photosynthese der Algen CO_2 in der Biomasse fixiert. Dieses CO_2 wird im Entsorgungszentrum Pohlsche Heide in hochkonzentrierter Form bei der Aufbereitung von Biogas zu Erdgas erzeugt und wird derzeit ungenutzt in die Atmosphäre entlassen. Das hier beschriebene FuE-Vorhaben soll die Nutzung dieser CO_2 -Quelle mit einbeziehen.

Auf der Pohlschen Heide kann ein solcher Algenreaktor grundsätzlich an 2 verschiedenen Standorten eingesetzt werden. Die Zielvorgaben unterscheiden sich dabei grundsätzlich.

Zunächst soll die Verwendung von Deponiesickerwasser als Nährstoff weiter untersucht werden. Sickerwasser als Nährstoff impliziert zwangsläufig aufgrund möglicher Verunreinigungen durch Umweltschadstoffe eine Verwendung der Biomasse als Substrat für die Vergärung. Der so produzierte Gärrest wird nach einer Rottezeit auf der Deponie abgelagert. So ist sichergestellt, dass keinerlei Schadstoffe aus der Deponie anschließend in andere Kreisläufe gelangen. Das erzeugte Biogas wird in den auf der Anlage installierten Blockheizkraftwerken als Primärenergie eingesetzt. Das bei der Verbrennung freiwerdende CO_2 wird als Kohlenstoff-Quelle für die Algenproduktion genutzt. Der Algenreaktor wurde deswegen nahe den BHKWs aufgebaut.

Im Rahmen dieser FuE-Stufe wurde der Algenreaktor über zwei Vegetationsperioden betrieben, um die Abbauraten für Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen aus dem Sickerwasser quantitativ zu bewerten und die Abhängigkeit der Biomasseproduktion von den Witterungsbedingungen zu ermitteln. Anschließend soll eine CO_2 -Bilanz erstellt und eine wirtschaftliche Betrachtung durchgeführt werden. Die bisherigen Versuche im Algenreaktor mit dem Deponiesickerwasser (s. Abschlussbericht AZ 28741 der DBU) haben gezeigt, dass sich nur ein begrenztes Algenspektrum im Deponiesickerwasser entwickelt.

Hier setzt das vorliegende Projekt an. Die schon identifizierten Algen sollen im Labor gezüchtet und auf ihre optimalen Lebensbedingungen hin untersucht werden. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen wiederum können auf den technischen Einsatz im Algenreaktor der Pohlschen Heide adaptiert werden. Gleichzeitig wird so ein Verfahren zur Algenbestimmung für den Einsatz in anderen Sickerwässern entwickelt.

Abbildung 1 zeigt schematisch die einzelnen Verfahrensbausteine, wie sie in dem folgenden FuE-Verfahren auf der Pohlschen Heide im Bereich der Mechanisch-Biologischen Aufbereitung realisiert wurden.

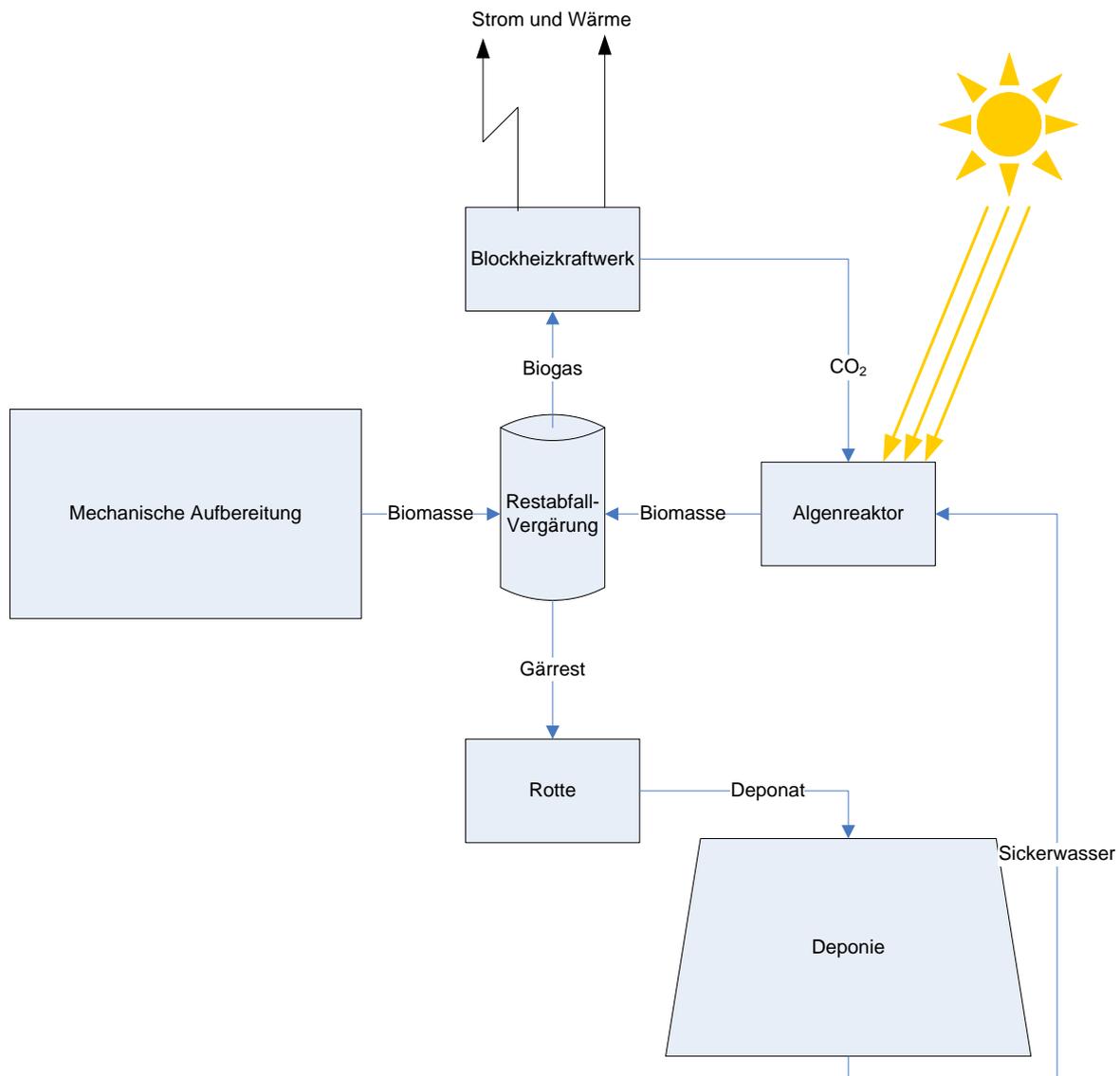


Abbildung 1: Schematischer Aufbau im Bereich der MBA

Ergänzend kann das Verfahren auch mit kurzen Kreislaufwegen am Kompostwerk aufgebaut werden. Das Sickerwasser aus dem Kompostwerk ist herkunftsbedingt nicht mit Schwermetallen oder anderen Stör- und Schadstoffen belastet. Als CO₂-Quelle bietet sich die am Kompostwerk installierte Gasaufbereitung an, bei der technisches CO₂ freigesetzt wird. Im Laborversuch zeigte sich, dass die Behandlung des Sickerwassers aus dem Kompostwerk keine abwassertechnische Herausforderung bietet.

Die folgende Abbildung zeigt die Verfahrensbausteine am Kompostwerk der Pohlschen Heide. Ziel soll hier auch die Produktion von Algenmasse zur energetischen Verwertung sein.

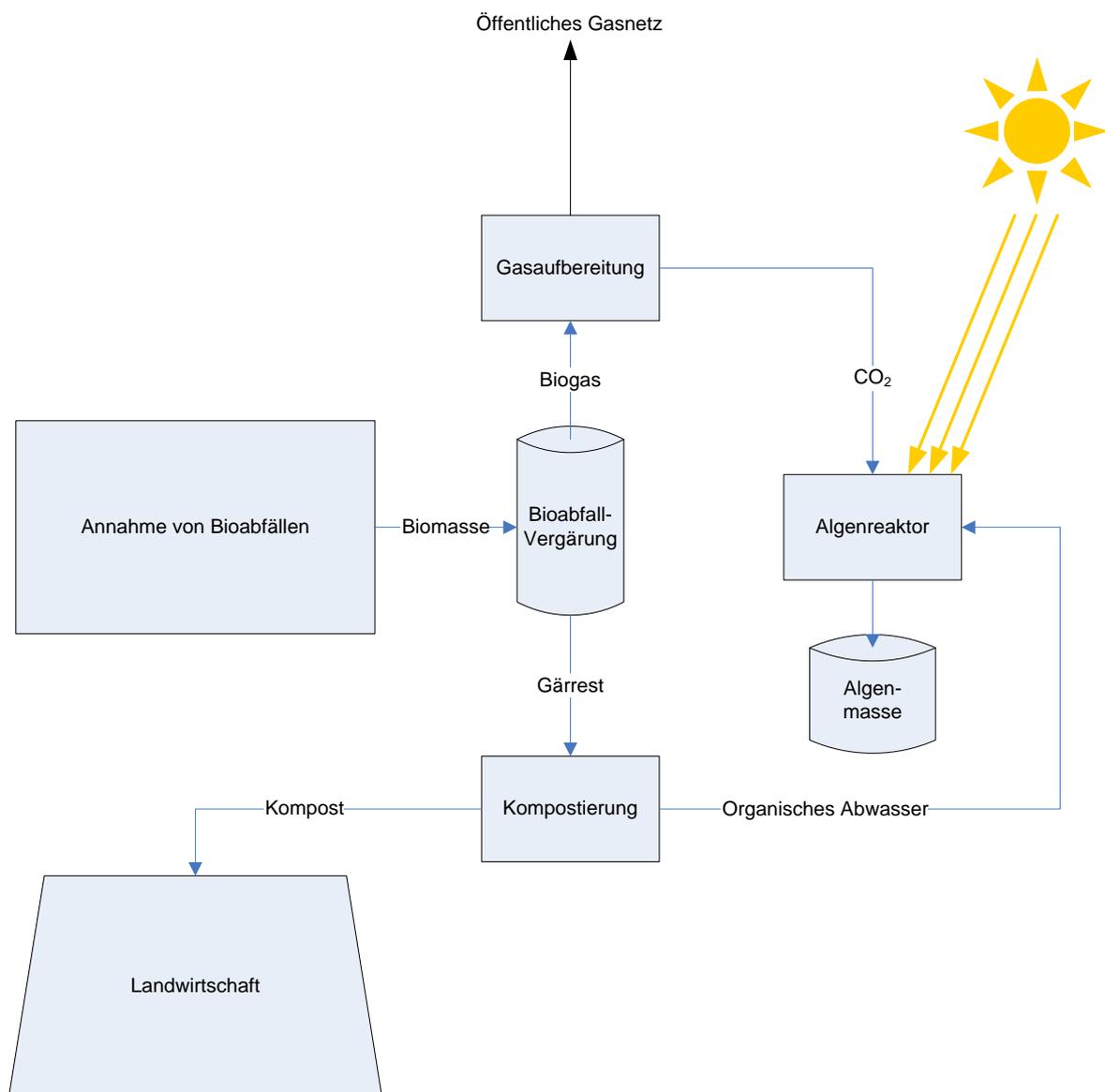


Abbildung 2: Schematischer Aufbau im Bereich des Kompostwerkes

Die beiden Beispiele zeigen ein Potential der Algentechnologie in der Kreislaufwirtschaft.

Die Optimierung der einzelnen Verfahrensschritte für den vorliegenden Anwendungsfall und die Einbeziehung anderer Verfahrenstechniken für den Fall der Abwasserbehandlung als Kreislaufführungskonzept ist neu.

Die Lagerstätten für cadmiumarmes Phosphat sind in naher Zukunft erschöpft. Stickstoffdünger werden nach dem Stand der Technik durch die Ammoniaksynthese nach Haber-Bosch produziert. Hierfür ist ein erheblicher energetischer Aufwand erforderlich. Die bisherigen Versuche auf der Pohlschen Heide zeigen, dass Sickerwasser sowohl als Phosphat- als auch als Stickstoffquelle dienen kann und somit bereits eine Fragestellung der ersten Stufe dieses FuE-Vorhabens beantwortet werden konnte.

Viele Schwermetalle können als Hydroxide gefällt werden und nach Flockung sedimentiert und so aus dem Abwasserstrom entfernt werden. Anstelle einer sulfidischen Fällung können die Restschwermetallgehalte mittels Algen als Sorbens bzw. infolge Inkorporation eliminiert werden. Die Eliminierung von Schadstoffen auf biologische Weise durch Algen wurde in dem Vorprojekt gezeigt (s. Abschlussbericht AZ 28741). In der Kombination von physikalisch-chemischer und biologischer Behandlung können Schwermetalle weitgehend aus der aquatischen Umwelt ferngehalten werden.

Mit der anwendungsreifen Entwicklung solcher Green Technology können verschiedene Operationen der Wasserbehandlung auch in Entwicklungsländern mit den lokal verfügbaren Mitteln angewendet werden. Die erforderliche Behandlung von Prozessabwässern kann mit den gewonnenen Ergebnissen verbessert werden. Bestandteil einer wasserschonenden Technologie ist die Wasserkreislaufführung. Das führt zunächst zu einer Aufkonzentrierung von unerwünschten Stoffen und Salzen. Die Behandlung des aus dem Prozess ausgeschleusten Wassers mit biologischen Methoden wird in der Regel nicht angewendet. Erhöhte Salzkonzentrationen hemmen die Degradation von organischen Belastungen. Mit angepassten Algentypen kann der biologische Abbau selbst bei erhöhten Salzkonzentrationen erfolgen.

Die Einsatzfähigkeit von Technologien und Anlagen in Entwicklungs- und Schwellenländern hängt hauptsächlich davon ab, ob es gelingt, ein robustes Gesamtsystem ohne komplizierten Regelungsaufwand zu entwickeln. Ein biologisches Verfahren als selbstregulierendes System.

1.2. Die Projektpartner

Das Entsorgungszentrum Pohlsche Heide liegt im nördlichsten Teil Nordrhein-Westfalens im Kreis Minden-Lübbecke. Hier werden die Abfälle der Bürger und Gewerbeabfälle der regionalen Industrie aufbereitet. Insgesamt werden auf der Pohlschen Heide ca. 100.000 t

Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall als auch ca. 40.000 t Bioabfall und 10.000 t Grünabfall pro Jahr aus der Region angeliefert und verarbeitet. Der Eigentümer der Pohlschen Heide, der Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke (AML) hat bis zum 31.12.2016 die GVoA mit dem Betrieb des Entsorgungszentrums beauftragt. Im Zuge der Rekommunalisierung nimmt ab 01.01.2017 die kreiseigene KAVG diese Aufgabe wahr. Die GVoA ist in die GVA mbH mit Sitz am Kompostwerk des Entsorgungszentrums überführt worden. Die GVA hat damit die Betreuung des Algenprojektes AZ 32197 übernommen

Die GVoA mbH & Co. KG war ein private-public-partnership-Unternehmen mit den Eigentümern LOGA Logistik und Abfallverwertungs GmbH & Co. KG (36,5 %) und dem Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke (AML, 63,5 %). Diese Gesellschaftsverhältnisse bestehen auch bei GVA mbH

Der Auftrag der GVA beinhaltet die Optimierung und die Weiterentwicklung der eingesetzten Technologien im Entsorgungszentrum Pohlsche Heide und damit auch die Fortsetzung des Algenprojektes. Letztendlich stellt das Entsorgungszentrum Pohlsche Heide eine der modernsten Recyclinganlagen Deutschlands dar und ist aus diesem Grund weit über die Kreis- und Landesgrenzen hinaus bekannt.

Das Entsorgungszentrum beinhaltet folgende Anlagenteile:

1. Eine Deponie der Klasse 2, auf der bis zum Jahr 2005 unbehandelter Hausmüll abgelagert wurde (Altbereich) und seit 2005 gemäß Technischer Anleitung Siedlungsabfall (TASI) behandelter Abfall abgelagert wird, der keine biologische Aktivität mehr aufweisen darf (neuer Deponiebereich). Das im Altbereich der Deponie entstehende Deponiegas wird in 2 Blockheizkraftwerken als Treibstoff zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt.
2. Eine mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage (MBA) mit den Anlagenteilen Sortierung, Biogasanlage und Rotte, in der seit 2005 bis zu 100.000 t Siedlungsabfälle pro Jahr verarbeitet werden. Die Gärrückstände aus der Biogasanlage werden in der Rotte nachbehandelt und anschließend auf der Deponie abgelagert.
3. Ein Kompostwerk für die Behandlung von Bioabfällen mit den Anlagenteilen Biogasanlage und Rotte mit einer Jahreskapazität von bis zu 50.000 t. Der Biogasanlage nachgeschaltet ist eine Gasaufbereitung, in der das erzeugte Biogas auf Erdgasqualität (Biometan) gereinigt wird. Das so erzeugte Biomethan wird in das öffentliche Gasnetz eingespeist.

Aufgrund des großen Anlagenspektrums, das auf der Pohlschen Heide auf engem Raum vereint ist, bietet das Entsorgungszentrum eine hervorragende Plattform für die Vorstellung moderner Recyclingtechnik, die sowohl von der Industrie als auch von Universitäten gern genutzt wird. Letztendlich sind so enge Kooperationen zwischen dem Betreiber des Entsorgungszentrums und den an diesem Projekt beteiligten Kooperationspartnern entstanden.

Im Entsorgungszentrum PoH fallen verschiedene Abwässer, wie Deponiesickerwasser, Abwässer aus der Vergärung und der Kompostierung sowie Oberflächenabwässer mit unterschiedlichen Belastungen an, die alle gesammelt und letztendlich im Klärwerk des AML gereinigt werden müssen. Hierzu werden diese Abwässer alle vereinigt, aber es ist ohne weiteres möglich, diese Abwässer aus den unterschiedlichsten Quellen separat zu analysieren und sie auf ihre Fähigkeit zum Ersatz von Nährmedium für Algen zu untersuchen.



Abbildung 3: Das Entsorgungszentrum Pohlische Heide

Alle Abwässer werden durch ihre hohe Belastung mit Organik und Stickstoff charakterisiert. Sie beinhalten einen geringen Anteil an Schwermetallen. Trotz dieser für biologische Prozesse schwierigen Abwassermatrix konnte hier ein Biomassewachstum stabil erreicht werden.

Aber auch im Falle einer hohen Schwermetall-Kontamination des Sickerwassers bietet sich die Pohlische Heide für solche Untersuchungen an. Die aus den Algen erzeugte Biomasse wird in der Biogasanlage der mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage (MBA) direkt vergoren und die Gärrückstände nach der Rotte (aerobe Behandlung) deponiert. Im Falle einer Assimilation von Schwermetallen oder anderen problematischen Stoffen in der Biomasse würden diese anschließend im Gärrückstand auftreten und somit wieder auf der Deponie umweltunschädlich eingebaut werden. Eine Verschleppung dieser Schadstoffe in die Umwelt ist so ausgeschlossen. Die Deponie wirkt hier als Schadstoffsenke.

Ein weiterer Vorteil des Standortes Pohlsche Heide ist die Verfügbarkeit von CO₂. Algen wandeln CO₂ im Rahmen der Photosynthese wesentlich effektiver als Landpflanzen in Sauerstoff und Biomasse um. Auf der Pohlschen Heide stehen zwei CO₂-Quellen grundsätzlich zur Verfügung. Zum einen kann man Abgase aus 2 Blockheizkraftwerken nutzen. Zum anderen wird am Kompostwerk CO₂ in technischer Qualität bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan (Erdgasqualität) erzeugt, das zurzeit nicht weiter genutzt wird.

Zudem bietet die Pohlsche Heide ausreichend Platz, um ggf. Anlagen im Industriemaßstab zu installieren. Auch aus genehmigungsrechtlicher Sicht ist die Beantragung und Durchführung des in Rede stehenden Verfahrens im Entsorgungszentrum Pohlsche Heide möglich. Entsprechende Genehmigungsgrundlagen und Voraussetzungen liegen vor.

Die Pohlsche Heide wird auf der Homepage www.pohlsche-heide.de präsentiert. Die GVA ist über die homepage www.gva-hille.de erreichbar.

GVoA (bis 31.12.2016)

Gesellschaft zur Verwertung organischer Abfälle mbH & Co. KG
Pohlsche Heide 1, 32479 Hille

Kreisabfallverwertungsgesellschaft des Kreises Minden-Lübbecke mbH (KAVG)

Portastraße 9, 32423 Minden
Geschäftsführer: Stefan Pöschel
Tel: 0571 64 56 62 11
e-mail: stefan.poeschel@KAVG-ML.de

Gesellschaft zur Verwertung von Abfällen im Kreis Minden-Lübbecke mbH (GVA)

Am Kompostwerk 2, 32479 Hille
Geschäftsführung: Elke Meyerbröker
Tel.: 05703 99990-13
e-mail: meyerbroeker@gva-hille.de

Projektleitung: Bernd Büscher
Tel.: 05703 99990-11
e-mail: buescher@gva-hille.de

Neben der FH Bielefeld, Campus Minden und der marine Mikrobiologin Dr. Nadine Winkelmann wirkt auch der Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke (AML) an dem Forschungsprojekt mit.

FH Bielefeld, University of Applied Sciences, Campus Minden

Die Fachhochschule Bielefeld ist eine öffentliche Hochschule des Landes Nordrhein-

Westfalen. Der Bereich Siedlungswasserwirtschaft ist Teil des Campus Minden in der Mindener Artilleriestraße 9. Das Labor für Wasserwirtschaft, Abfalltechnik und Umweltanalytik ist mit einem Chemieingenieur als Leiter des Labors besetzt. Für Projektaufträge werden zeitweise Mitarbeiter eingestellt, die oft aus eigenen Absolventen rekrutiert werden.

Die Laboreinrichtung ist geeignet und erprobt für alle Untersuchungen und Analysen für Abwasser. Die Laborausrüstung lässt vielfältige Untersuchungen zu. Die FH Bielefeld arbeitet u.a. mit dem Labor der AML zusammen.

Das Projekt wird von Seiten der FH Bielefeld, Campus Minden von Prof. Dr.-Ing. Johannes Weinig geleitet, der in verschiedenen Projekten auf diesem Feld gearbeitet hat. Die Liste der Projekte kann auf der Homepage der FH Bielefeld <https://www.fh-bielefeld.de/minden/ueber-uns/personenverzeichnis/johannes-weinig> eingesehen werden.

FH Bielefeld, University of Applied Sciences, Campus Minden
Artilleriestraße 9, 32427 Minden

Leitung: Prof. Dr.-Ing. **Johannes Weinig**
Tel.: 0571 8385-195
Email: johannes.weinig@fh-bielefeld.de

Dipl.-Ing. **Michael Koltermann**, Labor der FH Bielefeld, Campus Minden

Alevtina Kurz, BA Eng. Mitarbeiterin FH Bielefeld

Dr. rer. nat. **Nadine Winkelmann**, marine Mikrobiologin. Forschung und Lehre zusammen mit der FH Bielefeld, Campus Minden
Tel. 05775/ 9667686
Email: nadine.winkelmann@gmail.com;

Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke (AML)

Der Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke - AML - ist seit 1989 mit Aufgaben des öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger für die Verwertung und Beseitigung betraut. Der AML verfügt über ein sehr gut ausgestattetes Labor, das für weiterführende Untersuchungen zur Verfügung stand.

Abfallentsorgungsbetrieb des Kreises Minden-Lübbecke (AML)
Johansenstraße 6, 32423 Minden

Leiterin Labor: **Dipl. Biologin Doris Rohde**
Tel.: 0571 50929-226
Email: doris.rohde@aml-minden.de;

2. Einleitung

Im Entsorgungszentrum „Pohlsche Heide“ wird der gesamte im Kreis Minden- Lübbecke anfallende hausmüllähnliche Gewerbeabfall, der Abfall aus der Biotonne sowie der klassische Hausmüll aus der grauen Tonne verarbeitet. Die zu dem Entsorgungszentrum zählende Deponie der Klasse DK2 ist für die Ablagerung von leicht bis mittel-belasteten Abfällen ausgelegt, welche mit den örtlichen Sammelfahrzeugen angeliefert werden. Bis 2005 wurden alle Abfälle ohne Vorbehandlung auf der Deponie abgelagert, wodurch immer noch ein Bereich des Deponiekörpers biologisch aktiv ist und Deponiegas freigesetzt wird. In einer Gasfassungsanlage wird dieses Deponiegas gesammelt und 2 Blockheizkraftwerken als Treibstoff zur Strom- und Wärmegewinnung genutzt. Heutzutage wird der organische Abfall in einer Mechanisch-Biologischen-Abfallbehandlung vorbehandelt und der verbleibende Rest (das Deponat) auf der Deponie abgelagert.

Aktuell ist nur der Altbereich der Deponie mit einer Oberflächenabdichtung und einer Rekultivierungsschicht versehen. Regenwasser kann in den nicht abgedeckten Deponiekörper (neuer Bereich) eindringen und beim Durchlaufen Mineralstoffe, Abbauprodukte und Schadstoffe des Abfalls ausspülen. Das anfallende Deponiesickerwasser wird über ein Sickerwasser-Drainage-System gesammelt, mit anderen hochbelasteten Abwässern (z.B. aus dem Kompostwerk etc...) vereinigt und über eine Druckwasserleitung der Sickerwasserbehandlungsanlage Heisterholz zugeführt. Das Klärwerk Heisterholz ist für die Reinigung von hochbelastetem Abwasser ausgelegt, dementsprechend aufwendig und damit kostenintensiv ist die Reinigung. Das gereinigte Wasser wird in den Vorfluter, in diesem Fall die Weser, eingeleitet.

Mit dem Ziel Green Technology zu entwickeln und anzuwenden wurde verschiedentlich überprüft, ob sich Wässer mit höheren Konzentrationen an Stör- und Schadstoffen für eine biologische Behandlung eignen. Algen können analog zu Schilf bei der kommunalen Abwasserbehandlung als Biomasse genutzt werden, um unerwünschte Stoffe aus dem Wasser zu eliminieren. Mikroalgen sollen das anfallende Sickerwasser als Nährmedium nutzen, es gleichzeitig reinigen und somit die Belastung des Wassers senken, damit es ohne kostenintensive Reinigung in die öffentliche Kanalisation eingeleitet werden kann. Zudem können die Algen als Biomasse energetisch verwertet werden.

Die Biotechnologie wird seit einigen Jahrzehnten gezielt genutzt, um Wasser- und Abluftströme zu behandeln und unerwünschte Stoffe durch Sorption oder Inkorporation in die Biomasse zu eliminieren. Zu diesem Zweck eignen sich auch Algen wegen ihres hohen Flächenertrags von 50 bis 60 t pro Jahr (Soeder, 1992 – zit n. Richert 2002) gegenüber konventionellen Nahrungspflanzen mit deutlich geringeren Hektarerträgen.

Richert und Stelling (2002) haben mit ihrem Konzept der solaren Biokonversion Deponiesickerwässer behandelt und die Einflussfaktoren Nährstoffangebot, Lichtverfügbarkeit, Temperatur und Umwälzung untersucht (Richert 2002). Die Ergebnisse in diesem Vorhaben sind uneinheitlich.

In einem Forschungsprojekt der GVoA/GVA und der FH Bielefeld am Campus Minden werden die Bedingungen für eine Abwasserbehandlung mit einer Matrix aus Stör- und Schadstoffen in teilweise hohen Konzentrationen untersucht für eine großtechnische Anwendung bei Deponiesickerwässern.

2.1. Algen

Der Begriff „Alge“ bezeichnet eine Lebensform und damit Organismen, die permanente, oxygene Photosynthese betreiben. Zu ihnen zählen sowohl Prokaryoten (Blualgen) als auch Eukaryoten (Linne von Berg, 2004).

Lange Zeit wurden Algen den Protisten zugeordnet, welche sich als einzellige Eukaryoten definieren und den Pflanzen, Tieren und Pilzen gegenüberstehen. Die Definition der Protisten ist jedoch zu ungenau, da sich viele mehrzellige Organismen aus einzelligen entwickelten, wodurch eine Verwandtschaft gegeben ist (Görtz, 2012). Somit werden die Algen heutzutage den Pflanzen zugeordnet. Der Begriff „Alge“ ist in der Biologie ein Sammelbegriff und beschreibt zwei Algengruppen. Die sogenannten Makroalgen sind mit dem Auge zu erkennen. Sie sind teilweise nur wenige Millimeter, manchmal jedoch auch mehrere Meter (bis zu 60 Meter) lang. Makroalgen leben, bis auf einige Ausnahmen, im Salzwasser. Sogenannte Mikroalgen sind hingegen erst unter dem Mikroskop zu erkennen und in den meisten Fällen einzellig. Neben dem einzelligen Vorkommen ist eine Koloniebildung ebenso wie ein fadenförmiges Erscheinungsbild möglich (Round, 1973).

Die Lebensräume von Algen sind sehr unterschiedlich. Zwar befindet sich ein Großteil in den Meeren und Süßwassergebieten der Erde, jedoch sind auch einige Arten als Luftalgen, Bodenalgen oder Schneetalgen bekannt. Luftalgen siedeln sich in höheren Lagen, zum Beispiel auf Felsen oder an Baumstämmen an, wohingegen Bodenalgen auf dem Boden zu finden sind. Beide Lebensumgebungen müssen eine ausreichende Feuchte, zum Beispiel eine hohe Luftfeuchtigkeit, aufweisen, um den Algen gute Lebensbedingungen zu bieten. Schneetalgen befinden sich auf dem Eis und sind oft einzellig. Jedoch muss die Eisoberfläche über einen gewissen Zeitraum konstante Bedingungen aufweisen, damit sich Algen ansiedeln können (Round, 1973).

Unabhängig vom Lebensraum sind sämtliche Algenarten auf ausreichend Licht und ein gutes Nährstoffangebot angewiesen. Die Hauptelemente Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Calcium (Ca) sind essenziell, ebenso Spurenelemente, beispielsweise Eisen (Fe), Mangan (Mn) oder Zink (Zn) (Round, 1973). Limitierender Faktor für das Algenwachstum ist ein ausgeglichenes Nährstoffverhältnis (Probst, 2007).

Mikroalgen werden auch nach ihrer Beweglichkeit unterschieden. Einige Zellen können sich fortbewegen, andere haften an Gegenständen an oder schweben frei. Eine Art Kriechbe-

wegung (amöboid) beweglicher Algen ist ebenso üblich wie die Fortbewegung mittels Geißel. Auch unbewegliche Algenarten sind beschrieben (Linne von Berg, 2004).

Die meisten Algen betreiben Photosynthese, jedoch kommt es gerade bei den Mikroalgen vor, dass diese ihre benötigte Energie heterotroph beziehen, das bedeutet, dass sie organische Verbindungen als Energiequelle nutzen können. Betreiben die Zellen Photosynthese, sind Chloroplasten vorhanden.

Das Algenwachstum einer Kultur ist in mehrere Abschnitte zu gliedern. Zunächst bleibt die Zellenanzahl konstant oder kann sogar etwas abfallen (Latenz Phase, lag). Daran anschließend beginnt ein exponentielles Wachstum (Exponentielle Phase, log), dem wiederum eine Stagnation (Stationäre Phase) bis hin zum Absterben (Absterbephase) folgt (Chmiel, 2011). In günstigen Milieubedingungen verlängert sich die die Wachstumsphase.

Diese Arbeit befasst sich mit den Algenarten *Chlorella vulgaris* und *Euglena gracilis*, die im Folgenden beschrieben werden.

2.2. *Chlorella vulgaris*

Die *Chlorella vulgaris* gehört zu Abteilung der Chlorophyta, den sogenannten Grünalgen. Chlorophyta lassen sich dadurch charakterisieren, dass sie mindestens zwei Geißeln besitzen (sonst Vielfaches von zwei), die sich in der Länge unterscheiden können. Der Schutz der Chloroplasten entsteht durch eine doppelte Chloroplastenhülle und das grüne Chlorophyll kommt als Chlorophyll a und b vor. Ebenso gibt es charakteristische Pigmentzusammensetzungen und eine bestimmte Zusammensetzung der Chloroplasten (vgl. C. van den Hoek et al., 1993, S. 229). Die Einteilung der Chlorophyta erfolgt über Klassen und Ordnungen. Die *Chlorella vulgaris* gehört zu der Klasse der Chlorophyceae und der Ordnung Chlorococcales, Gattung Chlorella (vgl. C. van den Hoek et al., 1993, S. 265, S. 284). Die zu dieser Gattung gehörenden Algen sind zwischen zwei und zwölf μm groß, haben eine runde oder elliptische Form und sind als Bodenalgen oder in limnischen Systemen beheimatet. Bekannt sind außerdem Arten in der Größe von ein bis zwei μm in marinem Phytoplankton (vgl. C. van den Hoek et al., 1993, S. 284). Die *Chlorella vulgaris* ist eine einzellige Alge, die sich asexuell durch Mitose fortpflanzt (vgl. F. E. Round, 1974, S. 25).

2.3. *Euglena gracilis*

Die *Euglena gracilis* ist aus der Abteilung der Euglenophyta, welche aus der Klasse der Euglenophyceae (Geißelalgen) besteht (vgl. C. van den Hoek et al., 1993, S. 217; F. W. Stöckel & G. Dietrich, 1986, S. 17). Euglenophyta sind meist einzellige Flagellaten, bei denen häufig zwei Geißeln vorhanden sind, welche zur Fortbewegung dienen. Bei den Arten mit Chloroplasten treten Chlorophyll a und b auf. Charakteristisch sind ein orange-roter Augenfleck sowie die langgestreckte Form (vgl. C. van den Hoek et al., 1993, S.217).

Euglena gracilis ist nicht klar den Tieren oder Pflanzen zuzuordnen. Unter Lichteinwirkung wird sie grün und ernährt sie sich photoautotroph. Sie wäre demnach als Pflanze zu charakterisieren. Bei Dunkelheit ist eine heterotrophe Ernährung durch organische Nährstoffe möglich. Die Farbgebung bleibt aus, wodurch eine Zuordnung zu den Tieren erfolgen würde (vgl. U. Lüttge & M. Kluge, 2012, S. 265).

Es ist keine feste Zellwand vorhanden, die Bewegung erfolgt über Geißeln und durch amöboide Bewegungen (vgl. U. Lüttge & M. Kluge, 2012, S.265). Die Bewegungen sind sehr schnell und durch Formwechsel charakterisiert. Die Fortpflanzung von *Euglena gracilis* erfolgt ungeschlechtlich über Mitose, in Form einer Längsteilung der Zelle, welche am vorderen Zellpol beginnt (vgl. C. van den Hoek et al., 1993, S. 226).

2.4. Physiologie der untersuchten Algen

Die untersuchten Algenarten *Chlorella vulgaris* und *Euglena gracilis* leben im Wasser und nutzen hauptsächlich Photosynthese zur Energieerzeugung. Bei einem pH-Wert zwischen sieben und acht können sich Algen optimal fortpflanzen. Damit ein Überleben der Arten möglich ist, sind Wasserinhaltsstoffe entscheidend, die Wachstumsprozesse begünstigen. Der Lebensraum Wasser wird dazu als eine verdünnte Nährstofflösung angesehen, dessen Zusammensetzung Auswirkungen auf die Arten und Populationsgrößen besitzt (vgl. J. Schwoerbel & H. Brendelberger, 2005, S. 132). Auch Licht kann einen Einfluss darauf haben, welche Menge eines Nährstoffes aufgenommen wird. Die benötigten Nährstoffe sind abhängig von der Alge (vgl. F.E. Round, 1974, S. 189 ff.). Es gibt notwendige Nährstoffe, die auch bei höheren Konzentrationen keine schädliche Wirkung auf Algen besitzen, andere sind hingegen essentiell und vermindern die Vermehrung, wenn sie zu konzentriert auftreten (vgl. J. Schwoerbel & H. Brendelberger, 2005, S. 133, S. 136). Zudem weist Round (1974, S. 191) darauf hin, dass „gewisse Grundstoffe [...] von anderen ersetzt werden [können]“. Allgemein ist die Stoffaufnahme mit der Michaelis-Menten-Kinetik zu beschreiben. Bis zu einer gewissen Konzentration kann ein Stoff aufgenommen werden, ab einer bestimmten Konzentration ist ein Sättigungswert erreicht und der Stoff wird nicht weiter aufgenommen (vgl. J. Schwoerbel & H. Brendelberger, 2005, S. 133). Allgemein wird zwischen dem absoluten Bedarf und dem normalen Bedarf unterschieden, da Nährstoffbegrenzungen auf den absoluten Bedarf, in Hinblick auf die Photosyntheseleistung oder Wachstumsprozesse, massive Auswirkungen besitzt (vgl. F.E. Round, 1974, S. 192).

Neben gelösten Ionen, die im Folgenden näher beschrieben werden, können auch im Wasser vorhandene organische Verbindungen als Nährstoffquelle für Algen dienen. Das Wachstum erfolgt dann unabhängig vom Licht. Algen, die diese Fähigkeit besitzen, nennt man fakultativ chemoorganotrophe Algen, Beispiele für solche Arten lassen sich in den Gruppen *Scenedesmus*, *Chlorella* und *Euglena* finden (vgl. F. E. Round, 1974, S.193).

2.5. Photosynthese und ihre limitierenden Faktoren

Der zentrale Stoffwechselfvorgang der Erde ist die Photosynthese. Sie schafft die Voraussetzung für alles Leben auf unserem Planeten. Aus den energiearmen, anorganischen Stoffen Kohlenstoffdioxid und Wasser bauen die Pflanzen und die Algen die energiereiche, organische Verbindung Glucose und setzen bei diesem Prozess molekularen Sauerstoff frei. Als Energiequelle für diese endergonische Reaktion dient das Sonnenlicht. Bei der Photosynthese wird Strahlungsenergie in chemische Energie umgewandelt. Somit verstehen wir unter Photosynthese den komplexen Prozess, mit dessen Hilfe chlorophyllhaltige pflanzliche Organismen organische Substanz im Licht bilden.

Die Bruttogleichung der Photosynthese lautet:



Die Außenfaktoren, wie Licht, Wasser, Kohlenstoffdioxid und Temperatur, bestimmen maßgebend die Photosynthese. Dabei gilt das Gesetz des Minimums. Der Faktor, der am weitesten von seinem Optimum entfernt ist, bewirkt den Grad der Photosyntheseleistung. Wenn somit eine Pflanze optimal belichtet wird und ihr genügend Wasser zur Verfügung steht, aber kein Kohlenstoffdioxid, dann stellt die Pflanze ihr Wachstum ein und verkümmert (Richter, 1988). Die grünen Chlorophylle sind die zentralen, photosynthetisch wirksamen Pigmente. Chlorophyll a ist bei allen eukaryotischen Algen Hauptbestandteil der photosynthetischen Reaktionszentren und maßgebend an der Sammlung und der Weiterleitung der Lichtenergie an diese Zentren beteiligt. Chlorophyll b fungiert als Antennenpigment. Carotinoide sind bei vielen Algen Bestandteil der Antennenpigmentsysteme und dienen als Schutz vor überschüssiger Strahlung. Für die effektive Ausnutzung der Strahlung sind die Carotinoide bei den Algen wesentlich bedeutsamer als bei den höheren Pflanzen. Pflanzen und Algen bauen Nährstoffe, wie beispielsweise Glucose, durch Assimilation ab, sodass stets CO_2 frei wird. Dieses CO_2 kann entweder direkt in der Photosynthese wiederverwendet oder an die Umgebung abgegeben werden (Kohl, 1988).

2.5.1. Licht

Die photosynthetische Sauerstoffproduktion bei Algen ist nur bei Einstrahlung bestimmter Qualitäten von Licht nachweisbar (Richter, 1988). Die absorbierbare und damit photosynthetisch wirksame Strahlung ist mit dem sichtbaren Licht von 380-750 nm identisch (Kohl, 1988) und macht circa 0,46-0,48 % der gesamten Strahlungsenergie aus. Bei einer geringen Lichtintensität überwiegt die CO_2 -Abgabe durch Atmung der photosynthetischen Aufnahme des Kohlenstoffdioxids. Der Lichtkompensationspunkt

charakterisiert die Lichtintensität, bei der die Abgabe und die Aufnahme von CO₂ einander entsprechen. Die Photosyntheseleistung steigt danach proportional zur Lichtintensität. Die Lichtsättigung ist erreicht, wenn keine weitere Erhöhung der Photosyntheseleistung stattfindet. Allerdings kann der Photosyntheseapparat bei zu hohen Beleuchtungsstärken geschädigt werden, die Leistung sinkt dann ab (Schwoerbel, 2005).

2.5.2. Temperatur und Wasser

Die Photosynthese zeigt eine typische Temperaturabhängigkeit. Wird in einem Diagramm die Photosyntheseleistung gegen die Temperatur aufgetragen, so ergibt sich für jede einzelne Pflanzenart und dem jeweiligen Standort eine eigene Optimumkurve. Eine strenge Temperaturabhängigkeit ist nur dort nachweisbar, wo enzymatische Reaktionen bestimmend sind. Wirken allerdings photochemische Reaktionen limitierend, wie die Einwirkung von Schwachlicht, so ist der Einfluss der Temperatur gering (Richter, 1988).

Der Verbrauch an Wasser ist bei der Photosynthese relativ gering, wenn die vorhandene Gesamtmenge der an der Photosynthese beteiligten Stoffe betrachtet wird (Richter, 1988).

2.5.3. Kohlendioxid

Der CO₂-Gehalt in der Luft beträgt circa 0,038 Vol.-%. Der optimale Wert für eine Photosyntheseleistung von nahezu 100 % liegt bei 0,1Vol.-%. Bei sonst idealen Bedingungen lässt sich die Photosyntheseleistung daher durch künstliche Begasung mit Kohlenstoffdioxid beträchtlich steigern. Allerdings wirken höhere Konzentrationen schädigend auf den Organismus.

Kohlenstoffdioxid ist mengenmäßig die wichtigste Ressource für die Biomassenbildung der Algen. Im Wasser liegt Kohlenstoff als gelöstes Kohlendioxid, Kohlensäure, Hydrogencarbonat oder Carbonat vor (Kohl, 1988). Wird der Kohlendioxidanteil neutralisiert, stellt die Alge das Wachstum ein (Richter, 1988).

3. Material & Methoden

Die Versuche in diesem Projekt erfolgten über einen längeren Zeitraum mit verschiedenen durchführenden Personen. Die Methoden und zur Verfügung stehenden Materialien waren aber gleichbleibend. Deshalb werdend die Methoden kurz beschrieben. Die verwendeten Algenkulturen wurden bereits in der Einleitung beschrieben. Die Medien und Kultivierungsbedingungen werden ebenfalls hier beschrieben.

3.1. Organismen und Wachstumsmedien

Die beiden verwendeten Algenkulturen wurden entsprechend der Empfehlungen der SAG zunächst in Reinkultur kultiviert. Da aber beide Algenarten für Freilandversuche mit Sickerwasser vorgesehen waren, wurden einfachere Medien erprobt und weiter vereinfacht.

Die Hauptspezies zur Untersuchung waren *Chlorella vulgaris* SAG 211-11b (abgekürzt Cv) und *Euglena gracilis* SAG 1224-5/25 (abgekürzt Eg). Des Weiteren wurde noch eine Algenmischung der Firma LimnoSun (Hille) im Vergleich getestet und eine natürlich in der Ringdrainage/Algenrinne gewachsene Mischkultur verwendet. Es wurden auch künstliche Mischungen aus Cv und Eg hergestellt und die symbiontischen Effekte unter verschiedenen Bedingungen untersucht. Ziel war im Labor eine Erhöhung des Zellwachstums, während der Fokus in der Algenrinne auf der Biomasseproduktion einhergehend mit einer Reinigungsleistung lag.

Chlorella vulgaris wurde einem Medium angelehnt an das empfohlene SAG Medium ESP Ag kultiviert. Die Medienzusammensetzung weicht insofern ab, dass die komplexe Lösung von Mikronährstoffen sowie die Vielzahl der einzelnen Komponenten der Zielsetzung von einer einfachen Kultivierung in verdünntem Sickerwasser gegensätzlich waren. Die genaue Einhaltung der empfohlenen Medienzusammensetzung wurde zur Stammhaltung einmal durchgeführt. Danach wurde ein vereinfachtes Medium mit 2 ml 50x Bold's Basal Medium und 98 ml destilliertem Wasser verwendet. Die Animpfkonzentration lag je nach Dichte der Ursprungskultur bei 2 bis 20 %.

Euglena gracilis wurde ebenfalls in einem an die SAG Kultursammlung angelehnten Medium vorkultiviert. Da sich die parallel getesteten Medien aber gleich gut präsentierten, wurde das Medium auf eine sehr einfache Variante umgestellt. Da in Vorversuchen Eg Kulturen sehr schnell kontaminiert wurden, wurde als sterile Basis Volvic naturell Wasser (Danone Waters Deutschland GmbH) und seine natürliche Mineralienzusammensetzung genutzt und 4 % Bodenlösung zugefügt. Die Bodenlösung wurde aus 100 g unbehandelter Erde in 200 ml destilliertem Wasser (zweifach autoklaviert innerhalb von 24 h) hergestellt und vorsichtig dekantiert um eine zu hohe Aufwirbelung der festen und trübenden Bestandteile zu vermeiden. Als zusätzliche Kohlenstoffquelle wurden autoklavierte Glucoselösung (20 %

mit einer Endkonzentration von 0,4 % im Medium) sowie in einigen Vorversuchen auch Apfelschorle der

Marke Auburg-Quelle (Friedrich Lütvogt GmbH & Co. KG) mit einer Endkonzentration von 4% (entspricht 0,24 % Glucose) verwendet. In Tabelle 1 und 2 sind die Zusammensetzung der Lösungen dargestellt.

Tabelle 1: Zusammensetzung BoldBasalMedium von Sigma Aldrich (B5282)

Bestandteil	BBM (mg/L)
Boric acid	11.42
Calcium chloride dihydrate	25.0
Cobalt nitrate • 6H ₂ O	0.49
Cupric sulfate • 5H ₂ O	1.57
EDTA (free acid)	50.0
Ferrous sulfate • 7H ₂ O	4.98
Magnesium sulfate • 7H ₂ O	75.0
Manganese chloride • 4H ₂ O	1.44
Molybdenum trioxide	0.71
Nickel chloride • 6H ₂ O	0.003
Potassium hydroxide	31.0
Potassium iodide	0.003
Potassium phosphate monobasic	175.0
Potassium phosphate dibasic	75.0
Sodium chloride	25.0
Sodium nitrate	250.0
Sodium selenite	0.002
Stannic chloride	0.001
Vanadium sulfate • 3H ₂ O	0.0022
Zinc sulfate • 7H ₂ O	8.82

Bold Modified Basal Freshwater Nutrient Solution, 50x konzentriert

Tabelle 2: Zusammensetzung Volvic naturell (Analyseauszug von SGS Institut Fresenius)

Bestandteil	mg/L
Calcium	12,0
Magnesium	8,0
Natrium	12,0
Kalium	6,0
Chlorid	15,0
Silizium	32,0
Sulfat	9,0
Hydrogencarbonat	74,0
pH-Wert	7
Gesamtinhalt der Mineralien	130

Ziel der Versuchsreihe war eine ausreichend hohe Algendichte, die dann als Kultur an verschiedene Sickerwasserkonzentrationen adaptiert werden konnte. Zudem muss das Vormedium wirtschaftlich sinnvoll sein, da ein aufwendiges Medium mit vielen Komponenten in keinem Verhältnis zum Nutzen dieses Projektes steht. Die endgültige Verwendung der adaptierten Kulturen erfolgte in der Algenrinne unter einfachsten Bedingungen. Ein steriles Wachstum war spätestens ab diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich. In den Laborversuchen wurden jedoch alle Bemühungen unternommen, die Kulturen so lange wie möglich steril zu kultivieren. Allerdings zeigte der Eintrag von nicht autoklavierten Sickerwasser häufig eine Kontamination mit einer Vielzahl von Mikroorganismen.

3.2. Bestimmung der Zellzahl

Im Rahmen der verschiedenen Versuche wurden die Kulturen mikroskopiert und die Zellzahl in Relation mit der optischen Dichte der Zellsuspension zum gleichen Zeitpunkt gesetzt. Die Untersuchungen wurden wie folgend beschrieben durchgeführt. Um zu einem späteren Zeitpunkt auf eine einzige Methode zur Auswertung zurückgreifen zu können, müssen die Probenzeitpunkte für beide Techniken gleich sein, damit kein weiteres Wachstum in der Zwischenzeit das Ergebnis verfälscht.

3.2.1. Bürker-Zählkammer

Für diese Versuchsreihen wurde eine Zellokammer benötigt, die ein definiertes Volumen der Algenkultur (Zellsuspension) unter dem Mikroskop auszählen lässt. Die Raster mit einer definierten Größe und Tiefe ermöglichen nach dem Auszählen eine Hochrechnung auf vermutliche Zellzahl pro ml Kultur. Die Bürker-Zählkammer wurde gewählt, weil sie unter anderem auch zum Auszählen von Blutzellen verwendet wird, die eine ähnliche Größe zu unseren Algen aufweisen. Die gewöhnlichen Zellokammern für Mikroorganismen wie Neubauer-Zellokammer und Thoma-Zellokammer weisen eine geringere Tiefe auf, weshalb in besonderer Hinsicht auf die großen Zellen von *Euglena gracilis* die Zellokammer nach Bürker gewählt wurde. In Abbildung 4 wird eine Bürker-Zellokammer dargestellt.

Für den Versuch wurden ca. 20 µl an den Rand des Deckgläschens gegeben. Durch Kapillarkräfte erfolgte eine Verteilung der Zellsuspension unter dem gesamten Rasterbereich. Für *Euglena gracilis* wurden die größeren Quadrate mit 0,1 µl Volumen ausgezählt und für *Chlorella vulgaris* die kleineren Quadrate von 0,00625 µl Volumen. Für die Kalibriergeraden wurden mindestens 15 Quadrate pro Kultur ausgezählt.

Da *Euglena gracilis* begeißelt ist und somit eine Eigenbewegung, besonders unter dem Licht des Mikroskops aufweist, wurden die Proben von Eg von 1 ml Volumen vor dem Auszählen mit 20 µl 0,1 molarer HCl versetzt, um so bewegungsunfähige Zellen zu erhalten.

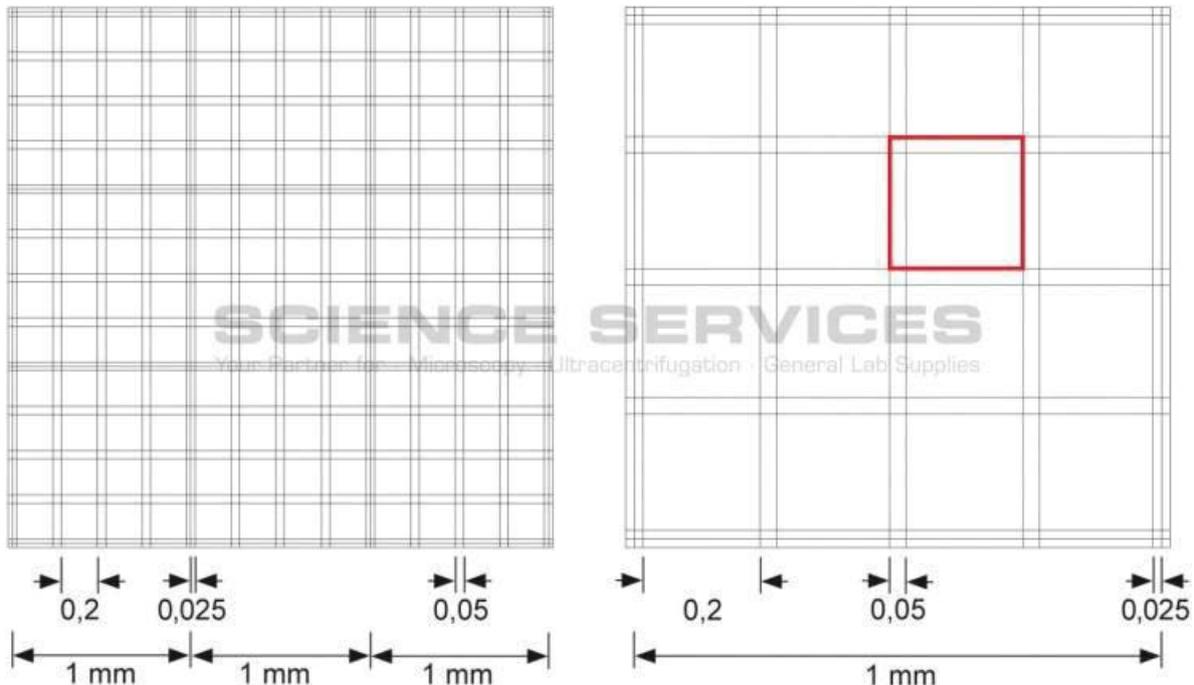


Abbildung 4: Bürker Zählkammer (Quelle: <http://scienceservices.de> – abgerufen 20.11.2014)

3.2.2. Photometrie

Für spätere Versuche sollte die Bestimmung der optischen Dichte der Kulturen eine schnellere Möglichkeit zu Aussagen über das Wachstum der Algenkulturen liefern. Deshalb wurden die photometrischen Messwerte mit den dazugehörigen Zellzahlen aus der Bürker-Zählkammer in ein Verhältnis gesetzt und eine Kalibriergerade erstellt, deren Faktor eine Umrechnung aus den Extinktionen zulässt.

Nach einem Vorversuch mit destilliertem Wasser, Algensuspension und zugesetztem Sickerwasser (Absorptionsspektrum im Wellenlängebereich von 350 nm bis 750 nm) wurde die Wellenlänge zur Messung der Extinktion auf 690 nm festgelegt, da bei dieser Wellenlänge die wenigsten Störfaktoren aus dem Sickerwasser zu messen waren. Zum Messen der Extinktion von Zellsuspensionen wird für gewöhnlich eine niedrigere Wellenlänge verwendet. Dieses konnte aber aufgrund der starken Eigenfärbung des Sickerwassers nicht genutzt werden.

Für die Messungen in einem Nanocolor 200D Filterphotometer wurden jeweils 1,0 ml Algensuspension verwendet.

3.2.3. Bestimmung der Zellzahl mit Hilfe einer Ausgleichsgerade

Nach Bestimmung der Zellzahl in verschiedenen Konzentrationen in der Bürker-Zählkammer und zeitgleicher Messung mittels Photometer bei $\lambda = 690 \text{ nm}$ kann mittels Umformung des Lambert-Beer'schen Gesetzes

$$E = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon * c * d$$

zu

$$E = \frac{E_1}{c_1} = \frac{E_2}{c_2} \rightarrow c_2 = c_1 * \frac{E_2}{E_1}$$

E_1 = Extinktion des Standards;

E_2 = Extinktion der Probe

c_1 = bekannte Konzentration des Standards; c_2 = unbekannt Konzentration der Probe

eine Ausgleichsgerade in einem Diagramm bestimmt werden, in dem die Extinktion gegen die Algenzahl pro definiertes Volumen aufgetragen wird. Die ermittelte Steigung gibt dabei den Faktor an, mit dem die Zellzahl aus der gemessenen Extinktion errechnet werden kann. In Abbildung 5 ist dieses beispielhaft für *Cv* dargestellt.

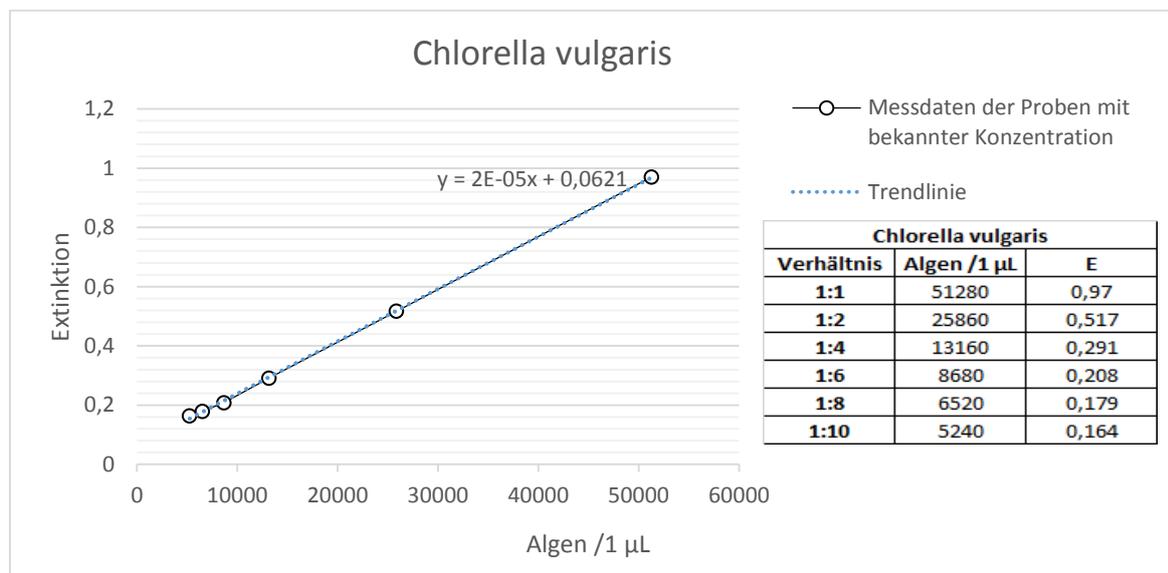


Abbildung 5: Beispiel für Kalibriergerade (Quelle: M. Vauth)

3.3. Sickerwasser

Das Sickerwasser wurde aus der Ringdrainage der Altdeponie der Pohlschen Heide gewonnen. Die Zusammensetzung kann auf Grund von äußeren Einflüssen leicht variieren. Die Matrix des Deponiesickerwassers schwankt wenig. Das Wasser weist einen hohen Anteil an Organik, gemessen als CSB auf, eine hohe Salzkonzentration, gemessen als Chlorid bzw. als Leitfähigkeit einen leicht alkalischen pH-Wert und hohe Ammonium- bzw. Ammoniakkonzentration auf. Schwermetalle liegen nicht hochkonzentriert vor. Der Aufwand für eine konventionelle Deponiesickerwasserbehandlung ist hoch, weil hier biologische Verfahren wegen der schwierigen Abwassermatrix kaum angewendet werden. Erfahrungen hierfür sind kaum vorhanden.

Das Sickerwasser wurde für die Versuche im Labor frisch von der Pohlschen Heide geholt und für eine gesamte Versuchsreihe verwendet. Dazu wurde es auf verschiedene Weise vorbehandelt um biotische Faktoren in Versuchen besser von abiotischen Faktoren abgrenzen zu können. Chargen einer Probe wurden filtriert, wobei eine Sterilfiltration mittels 45 µm Filter aufgrund der hohen Partikeldichte nicht möglich war. Auch eine größere Porengröße war durch das Absetzen der Schwebeteile aus dem Sickerwasser nicht erfolgreich. Deshalb wurden Filtrationen nur mit abgestandenem Sickerwasser durchgeführt. Der Inhalt der großen Schwebeteile wurde dabei als Ausschuss betrachtet. Das Filtrat zeigte weiterhin eine braune Färbung auf, wenn auch etwas heller. Dieses Filtrat wurde nun direkt verwendet oder noch weiterbehandelt.

Eine weitere Behandlung des Sickerwassers erfolgte durch Autoklavieren (119 °C und 1,8 bar für 30 min). Dadurch kann die natürliche Mikrobiota des Sickerwassers reduziert werden. Durch zweifaches Autoklavieren innerhalb von 24h wurden auch potentielle Sporenbildner weitestgehend abgetötet. Eine visuelle Kontrolle des Erfolgs dieser Sterilisationstechnik erfolgte mittels Mikroskop, wobei die immer noch enthaltenen Schwebeteile des Sickerwassers eine genaue Aussage nicht zulassen. Allerdings konnten keine Eigenbewegungen von Mikroorganismen mehr beobachtet werden. Zeitgleich mit den natürlich vorkommenden Mikroorganismen kann auch die Zusammensetzung des Sickerwassers bezüglich der hitzesensiblen Inhaltsstoffe verändert werden. Dieser Effekt wurde allerdings in Kauf genommen um die Kontamination der Algenreinkulturen zu minimieren.

Neben der Vorbehandlung des Sickerwassers wurden auch verschiedene Konzentrationen innerhalb des abschließenden Kulturmediums getestet. Die Verdünnungen mit destilliertem Wasser im Labor und Stadtwater in der Algenrinne variierten dabei von 1:1 bis 1:50.

Die Analyse des Sickerwassers (vom 19.05.2014), aus dem Antrag und die Messmethoden sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Im Verlauf des Projektes wurde das Sickerwasser immer wieder kontrolliert. Für eine Versuchsreihe wurde auch immer dieselbe Charge Sickerwasser verwendet. Die letzten Versuche wurden mit Sickerwasser mit den in Tabelle 4 aufgeführten Parametern durchgeführt.

Tabelle 3: Untersuchungsparameter Sickerwasser von der LUFA ITL

Parameter	Einheit	Ergebnis	Methode
pH-Wert vor Ort		8,22	DIN EN ISO 10523 (C5)
Wassertemperatur vor Ort	°C	15,2	DIN 38404-4 (C4)
Leitfähigkeit vor Ort	µS/cm	16.400	DIN EN 27888 (C8)
Färbung		schwarz	DIN EN ISO 7887 (C1)
Trübung		ohne	visuell
Geruch		nach Abwasser	DEV B1/2
Cyanide leicht freisetzbar	mg/L	0,013	DIN EN ISO 14403 (PL)
Orthophosphat	mg/L	26	E DIN ISO 15923-1 (D42)
Gesamtphosphor	mg/L	10	E DIN ISO 15923-1 (D42)
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/l	121	DIN 38409-7-1-1 (H7-1-1)
Chlorid	mg/L	1940	DIN EN ISO 10304-1 (D20)
Fluorid	mg/L	0,62	DIN 38405-4 (D4)
Sulfat	mg/L	360	DIN EN ISO 10304-1 (D20)
BTEX (Toluol)	µg/L	1,8	DIN 38407-9-1 (F-9-1)
PAK (Naphthalin)	µg/L	1,2	EPA 8260
PAK (Acenaphthen)	µg/L	0,5	EPA 8270
PAK (Fluoren)	µg/L	0,72	EPA 8270
Phenole (o-Kresol)	µg/L	1,3	EPA 604 (BB)
weitere Phenole (Summe)	µg/L	19,2	DIN EN 12673 (F15)(BB)
Uran	mg/L	0,0047	DIN EN ISO 17294-2 (E29)

(Probennahme am 19.05.2014 durch LUFA ITL GmbH)

Tabelle 4: Sickerwassermesswerte eigene Untersuchungen

Parameter	Einheit	10.06.2015	18.07.2016	Methode
pH		8,08	8,3	Hach HQ 40D
Temperatur	°C	22,8		Hach HQ 40D
Leitfähigkeit	µS/cm	12,28	15.100	Hach HQ 40D
CSB	mg/L	1560	3108	MN Nanocolor
TOC	mg/L	nn	899	AML
Ammonium-N	mg/L	1000	2.108	MN Nanocolor
Nitrat-N	mg/L	1,05	0,04	MN Nanocolor
Nitrit-N	mg/L	-	0,42	MN Nanocolor
Gesamtphosphor	mg/L	10	nn	MN Nanocolor
Orthophosphat	mg/L	-	nn	MN Nanocolor
Extinktion		0,464	nn	PerkinElmer Lambda20

3.4. Algenrinnen

Für die Versuche wurden zwei verschiedenen Arten von Algenrinnen verwendet: eine Labor-Variante auf dem Gelände der FH Bielefeld Campus Minden (Abbildung 6) und eine halbtechnische (vgl. auch AZ 28741) Algenrinne auf dem Betriebsgelände der Pohlschen Heide (Abbildung 7).

Durch verschiedene Witterungseinflüsse konnten an der großen Algenrinne nicht alle Versuche wie geplant durchgeführt werden. Wiederholungen unter annähernd den gleichen Bedingungen waren praktisch unmöglich. Die kleinere Variante bestand aus 3 m langen PVC Regenrinnen und konnte mit technischem CO₂ begast werden.

Die kleinen Algenrinnen hatten ein Fassungsvermögen von jeweils 4 l und wurden für diese Versuchsreihe ohne Gefälle ausgerichtet. Obwohl die Rinnen auf der Südseite der Gebäude lagen, wurden sie von großen Eichen vor starker Sonneneinstrahlung geschützt und beschattet, so dass eine indirekte Beleuchtung erfolgte. Dadurch konnte allerdings auch ein Eintrag von Fremdmaterial wie Blätter erfolgen.



Abbildung 6: Kleine Algenrinne vierfach (Quelle T. Egemann)

Die große Algenrinne auf dem Betriebsgelände der Pohlschen Heide konnte am selben Standort wieder in Betrieb genommen werden und zeigte sich in den Grunddaten wie im Projekt zuvor. Allerdings konnte zusätzlich eine CO₂-Einspeisung über die gesamte Strecke mit gereinigten Abgasen aus den nebenstehenden BHKWs erfolgen. Außerdem wurde die Rinne im Winter beheizt und mit einer Umwälzpumpe ein Strom innerhalb der Rinne erzeugt.



Abbildung 7: Algenrinne auf dem Betriebsgelände der Pohlschen Heide (Quelle B. Büscher)

3.5. CO₂ Begasung

Zur Photosynthese benötigen Algen nicht nur Licht, sondern auch CO₂ als Kohlenstoffquelle.



Um die Photosyntheseleistung und damit letztendlich auch die Wachstumsrate zu steigern, wurde dem Medium in verschiedenen Versuchen technisches CO₂ zugesetzt, da der natürliche Gehalt in der Atmosphäre weniger als 0,04 Volumenprozent ausmacht. Gleichzeitig muss aber der Einfluss der Begasung auf den pH-Wert des Kulturmediums beobachtet werden. Um den Einfluss von technischem CO₂ auf die Reinkulturen und das Sickerwasser zu beobachten, wurden Vorversuche im Labor in kleinen Volumina durchgeführt und die Ergebnisse anschließend für die Freilandversuche in den Algenrinnen verwendet und verglichen.

3.5.1. CO₂-Begasung in kleinen Kulturgefäßen

Im Labor wurden zunächst kleine Vorversuche zur Begasung mit CO₂ durchgeführt, um von diesen Ergebnissen auf die richtigen Bedingungen für die Algenrinne schließen zu können. Der Versuchsaufbau (Abbildung 8) sah wie folgt aus:

Die Begasung erfolgte mit technischem CO₂ (Firma Linde) für einen je nach Versuch definierten Zeitraum, Zeitintervall und Volumen. Um die Bedingungen an die natürlichen äußerlichen Bedingungen anzupassen, wurde der Versuchsaufbau am Fenster mit indirektem Sonnenlicht realisiert. Die durchschnittliche Beleuchtungsdauer lag bei 16,5 Stunden am Tag.



Abbildung 8: Aufbau zur Begasung von 12 Kulturen gleichzeitig (Quelle K. J. Schulz)

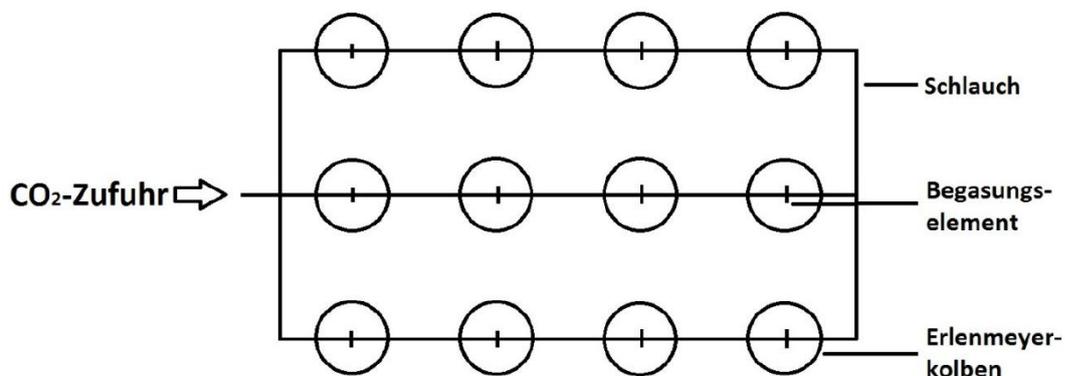


Abbildung 9: Schema der Versuchsreihe (Quelle K.J. Schulz)

Das CO₂ wurde über ein verzweigtes Schlauchsystem allen Kulturen einer Versuchsreihe gleichzeitig (minimale Abweichungen durch die Reihenfolge der Kolben) zur Verfügung gestellt. Zeitgleich erfolgte durch den Gasstrom auch eine Durchmischung der Kulturen. Die ringförmige Versuchsanordnung stellte eine optimale Druckverteilung während der Begasungsphasen her (Abbildung 9).

CO₂ wurde über ein Dosierventil in den Erlenmeyerkolben geführt und über ein poröses zylindrisches Begasungselement (Aquarienfachhandel „Blubberstein“) in die Kultur gegeben. Die feinen Gasperlen wurden so im Medium verteilt und strömten langsam zur Oberfläche. Der Versuchsaufbau sollte die Verweildauer des Gases in der Algenkultur und dem darüber liegenden Luftraum innerhalb des Erlenmeyerkolbes erhöhen. Der Verschluss des Kolbenhalses mittels Frischhaltefolie soll den Eintrag von Fremdkörpern wie Staubpartikeln verhindern und gleichzeitig mittels kleiner Löcher den Gasaustausch ermöglichen. (Abbildung 10)

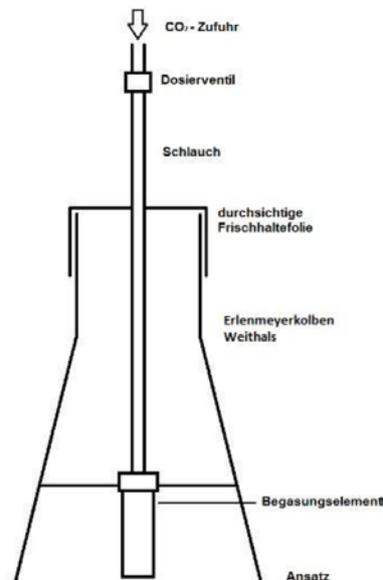


Abbildung 10: Schematische Zeichnung zur Begasungsvorrichtung im Labor (K. J. Schulz)

Das Ansatzvolumen wurde auf 100 ml je Versuch festgelegt, wobei das Sickerwasser in einer Konzentration von 10 % vorlag. Die weitere Zusammensetzung der einzelnen Ansätze variierte je nach Versuchsziel. Das verwendete Gasvolumen pro Probenansatz und Tag lag zwischen 62,5 ml und 2,5 l technischem CO₂. Da das Gas auch unmittelbar den pH-Wert der Ansätze beeinflusst und absenkt, wurde die tägliche Begasungsdauer von 40 min auf 30 sec abgesenkt. Die jeweilige pH-Wert-Absenkung ist dabei aber auch von der Zusammensetzung des Mediums und seiner Pufferkapazität abhängig. Da alle hier durchgeführten Versuche der Vorbereitung der Freilandversuche mit einfachsten Mitteln dienen sollen, wurde bewusst auf anspruchsvolle Medien mit hohen Pufferkapazitäten verzichtet.

3.5.2. CO₂-Begasung in der Algenrinne

Neben der Steigerung der Algenwachstumsrate sollen aus dem Sickerwasser Inhaltsstoffe eliminiert werden. Ein Stoffkreislauf soll durch die Verwendung der betriebseigenen CO₂-Abgase der Blockheizkraftwerke aufgebaut werden. In den Algenrinnen wurden zu Versuchen technisches CO₂ aus Gasflaschen sowie gefilterte Abgase der BHKWs verwendet. So sollte ein eventueller Einfluss der Abgase im Unterschied zu reinem CO₂ ermittelt werden.

Die Begasung erfolgte über 10 kugelförmige Begasersteine, die in jedem Segment der Algenrinne zur Verfügung standen. Die Begasungsdauer lag bei einmal täglich 5 Minuten. Während des Versuchs wurden verschiedene Werte über die Länge der Algenrinne untersucht. Der pH-Wert wurde vor und nach der Begasungsphase gemessen um den Einfluss des CO₂ auf das größere Volumen zu bestimmen. (Abbildung 11).



Abbildung 11: CO₂-Begasung der Algenrinne an der Pohlschen Heide (Quelle K. J. Schulz)

3.6. Erntetechnik

Die Erntetechnik ist eine zentrale Technik für die Kreislaufführung. Die Algen sollen energetisch genutzt werden. Im kleinen Laborversuch erfolgte die Ernte mittels Zentrifugen. Das ist eine erprobte Technik. Zentrifugen sind jedoch aufwändig hinsichtlich der benötigten Energie und der Betriebsführung.

In den halbertechnischen Versuchen und für das Scale-Up soll die Algenernte einfach und robust erfolgen. Da die verwendeten Algenarten verschiedene Eigenarten bezüglich Anhaf-

tung, Schwebeverhalten, Phototaxis und Aggregatbildung aufweisen, wurden verschiedene Erntetechniken verwendet, die diese Besonderheiten berücksichtigen.

3.6.1. Abstreichgitter

Die Eigenschaft des Anheftens an Oberflächen, die bereits in den Laborversuchen zu beobachten war, wurde in diesem Ansatz mittels handelsüblichen Abstreichgittern aus dem Baumarkt getestet. Die Gitter der Marke LUX wurde im gleichmäßigen Abstand in jedes der 10 Segmente der Algenrinne befestigt. Dazu wurde das obere Ende am Griff mittels Kabelbinder an den Querstreben der Algenrinne befestigt und am unteren Ende des Gitters eine schwere Metallschraube befestigt um ein Aufschwimmen der Konstruktion zu vermeiden. Die Gitter wurden in dieser Weise eine Woche im Strom der Rinne inkubiert, die zu diesem Zeitpunkt mit *Chlorella vulgaris* angeimpft war. Die Gitter sollten den Algen als Aufwuchsfläche dienen. Nach Ablauf einer Woche wurden die Gitter aus der Rinne entfernt und im feuchten und getrockneten Zustand gewogen, bevor die anhaftende Algenmaße entfernt wurde. Dazu wurde nach der vollständigen Trocknung die Algenmaße mittels Bürste abgebürstet und verwogen.

3.6.2. Filtration

Für Versuche im kleineren Maßstab konnten Filter zur Biomassegewinnung genutzt werden. Allerdings eignete sich diese Methode nur für kleinere Volumina bis zu einem Liter und sind für die Biomassegewinnung an der Algenrinne nicht anwendbar.

Die verwendeten Filter der Firmen Macherey-Nagel MN617 $\frac{1}{4}$ und Selectra Nr. 589 wurden vor dem Versuch im Glühofen bei 105°C getrocknet und nach dem Filtrieren inklusive Filtrat dort wieder getrocknet um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten. Auch wurde die filtrierte Flüssigkeit aufgefangen und zum Eintrocknen im gleichen Ofen für 24 Stunden inkubiert. So konnte die Filtrierleistung beurteilt werden. Zwischen dem ersten Trocknungsschritt und dem zweiten wurden die Filter jeweils verwogen.

3.6.3. Zentrifugation

Im industriellen Maßstab werden für Zellernten Zentrifugen verwendet, die die Zellen vollständig von der Flüssigkeit separieren. Diese Separatoren können Suspensionen nach einzelnen Phasen separieren oder einfach fest von flüssig trennen. Zentrifugen sind in jeder Größe teuer und wartungsintensiv und daher für die vorgesehene Verwendungsart nicht einsetzbar. Für kleinere Versuche im Labormaßstab konnte aber eine Zentrifuge mit Glaszylindern und 20 ml Volumen verwendet werden, während für Abschlussuntersuchungen des AML eine Hettich Rotina 380 R mit 10.000 rpm (= 13.639 RCF) und 20°C für 20 min genutzt wurde. Die Höchstmenge, die in einer Zentrifugation untersucht werden konnte, lag bei 240 ml, aufgeteilt in Zentrifugenröhrchen. Nach Abschluss der Zentrifugation wurde der Überstand vorsichtig dekantiert und verworfen und das erhaltene Pellet zunächst gewogen und dann den verschiedenen Versuchen zugeführt.

3.6.4. Abschöpfen bzw. Sedimentieren lassen

Manche Algenarten bzw. -mischungen bilden Aggregate, die bei nicht weitergeführter Durchmischung oder Rührung zu Boden sinken und damit ein Abschöpfen, bzw. ein Ablassen des Mediums und somit einen Medienaustausch ermöglichen. Dieses ist aber keine richtige Erntemethode und ermöglicht auch keine komplette Ernte der Biomasse. Deshalb wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

3.7. Beleuchtungsdauer

Im Rahmen der Untersuchungen wurde auch der Einfluss der Beleuchtungsdauer genauer betrachtet. Die Qualität des Lichtes ist in einem späteren Freilandaufbau der Anlage nicht zu beeinflussen. Genauso wie die Temperatur nur wenig zu beeinflussen ist. Die Algenrinne wurde mittels Begleitheizung eisfrei gehalten werden und so ein Absterben der Algen durch Erfrieren ausgeschlossen. Aber während des Jahreslaufs variiert in unseren Breiten die Sonnenstrahldauer in so einem hohen Masse, dass die gewählten Algenarten diese starke Varianz tolerieren müssen. Die Tageslichtdauer in Deutschland liegt zwischen ca. 8 Stunden im Winter und ca. 17 Stunden im Sommer. Damit besitzen die Pflanzen in unseren Breiten eine hohe circadiane Toleranz. Von Algen ist ebenfalls eine circadiane Rhythmik bekannt.

Die gewählten Algen für die Laborversuche zeigen unterschiedliche Taktiken, um mit unvorteilhaften Lebensbedingungen fertig zu werden. Mit *Euglena gracilis* wurde eine Alge ausgewählt, die ohne Lichteinstrahlung von phototrophe auf mixotrophe Ernährung wechseln kann und zu diesem Zweck die Chloroplasten auch ausscheiden kann. *Chlorella vulgaris* ist ein Modellorganismus für Photosynthese, kann aber auch mixotroph wachsen. Seine Wachstumsrate ist unter idealen Bedingungen sehr hoch.

Tabelle 5: Anordnung der Beleuchtungsversuche

Versuch Nr.	Alge	Sickerwasseranteil	Medium	Beleuchtung (h/d)	Versuchszeit (d)
1	<i>C. vulgaris</i>	0 %, 10 %, 15 %, 20 %	BB und dest. H ₂ O	12	11
2	<i>C. vulgaris</i>	0 %, 10 %, 15 %, 20 %	BB und dest. H ₂ O	12	10
3	<i>C. vulgaris</i>	0 %, 20 %, 25 %, 30 %	BB und dest. H ₂ O	12	30
4	<i>E. gracilis</i>	0 %, 10 %, 15 %, 20 %	Volvic und Bodenlsg	12	15
5	<i>E. gracilis</i>	0 %, 10 %, 15 %, 20 %	Volvic und Bodenlsg	12	
6	<i>E. gracilis</i>	0 %, 20 %, 25 %, 30 %	Volvic und Bodenlsg	12	14

Es wurden verschiedene Versuchsansätze zur Belichtungsdauer gewählt. Die Versuche fanden dabei unter kontrollierten Laborbedingungen statt. Fremd- und Streulicht wurde so weit wie möglich durch die Wahl eines abgedunkelten Raumes und zusätzlicher Verdunke-

lung durch einen umschließenden Karton vermieden. Probenentnahmen für Untersuchungen wurden im Beleuchtungszeitraum durchgeführt. Als Lichtquelle dienten Leuchtstoffröhren mit einer Leuchtkraft von 1000 bis 1100 lx am Kulturgefäß. Durch eine kontinuierliche Bewegung des Mediums mittel magnetischer Rührplatte wurde eine Selbstbeschattung der Algenkulturen verhindert. Auch sollte so das Absetzen und Anheften an die Wand des Kulturgefäßes verhindert werden. Die folgende Tabelle gibt die verschiedenen Versuchsansätze zur Beleuchtungsdauer wieder. Die Anordnung der Beleuchtungsversuche ist in Tabelle 5 dargestellt.

3.8. Messparameter und verwendete Methode

In diesem Abschnitt werden die Parameter und die verwendeten Methoden der Messung zusammengestellt.

3.8.1. Ammoniumgehalt

Für die Versuche wurden zwei verschiedene Methoden zur Messung des Ammoniumgehalts verwendet. Zum einen ein Schnelltest der Firma Quantofix und zum anderen eine genormte Methode nach DIN EN ISO 11732 im Labor der AML.

Für tägliche Messungen wurde der Ammoniumgehalt mit Hilfe eines Schnelltests der Firma Quantofix® ermittelt, der einen Messbereich von bis zu 400mg NH₄⁺/L erfasst. Um diesen Messbereich zu vergrößern wurde eine Verdünnung der Probe erstellt, indem Probe mit dem Volumen von 1ml mit 4ml destilliertem Wasser vermischt wurde. Diesem Gemisch wurden 10 Tropfen Natronlauge (NaOH) hinzugetan. Nach kurzem Schütteln wurde ein Teststreifen in die Lösung eingeführt und circa 5 Sekunden lang in die Probe gehalten. Danach wurde die auf dem Teststreifen verbleibende Flüssigkeit abgeschüttelt und die so entstandene Färbung auf dem Teststreifen mit der vorliegenden Farbskala abgeglichen. Der abgelesene Wert muss für die endgültige Konzentration verfünffacht werden, um den Verdünnungsfaktor zu berücksichtigen. Der Messbereich des Schnelltests erweiterte sich somit auf 2000mg NH₄⁺/L.

3.8.2. pH-Wert, Sauerstoffsättigung, Leitfähigkeit und Temperatur

Für die Messung des pH-Wertes, der Sauerstoffsättigung und der Leitfähigkeit kam das mobile Gerät HQ40d multi von der Firma Hach zur Anwendung. Jeweils zwei Messungen konnten durch angeschlossene Elektroden simultan durchgeführt werden. Die Temperatur wurde von den jeweiligen Elektroden mitgemessen, da alle Faktoren temperaturabhängig sind.

Für geringe Probenvolumina wurden Schnelltests der Firma Macherey-Nagel zur Bestimmung des pH-Wertes verwendet.

Das AML Labor hat in den zugesandten Proben den pH-Wert nach DIN 38404 C5 Norm bestimmt, die Leitfähigkeit nach EN 27888 (C 8).

3.8.3. Nitrat-/ Nitritgehalt

Für die Messung des Nitrat- und bei Bedarf des Nitritgehalts wurden zwei verschiedene Methoden verwandt. Im AML Labor erfolgte die Messung zur Überprüfung mittels EN ISO 13395, während für tägliche Messungen Küvettentests des Typs Nanocolor (Macherey-Nagel) nach Vorschrift genutzt wurden.

3.8.4. Phosphatgehalt

Der Gehalt an ortho-PO₄ wurde im AML mittels Küvettentests bestimmt.

3.8.5. CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf)

Um den chemischen Sauerstoffbedarf zu bestimmen wurde ebenfalls ein Küvettentest von Nanocolor (Macherey-Nagel) verwendet.

3.8.6. TOC (Total Organic Carbon)

Mit dem TOC (total organic carbon) wurde der gesamte organische Kohlenstoff gemessen. Zur Ermittlung des TOC- Gehaltes wird die Konzentration des gesamten organischen Kohlenstoffs in einer Probe mit Hilfe von automatisierten Messverfahren bestimmt. Der TOC-Wert lag bei 900 mg/L.

Die umfangreiche Messmethode wurde nach DIN EN 1484 vom AML Labor durchgeführt.

3.8.7. Trockenrückstand und Glühverlust

Nach der Zentrifugation der Proben wurden diese unter anderem nach Trockenrückstand und Glühverlust hin untersucht. Die Messungen fanden im AML nach DIN 38414 S 2 und DIN 38414 S 3 statt.

3.9. Geräteliste

Liste der verwendeten Geräte und Methoden

Photometer	Macherey-Nagel Nanocolor 200 D
	PerkinElmer Lambda 20
Trockenschrank	Memmert ULP 400
Glühofen	Nabatherm L9/C6
Zentrifuge	Hettich Universal 16A
Rührer	IKA RT 15
Analysenwaage	Kern 770
Kamera und Software Pixel-fox	dhs Dietermann & Heuser Solution GmbH, D-35753 Greifenstein-Beilstein

Portables Multimessgerät Hach HQ 40 D mit den Sensoren		
Sensoren:	pH-Wert	PHC301
	Leitfähigkeit	CDC401
	Sauerstoff	LDL101
Digital-pH-Meter Knick 646 mit den Sensoren		
Sensoren:	pH-Wert	Schott BlueLine 11pH
	pH-Wert	Schott BlueLine 13pH
	pH-Wert	Schott BlueLine 16pH

Küvetten-Test-Methoden:		
CSB	Macherey-Nagel	Nanocolor 985026
	Macherey-Nagel	Nanocolor 985027
	Macherey-Nagel	Nanocolor 985029
Ammonium	Macherey-Nagel	Nanocolor 985005
	Macherey-Nagel	Quantofix 91315
Phosphat	Macherey-Nagel	Nanocolor 985081
Nitrit	Macherey-Nagel	Nanocolor 985068
Nitrat	Macherey-Nagel	Nanocolor 985064
Mikroskop	Ortholux	Leitz Wetzlar

Alle sonstigen Chemikalien und Reagenzien Qualität p.A.

Die Beschreibung der Geräte und Prüfmittel, die vom AML im Rahmen dieses Projektes benutzt wurden, befinden sich im Anhang.

3.10. Ammoniak-Ausgasung

Zur Überprüfung der Ausgasung von Ammonium als Ammoniak aus der Lösung aufgrund des pH-Wert abhängigen NH_4/NH_3 -Gleichgewichtes wurden zwei Versuche durchgeführt, deren Messwerte im Anhang aufgeführt sind. Der erste Versuch wurde ohne, der zweite mit Zugabe von Algenlösung durchgeführt.

Eine Wulfsche Flasche wurde mit etwas verdünnter Sickerwasserlösung gefüllt und mit einem Magnetrührer kontinuierlich gerührt. Zum Druckausgleich wurde ein Verbindungsschlauch in einen Messzylinder geführt. Die anderen zwei Öffnungen waren während der Durchführung der Versuche geschlossen. In der im Messzylinder befindlichen Sperrflüssigkeit würde das Ammoniak-Gas im Falle einer Ausgasung aufgefangen. Die Abbildung 12 zeigt den Versuchsaufbau.



Abbildung 12: Laborapparatur zur Ammoniakausgasung

Bis pH-Wert 8,4 unter dauerhaftem Rühren im geschlossenen Reaktor wurde keine Ausgasung von Ammonium gemessen.

3.11. Aufzeichnung Freiland Wetterdaten

Da das Ziel dieses Projektes die Implementierung eines einfachen Sickerwasserreinigungssystems in einer Außenanlage war, wurde an der Algenrinne auf dem Gelände der Pohlschen Heide eine Datenloggerstation eingerichtet, die über den Verlauf eines Jahres in regelmäßigen Abständen verschiedene Umweltparameter bestimmt und dokumentiert hat. Außerdem wurden in regelmäßigen Abständen weitere Daten händisch bestimmt und Bildaufnahmen gemacht. Der Fokus lag dabei auf den wärmeren Monaten der Vegetationsperiode, es liegen aber auch Daten zur kalten Jahreszeit vor. Alle Daten wurden gespeichert und in einen Kontext zu den Freilandversuchen an der Pohlschen Heide gestellt. Die große Fülle an Daten wird in einer medialen Datenbank hinterlegt.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Laborversuchen und von den halbtechnischen Versuchen auf der Pohlschen Heide dargestellt. Das Versuchsprogramm ist im Anhang zusammengestellt.

4.1. Wachstum der Reinkulturen im optimalen Medium

Die beiden Algenarten wurden sortenrein und ohne Kontamination kultiviert. Aufgrund der langen Ansprechzeit (lag-Phase) konnten aber nicht annähernd die in der Literatur beschriebenen Wachstumsraten erzielt werden. Zudem zeigten sich visuell anhand der Grünfärbung der Kulturen objektiv höhere Wachstumsraten, als sie mittels Messung der optischen Dichte nachweisbar waren. Das lag zum einem an dem schnellen Absinken der Zellen nach Beendigung des Rührens, wodurch die Extinktionswerte auch innerhalb einer Messung schwankten. Zum anderen neigten die Zellen während des Wachstums zum Verklumpen. Es wurden Zellaggregate mit der Gefäßwand, faserigen Bestandteilen des Sickerwassers oder aber miteinander gebildet. Diese Aggregate erschwerten die Messungen und führten zu Schwankungen. Die Auszählung der absoluten Zellzahl zeigte aber ein deutliches Wachstum (Abbildung 13 und 14).

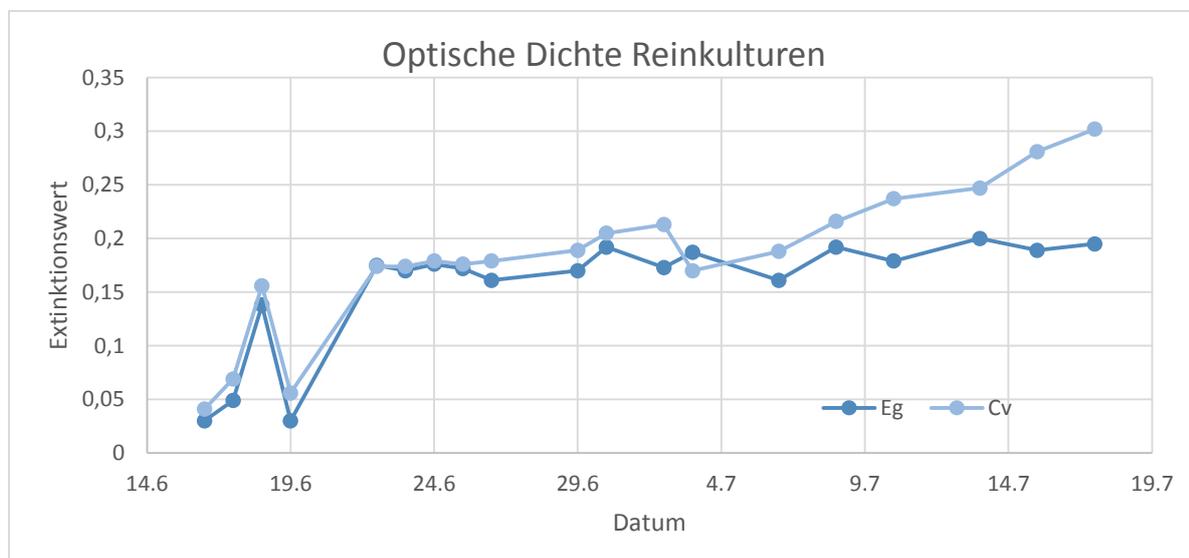


Abbildung 13: Typischer Wachstumsverlauf der Reinkulturen (Quelle L. Eichner)

In Abbildung 13 ist exemplarischer Wachstumsverlauf aufgeführt, der zeigt, dass beide Algenarten in Reinkultur eine annähernd gleiche Wachstumsrate unter idealen Bedingungen aufweisen. Bei beiden Kulturen ereignete sich am 19.06.2015 ein starkes Absinken des Extinktionswertes. Drei Tage später wurde der vorherige Wert wieder erreicht aber ein exponentielles Wachstum wurde nicht mehr erreicht. Zeitgleich wurden neben der optischen Dichte auch Proben zur Bestimmung der Zellzahl genommen und unter dem Mikroskop

mittels einer Bürker-Zählkammer ausgewertet. Abbildung 14 zeigt diese Werte von *Chlorella vulgaris* und mit der gleichen Tendenz auch die verlangsamte Wachstumsrate. Die Zellzahl konnte zwar im Verlauf eines Monats verdreifacht werden, ein ideales Zellwachstum zeigt diese Kurve aber nicht.

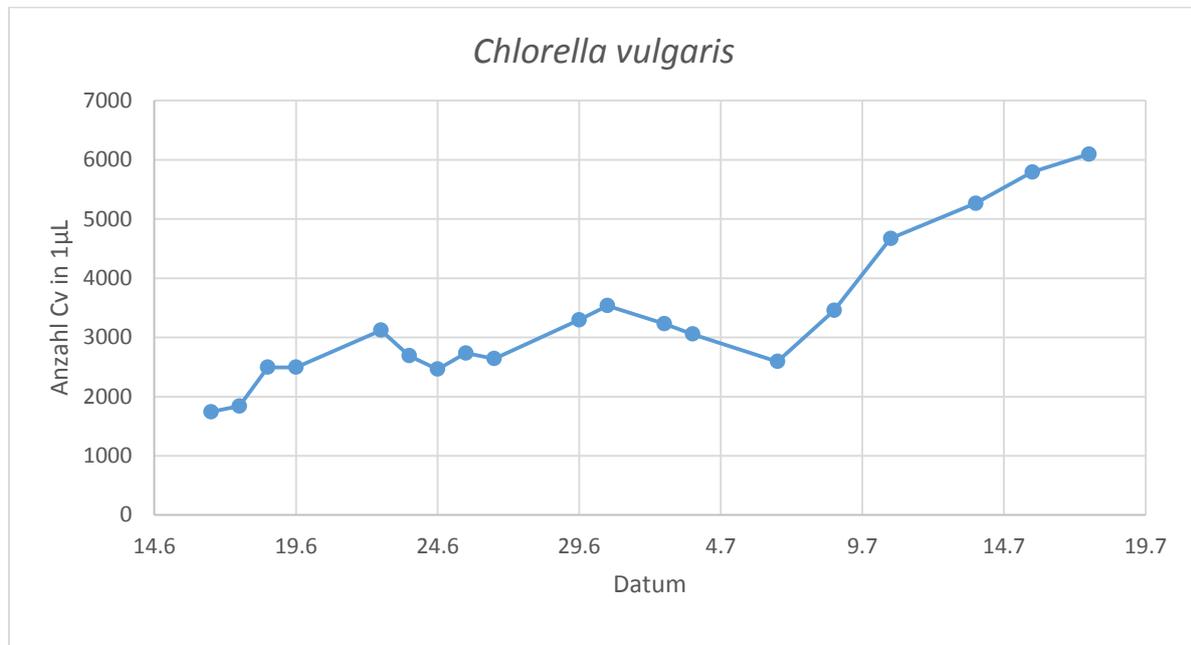


Abbildung 14: Korrelierende Zellzahl der *Chlorella vulgaris* Kultur (Quelle L. Eichner)

In Abbildung 15 ist hingegen die absolute Zellzahl von *Euglena gracilis* im gleichen Zeitraum aufgezeichnet, wie die Daten der optischen Dichte in Abbildung 13 zeigen. Hier kann trotz der steigenden optischen Dichte keine gleichartig signifikante Steigerung der Zellzahl von Eg erkannt werden. Vermutlich ist dieses der Zellgröße des Organismus geschuldet, der eine gleichmäßige Verteilung im Medium schwierig macht. Die dargestellten Werte sind der Mittelwert aus drei Auszählungen von je drei verschiedenen Feldern einer Probe in der Zählkammer.

Trotz dieser Schwierigkeiten konnte von beiden Algenarten eine Kalibriergerade in Abhängigkeit von optischer Dichte zur absoluten Zellzahl ermittelt werden. Abbildung 16 zeigt diese Kalibriergerade für *Chlorella vulgaris*.

Die Vorgehensweise war dabei auch nicht in Abhängigkeit vom Kulturwachstum, da zur Ermittlung eine gut gewachsene Algenkultur zu einem bestimmten Zeitpunkt fixiert wurde, eine Verdünnungsreihe erstellt wurde und diese dann wiederum sehr zeitnah sowohl photometrisch als mikroskopisch untersucht wurde. Die erhaltenen Daten zeigen dabei sehr deutlich, dass die Werte mit einander korrelieren. Eine Ausgleichgerade wurde durch die Datenpunkte gelegt um anschließend mit der entsprechenden Formel ($y=ax+b$) der Gerade anhand der Steigung einen Wert zum ermitteln der Zellzahl zu haben (Vgl. Abb. 5). Hierbei ist

y = Extinktion

x = Konzentration an Algen pro μl

b = konstant (Schnittpunkt y-Achse)

a = Steigung

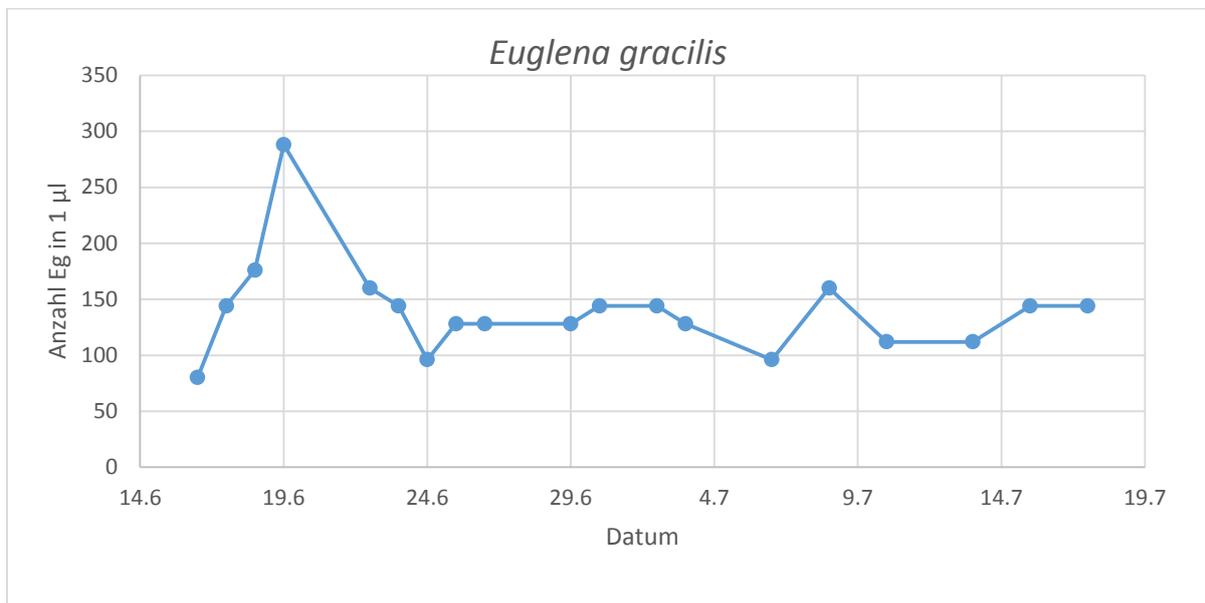


Abbildung 15: Korrelierende Zellzahl von *Euglena gracilis* (Quelle L. Eichner)

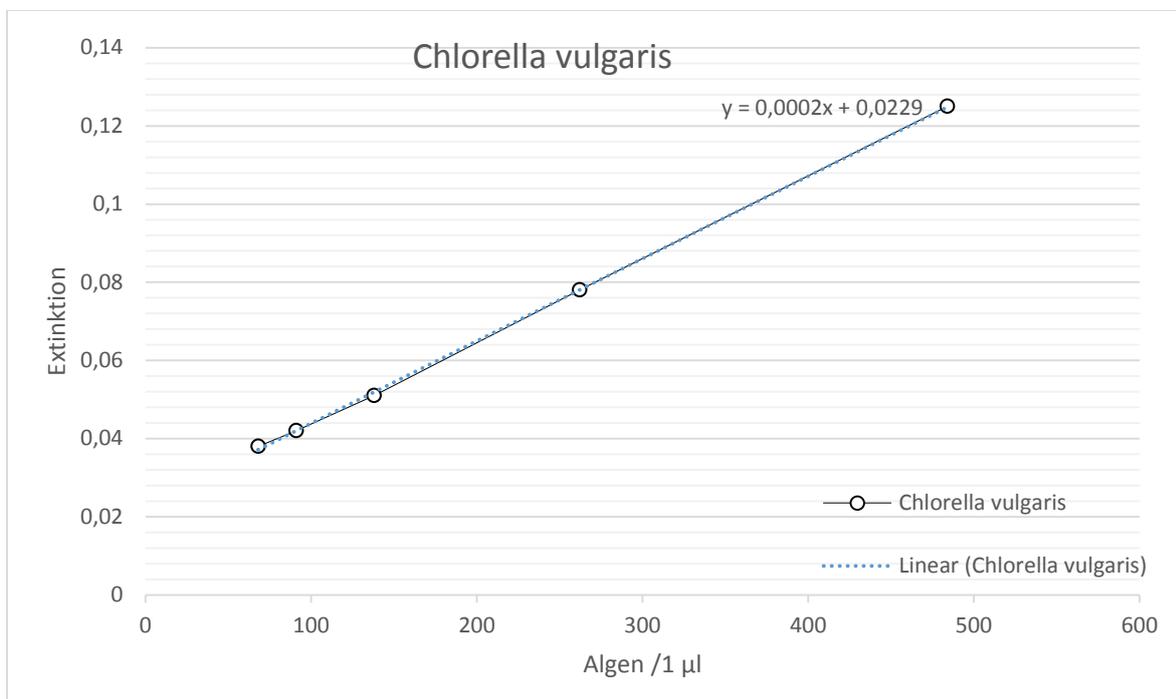


Abbildung 16: Kalibriergerade für *Chlorella vulgaris* (Quelle M. Vauth)

In Abbildung 17 wird deutlich, dass trotz der schwachen Wachstumsrate von *Euglena gracilis* und der geringen absoluten Zellzahl ausreichend Zellen für eine Kalibrierung vorhanden waren.

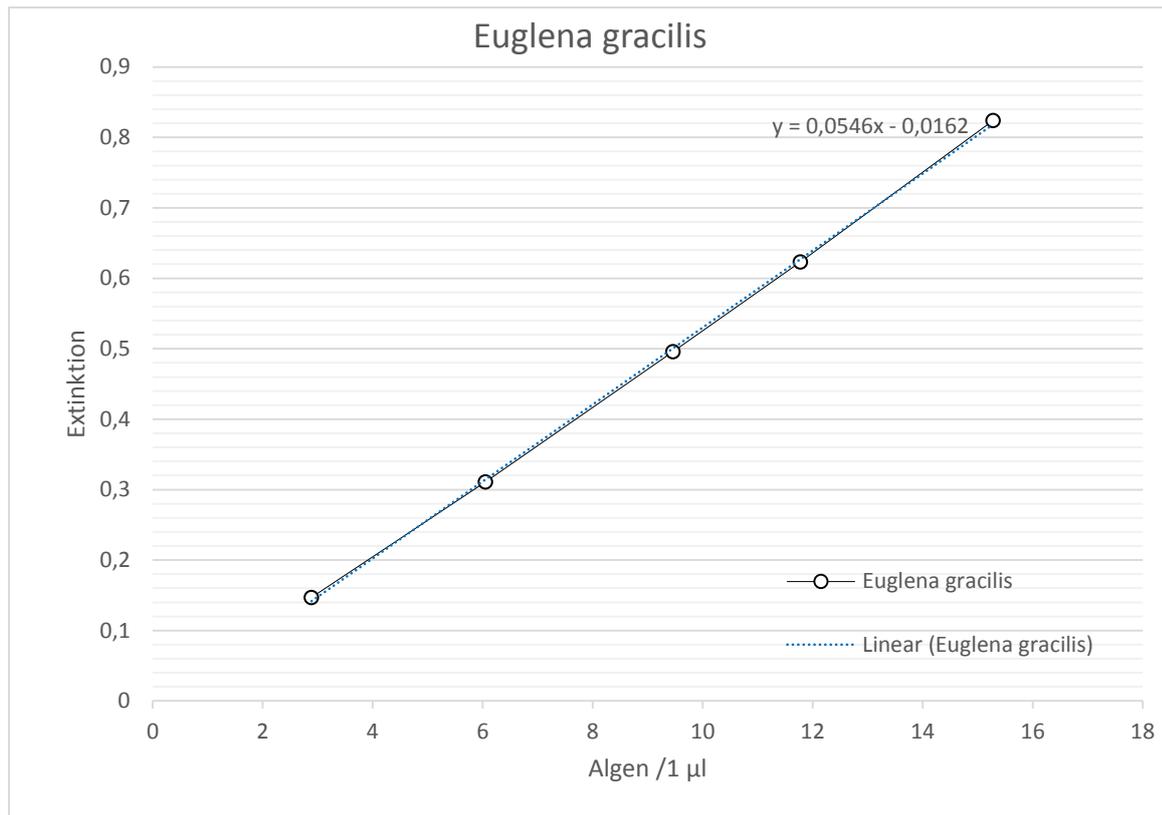


Abbildung 17: Kalibriergerade für *Euglena gracilis* (Quelle M. Vauth)

4.2. Wachstum, verschiedenen Sickerwasserkonzentrationen

Um die Toleranz der Algenarten zu testen, wurden verschiedene Konzentrationen an Sickerwasser in reinem Wasser bzw. Volvic Wasser mit Zusatz von Bold's Basal Medium und Bodenlösung verwendet. Aus parallelen Ansätzen ging hervor, dass Reinkulturen bis zu einer Sickerwasserkonzentration von 20 % in 2 von 3 Ansätzen Wachstum zeigten, während höhere Konzentrationen zu einem Absinken der optischen Dichte und der Zellzahl führte. Die besten Ergebnisse für *Chlorella vulgaris* wurden mit Konzentrationen von bis zu 20 % Sickerwasser erreicht, für *Euglena gracilis* hingegen nur bis 10 % Sickerwasseranteil.

Auch innerhalb einer Messreihe einer Reinkultur erfolgten in den Parallelen Schwankungen. In dem folgenden Beispiel ist zu sehen, dass die Kultur A unter den Ausgangswert fiel, während Kultur B ein Wachstum zeigt. In Abbildung 18 ist das Wachstum von *Chlorella vulgaris* mit 15 % Sickerwasser in zwei parallelen Versuchen dargestellt.

Für weitere Versuche wurde beschlossen, 20 % Sickerwasser als maximale Obergrenze zu setzen. Mit diesem Wert wurden alle weiteren Versuche angesetzt und nur in besonderen Fällen erhöht.

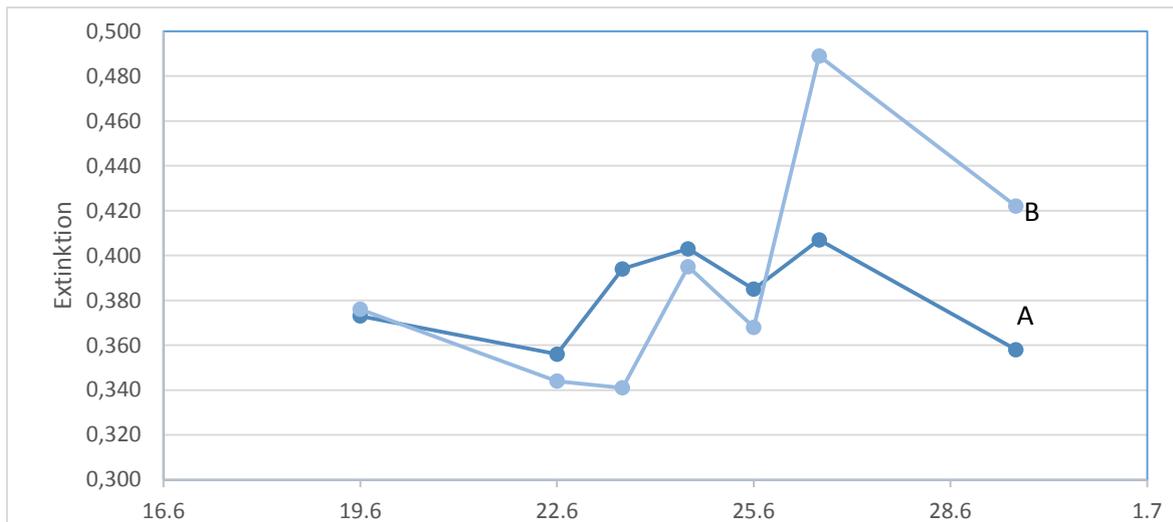


Abbildung 18: Wachstum von *Chlorella vulgaris* mit 15 % Sickerwasser in zwei parallele Versuche (Quelle L. Eichner)

4.3. Wachstum in verschiedenen Mischverhältnissen

Die Kulturen von *Euglena gracilis* und *Chlorella vulgaris* wurden in verschiedenen Verhältnissen zueinander gemischt, um zu testen, ob sich das Wachstum in Kokkultur verbessert. Es sollte überprüft werden, ob eventuelle Metabolit-Zwischenprodukte des einen Organismus das Wachstum des anderen Organismus fördert. Das Ergebnis anhand der absoluten Zellzahl nach 10 Tagen Kulturzeit zeigt, dass das Wachstum besser war, als in Reinkultur. Es kann von einem fördernden Einfluss der Kulturen zueinander ausgegangen werden.

Tabelle 6: Anzahl der Zellen am Anfang (100) und nach 10 Tagen

Nr.	Ansatztyp	C. vulgaris	E. gracilis
1	100 % Eg	-	175,00
2	100 % Cv	117,09	-
3	50 % Eg, 50 % Cv	158,44	550,00
4	70 % Eg, 30 % Cv	125,83	325,00
5	30 % Eg, 70 % Cv	150,27	133,33

In Tabelle 6 sind die Anzahl der Zellen bei verschiedenen Mischungsverhältnissen dargestellt. Ein Mischungsverhältnis von 50 % Cv zu 50 % Eg zeigte sich dabei als am besten. Die Kulturen wirkten visuell grüner und voller und auch die mikroskopische Auszählung bestätigte diese Annahme. Abbildung 19 zeigt die Wachstumskurve bei dem Mischungsverhältnis von 50 % Cv zu 50 % Eg.

Dieser Eindruck bestätigt sich auch in den Bildern der Reinkulturen und der Mischkulturen in In Abbildung 20 ist die Färbung in den Ansätzen in den Versuchsgefäßen zu sehen.

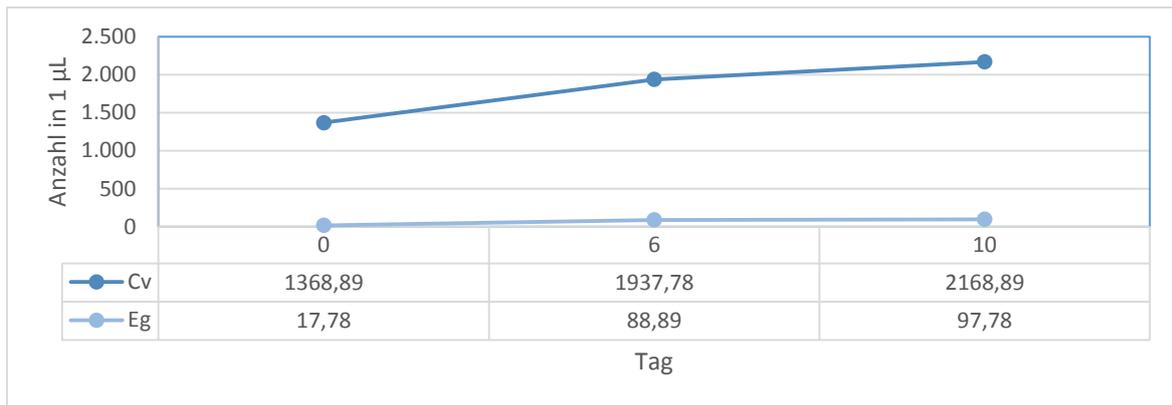


Abbildung 19: Wachstum in einer 50 % Mischkultur (Quelle L. Eichner)

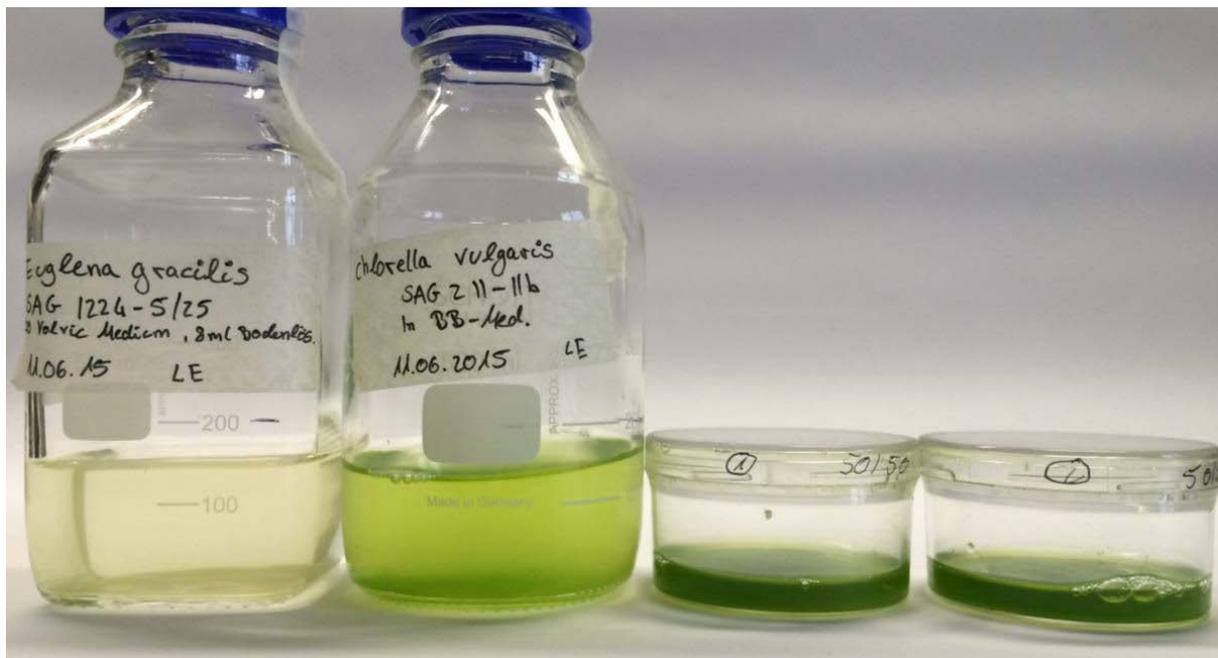


Abbildung 20: Grünfärbung der Ansätze (in den Flaschen die Reinkulturen, in den Rundgefäßen die Mischungen) (Quelle L. Eichner)

4.4. Änderungen des pH-Wertes und des Ammoniumgehalts im Kulturverlauf

Während des Kulturverlaufs wurden neben der optischen Dichte auch pH-Wert und Ammoniumgehalt gemessen um eine Aussage über den Einfluss des Zellwachstums auf beides treffen zu können. So stieg der pH-Wert ohne Einflussnahme mittels CO₂-Einspeisung auf Werte bis zu pH 9,0 und mehr. Bei diesen Werten kann es zu einer Ammoniakausgasung kommen und somit zu einer Abnahme des Ammoniumgehalts. Die Abbildungen 21, 22 und 23 lassen

diesen Schluss zu. Die Abbildungen 21, 22 und 23 zeigen den gleichen zeitlichen Verlauf der Versuche, der Extinktion, dem Ammoniumgehalt und dem pH-Wert.

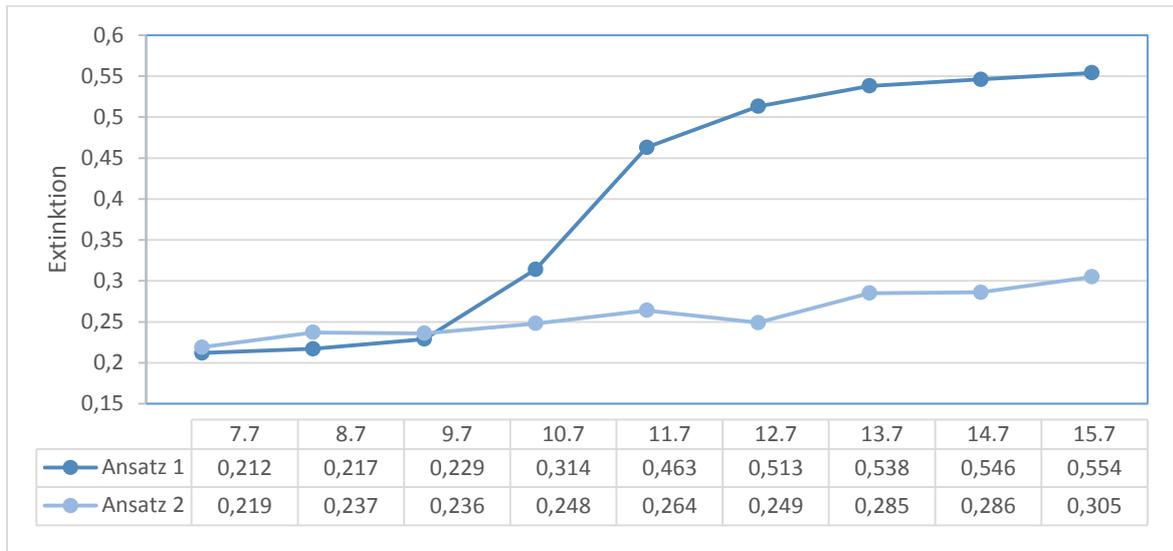


Abbildung 21: Optische Dichte einer Mischkultur (L. Eichner)

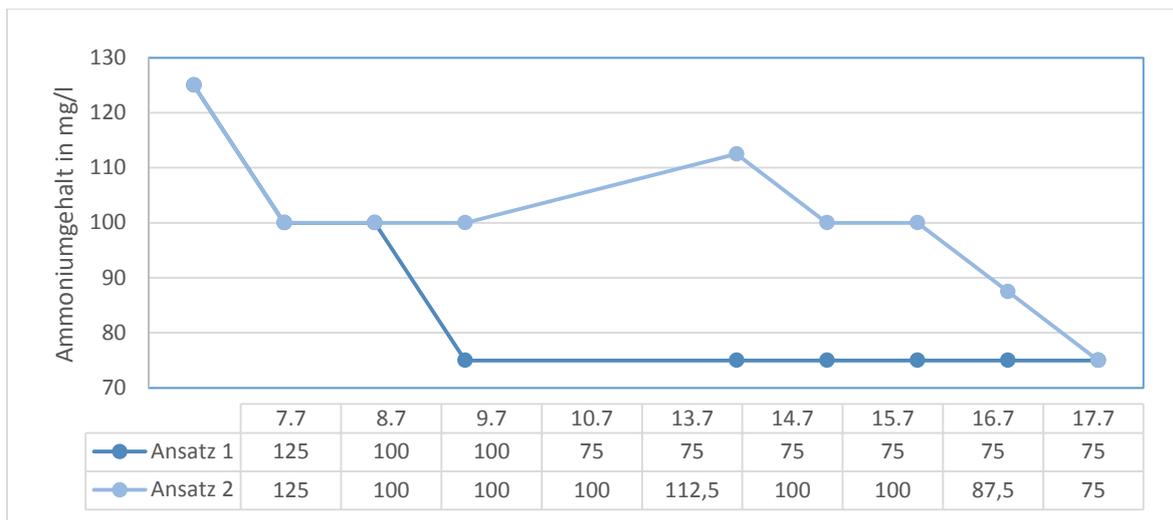


Abbildung 22: Ammoniumgehalt einer Mischkultur in mg Ammonium /L (L. Eichner)

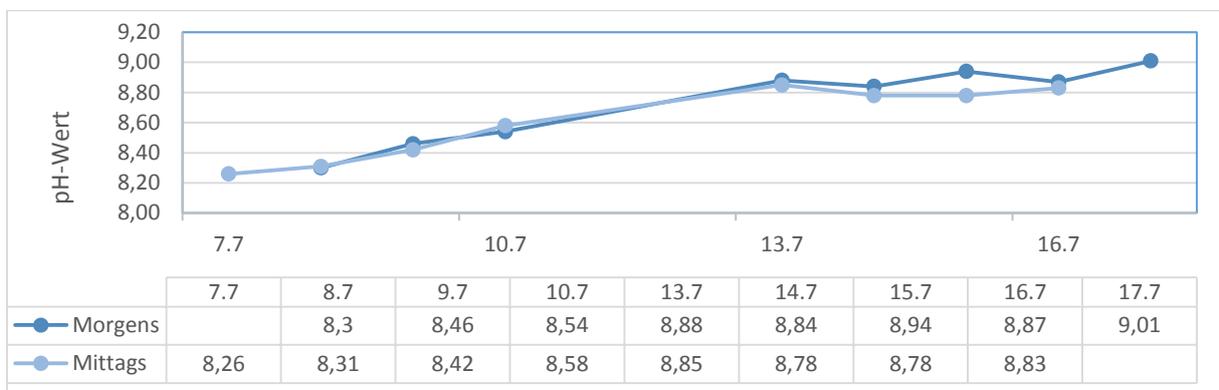


Abbildung 23: pH-Wert einer Mischkultur (Ansatz 2) zu verschiedenen Tageszeiten (L. Eichner)

Während des Wachstums der Kultur steigt auch der pH-Wert an und zeitgleich nimmt der Ammoniumgehalt ab. Ob dieses auf eine abiotische oder eine biotische Ursache zurückzuführen ist, ist dabei noch nicht wirklich klar. Deshalb wurde neben Kulturen von Algen mit Sickerwasser auch immer eine Negativprobe mitgeführt, in der Sickerwasser ohne Algenzusatz unter gleichen Bedingungen inkubiert wurde. Das Ergebnis zeigt, dass der Ammoniumgehalt in einer 10 % Sickerwasserlösung gar nicht bzw. in nur geringem Masse absinkt. Dabei ist der pH-Wert einer der ausschlaggebenden Punkte wie auch die Temperatur. Bei einem pH-Wert über 8 kann es bei warmen Temperaturen über 30°C schnell zu Ammoniakstripping kommen. Das Sickerwasser weist bereits einen pH-Wert von 8 und mehr auf. In Verdünnung mit Medium und Algen und bei zusätzlicher Begasung mit technischem CO₂ kann der pH-Wert aber konstant unter diesem Wert auch ohne große Pufferkapazität des Mediums gehalten werden.

4.5. Begasung mit technischem CO₂ im Labor

Um den geplanten Kreislauf zu schließen, und um auch die Ausbeute an Biomasse zu erhöhen, wurde technisches CO₂ den Kulturen zugeführt. Im Gegensatz zu einfachen Reinkulturen, die nur mittels Umwälzung eine Zufuhr von atmosphärischen CO₂ erhalten haben, zeigen die Reinkulturen mit CO₂ Begasung bereits nach kurzer Zeit eine Erhöhung der optischen Dichte und damit eine größere Wachstumsrate (Abbildung 24).

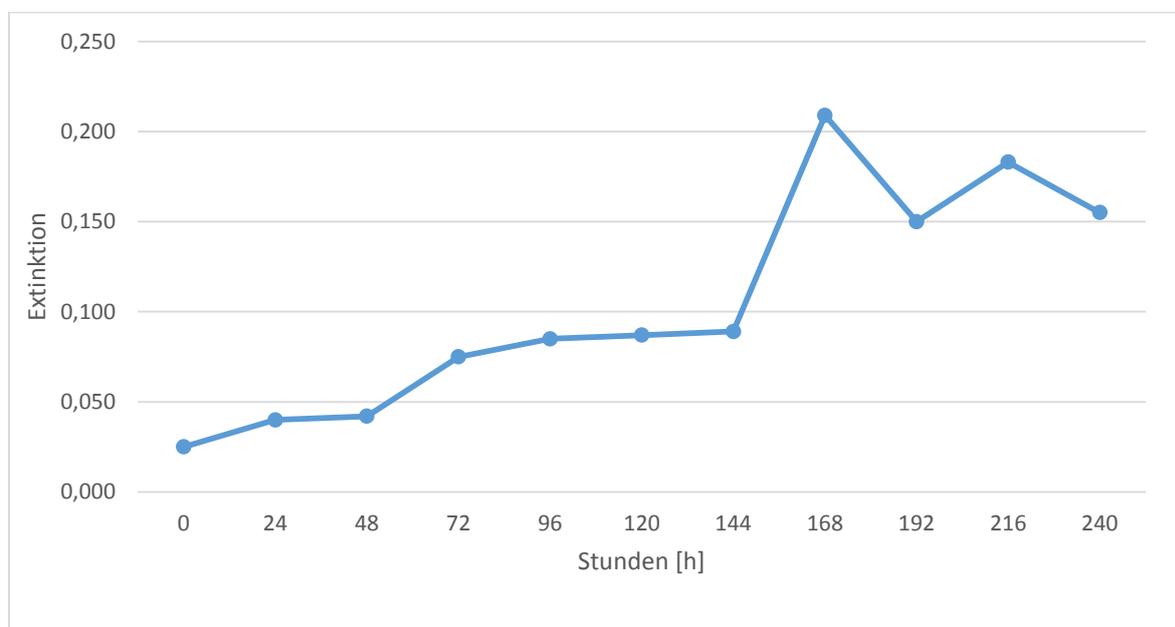


Abbildung 24: Wachstum einer Reinkultur von *Chlorella vulgaris* mit CO₂ Begasung (Quelle K. J. Schulz)

Aus Vorversuchen war bereits bekannt, dass eine Pufferkapazität des Mediums nicht vorhanden ist. Ansätze mit destilliertem Wasser wurden bereits nach mehr als 30 sec Bega-

sung stark sauer (pH 4,03). Deshalb wurde für die folgenden Wachstumsversuche die Begasung auf 3mal täglich 30 sec reduziert. So wurde der pH-Wert im Toleranzbereich der Algen (7-8) gehalten. Mit dieser Begasung Strategie konnten in Ansätzen mit *Chlorella vulgaris* höhere Wachstumsraten innerhalb von 10 Tagen erzielt werden (Abb. 25), während gleichzeitig eine Reduzierung des Ammoniumgehaltes einsetzte (Tab. 7, Probe 1 und 2). Kulturen ohne Wachstum und Erhöhung der optischen Dichte zeigten dieses Absinken nicht.

In Tabelle 7 sind die Ammoniumgehalte in verschiedenen Proben mit 3mal täglich 30 sec CO₂-Begasung über die Zeit zusammengestellt.

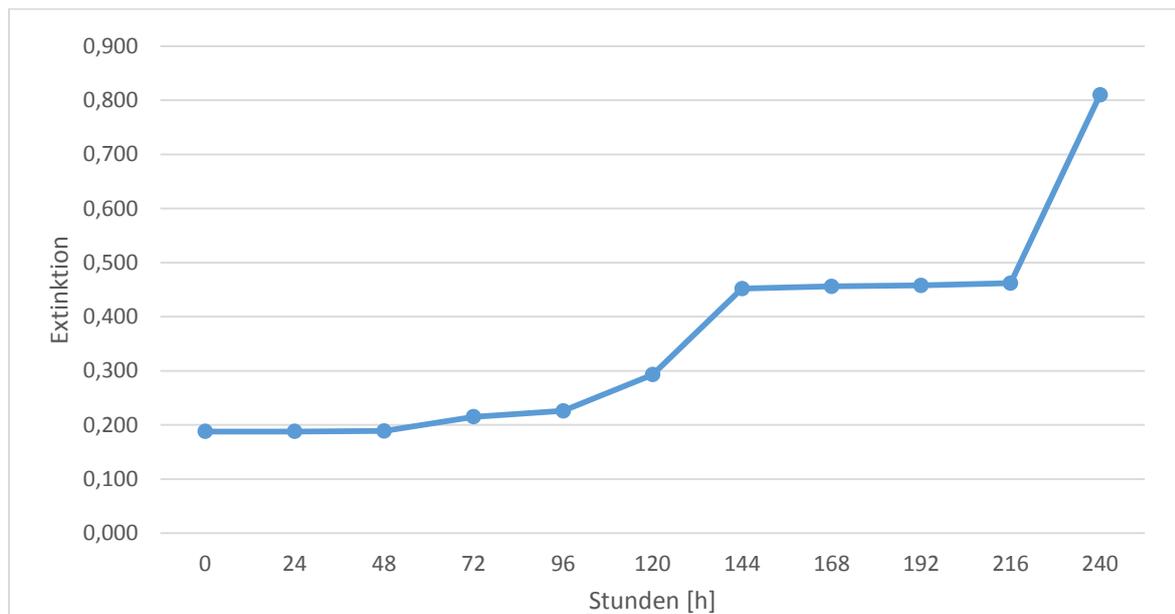


Abbildung 25: *Chlorella vulgaris* mit 30 sec CO₂-Zufuhr (Quelle K. J. Schulz)

In den Reinkulturen der beiden Algenarten (Probe 7 bis 10) wurde kein Sickerwasser zugesetzt, weshalb hier auch kein Ammonium messbar war. Die beiden Negativkontrollen von 10 % Sickerwasser (Probe 11 und 12) zeigen bei gleicher Behandlung nur einen geringen bis gar keinen Verlust von Ammonium an. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die Abnahme des Ammoniums durch das Algenwachstum und die Verwertung durch *Chlorella vulgaris* erfolgte. Nach sieben Tagen zeigten die wachsenden Ansätze eine Stabilisierung des pH-Wertes, der auch von den kurzzeitigen Begasungszyklen nicht mehr ins Wanken gebracht wurde. Innerhalb einer Woche ist also bei wachsenden Kulturen eine stabile Phase zu erreichen, die Biomasse produziert und gleichzeitig Ammonium abbaut. Diese Erkenntnis sollte darauf hin vom Labormaßstab auf die halbtechnische Versuchsanlage auf der Pohlischen Heide übertragen werden. Es wurde gezeigt, dass eine Dauerbegasung kontraproduktiv ist und wohldosierte CO₂-Gaben die Ausbeute erhöhen können.

Tabelle 7: Ammoniumgehalt in Ansätzen mit 3mal täglich 30 sec CO₂

Stunden Proben	NH ₄ ⁺ [mg/L]										
	0	24	48	72	96	120	144	168	192	216	240
1	75	75	75	75	75	75	50	50	50	50	25
2	75	75	75	75	75	50	50	50	50	50	25
3	75	75	75	75	50	50	50	50	50	50	25
4	50	50	50	75	75	50	75	50	50	50	50
5	75	75	75	75	50	50	50	50	50	50	50
6	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	100	100	100	75	75	75	100	75	75	75	75
12	100	100	100	100	75	75	100	75	75	75	100

4.6. Begasung in der Algenrinne

Die Erkenntnisse aus den Laborversuchen wurden auf der halbtechnischen Anlage umgesetzt. Zur Begasung konnten die zehn Segmente der Algenrinne mit CO₂-Einspeisung versorgt (vgl. Abb. 26). Primär war der Einfluss der Begasungsdauer auf den pH-Wert interessant und ob sich der pH-Wert über die Länge der Rinne unterscheidet.

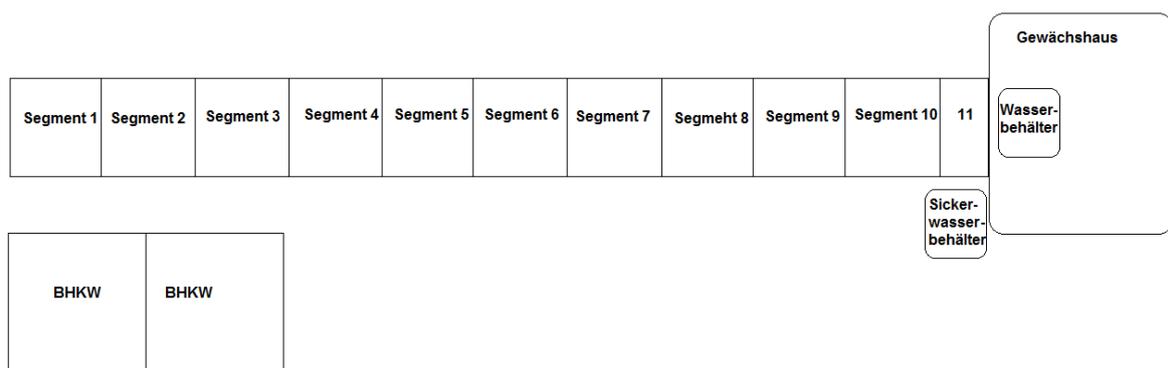


Abbildung 26: Schema der Algenrinne (Quelle K. J. Schulz)

Die Gaszufuhr wurde auf einmal täglich 30 sec. eingestellt. Die gemessenen pH-Werte vor und nach der Begasung unterschieden sich um 0,1, weshalb der Schluss naheliegt, dass die vorhandene Begasungsvorrichtung nicht ausreichend ist, um einen positiven Einfluss auf das Algenwachstum auszuüben. Die Verteilung über die Wassersäule war dabei sehr homogen, sowohl horizontal als auch vertikal. Aufgrund der Jahreszeit und der heißen Witterung

Die Temperatur der Algenrinne zum Zeitpunkt der Messungen lag zwischen 22°C und 31°C, was wiederum im Zusammenhang mit dem hohen pH-Wert ein Ammoniakstripping begünstigt. In Tabelle 8 sind die pH-Werte in der halbertechnischen Algenrinne jeweils vor der Begasung in den einzelnen Segmenten zusammengestellt.

Tabelle 8: pH-Werte an der Algenrinne vor der Begasung

		pH-Wert				
Datum		06.07.2015	10.07.2015	14.07.2015	21.07.2015	28.07.2015
Segment						
1		7,93	7,56	7,91	8,11	7,77
2		7,83	8,01	7,98	8,15	7,92
3		7,71	8,06	8,01	8,11	8,01
4		7,66	8,15	8,04	8,11	7,98
5		7,63	8,14	8,11	8,18	7,97
6		7,75	7,92	8,07	8,17	8,08
7		7,81	7,71	8,11	8,15	8,08
8		7,81	7,95	8,18	8,19	8,13
9		7,82	8,06	8,21	8,18	8,12
10		7,94	8,08	8,15	8,19	8,11

Tabelle 9: Leitfähigkeit der Algenrinne

		Leitfähigkeit [$\mu\text{S/l}$]				
Datum		06.07.2015	10.07.2015	14.07.2015	21.07.2015	28.07.2015
Proben						
1		3,39	3,86	3,92	4,83	4,96
2		3,44	3,82	3,84	4,88	4,98
3		3,44	3,82	3,85	4,89	4,95
4		3,42	3,81	3,85	4,85	4,94
5		3,41	3,82	3,87	4,87	4,92
6		3,41	3,61	3,87	4,83	4,93
7		3,41	3,81	3,86	4,85	4,94
8		3,39	3,74	3,89	4,92	4,93
9		3,39	3,81	3,88	4,89	4,92
10		3,44	3,82	3,91	4,91	4,92

Die Leitfähigkeit der Algenrinne war ebenfalls über die Dauer des Versuchs und über die Länge der Rinne sehr konstant (Tabelle 9). Der leichte Anstieg in der Leitfähigkeit über den Versuchszeitraum kann über die Verdunstung und damit einhergehende Flüssigkeitszufuhr in die Rinne erklärt werden. Dazu im Gegensatz wurden bei ähnlichen Versuchen in den kleinen Algenrinnen auf dem Gelände der-FH Bielefeld, Campus Minden konstante Werte

für Leitfähigkeit in den Parallel-Versuchen gemessen. Da diese aber weniger sonnenexponiert platziert waren, sank der Wert der Leitfähigkeit zum Ende der 4. Woche leicht, während der pH-Wert aufgrund der mangelnden Begasung langsam anstieg. Die gleichzeitige Messung von Ammonium und Nitrat zeigt ein Sinken dieser Werte, während der Sauerstoffgehalt steigt. Daher wird von einem Wachstum der Algen und damit einhergehend einer Aufnahme der Schadstoffe durch diese ausgegangen. Allerdings konnte dieses nicht mit Messungen der optischen Dichte bestätigt werden, da die massive Besiedelung der Algenrinnen durch Mückenlarven die Auswertung erschwerte.

4.7. Erntetechnik

Zur Nutzung der Algenbiomasse für einen vollständigen Kreislauf muss eine praktikable und effiziente Erntetechnik gefunden werden. Dazu wurden verschiedene Eigenschaften der Algen ausgenutzt.

4.7.1. Abstreichgitter

Die Methode nutzt die Eigenschaft des Anheftens an Oberflächen der Algen aus. Das eingehängte Gitter in den Strömungsverlauf der Algenrinne soll die Besiedelung verbessern. Die Ausbeute dieser Methode war allerdings sehr gering und die Algen ließen auch kein Besiedelungsmuster an den Gittern erkennen (Abb. 27).



Abbildung 27: Abtropfgitter nach der Besiedelung, vor Abstreichen und nach dem Abstreichen der Biomasse (Quelle K. J. Schulz)

Die Gitter wurden nach der Inkubationszeit aus der Rinne entnommen, kurz abgetropft und dann zur weiteren Behandlung ins Labor gebraucht. Die eigentliche Ernte erfolgte sowohl nass als im getrockneten Zustand. Es konnten aus den einwöchigen Inkubationszeiten zwischen 25 g und 36 g feuchte Biomasse gewonnen werden. Aus einer durchschnittlichen Biomasse von 32 g konnten allerdings nur 1,12 g Trockengewicht gewonnen werden. Demnach ist die Ausbeute als sehr gering zu betrachten. Zudem zeigte die Verteilung des Algenbewuchses kein klares Muster und erschien eher zufällig. Nur die Schichtung aus einer braunen Schicht zwischen zwei grünen Algenschieden kann als wiederkehrendes Muster betrachtet werden. Die mikroskopische Untersuchung der geernteten Algenmasse zeigte Zellen mit dem Phänotyp von *Chlorella vulgaris*, was dem angeimpften Zellen entspricht. Dieses würde auch der hellgrünen Färbung der zwei oberen und unteren Schichten entsprechen. Die braune Schicht zeigte dagegen bereits während der kurzen Abtropfphase, dass sie nicht fest an das Gitter gebunden war, da sie sich sofort wieder löste und nicht weiter identifiziert werden konnte.

4.7.2. Filtration

Die Filtration der freien Algenbiomasse in der Algenrinne konnte mit einem Volumenmaximum von 50 mL erfolgen. Dabei zeigte sich, dass die verwendeten Filter mit einer mittleren Porengröße zu viel der freien Algenmasse passieren ließen. Eine geringere Porengröße erwies sich auf Grund der langen Filtrierzeit als impraktikabel, während die gewählte Größere in der filtrierten Flüssigkeit eine hohe Grünfärbung zeigte. Somit liegt der Schluss nahe, dass der geringe Teil der freischwebenden Algenmasse mit einer einfachen Filtration nicht zu ernten ist. Da sowohl die Dauer als auch die Ausbeute als negativ bewertet werden, ist eine einfache Filtration für diese Art des Versuchs nicht anwendbar.

4.7.3. Zentrifugation

Zum Nachweis der Machbarkeit und für die tatsächliche Gewinnung von Algenmasse wurde zunächst eine Zellernte mittels Zentrifuge geplant. Der hohe Kostenanteil durch die Anschaffung einer Zentrifuge (Separator) zur Zellernte müsste in einem Folgeprojekt kritisch betrachtet werden. Allerdings zeigten die bisherigen Erntemethoden der eingesetzten Algenkulturen keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die verwendeten Ernte-Volumina von 20 mL bis zu 720 mL zeigen bei einem mittleren Rinnenvolumen der kleinen Rinne von 4x4= 16 L und 2.500 L der großen Algenrinne nur einen kleinen Bruchteil des verwendeten Versuchsansatzes wieder. Eine Vollernte der kleinen Algenrinnen mit 16 L würde mit der vorhandenen Technik eine reine Zentrifugationszeit von 22 Stunden erfordern.

4.8. Langzeitversuche Algenrinne

Die große Algenrinne auf dem Gelände der Pohlschen Heide wurde im Rahmen des Projektes mehrfach mit unterschiedlichen Algen in Reinkultur und Mischung inokuliert und über einen längeren Zeitraum bei den vorherrschenden Umweltbedingungen betrieben. Der

menschliche Einfluss bezog sich dabei nur auf den Betrieb der Umwälzungspumpe, der CO₂-Einspeisung und der Probennahme. Ansonsten war die Algenrinne der Umwelt mit allen Wettereinflüssen ausgesetzt (die entsprechenden Wetteraufzeichnungen in Verbindung mit den verschiedenen Versuchen ist im Anhang aufgeführt).

Im Förderzeitraum 2015/2016 wurden in der Algenrinne 10 verschiedene Versuche mit unterschiedlichem Aufbau betrieben (vgl. Anhang). Die Versuchsdauer lag bei 12 bis 48 Tage mit einer Ausnahme. Über die Wintermonate wurde von Oktober 2015 bis Ende April 2016 die Rinne über 203 Tage mit nur einem Ansatz bei kontinuierlicher CO₂-Begasung und Umwälzung betrieben. In ca. zweiwöchigem Abstand wurde bis zum Beginn der Frostperiode Sickerwasser als Ausgleich für Verdunstung nachgegeben und es wurden regelmäßig Proben genommen und zur Analyse ins Labor gegeben. Ab März 2016 wurde noch zweimal Sickerwasser ergänzt, bevor am 27. April 2016 eine abschließende Untersuchung stattfand. Für sieben der zehn Versuche wurden dicht gewachsene Kulturen von *Chlorella vulgaris* als Ausgangsmaterial verwendet. Zweimal wurde eine eigene Mischung verschiedener Algentypen aus Algenrinnenversuchen und einmal eine Vergleichskultur eines kommerziellen Projektes zur Reinigung von Hausabwässern verwendet, die eigentlich in einer gekühlten Röhren-MAK genutzt wird und sich durch eine einfache Erntetechnik auszeichnet. In diesem Versuchsaufbau wurde die Algenmischung mit hauptsächlich *Scenedesmus* Algen einem höheren biotischen Druck ausgesetzt, da das System offen ist. Die anderen beiden Versuche mit eigener Algenmischung entstammten dagegen der Ringdrainage der Deponie, wodurch die Algen bereits an die Bedingungen innerhalb der Algenrinne angepasst waren. Andere Algenkulturen wurden nicht verwendet, da *Euglena gracilis* bereits im Laborversuch gezeigt hatte, dass sie nicht mehr als 15 % Sickerwasser toleriert und auch damit kaum Wachstum aufweist. Bei 20 % Sickerwasser liegt allerdings die wirtschaftlich tolerable untere Grenze des Versuchsaufbaus.

Alle zehn Versuche erfolgten nach einer vollständigen Leerung und soweit wie möglichen Reinigung der Algenrinne. Eine Verschleppung alter Algenkulturen aus einem vorherigen Versuch sollte vermieden werden, konnte aber auf Grund der baulichen Gegebenheiten nicht ausgeschlossen werden (vgl. Abb. 7). Der Anteil der alten Algenmasse kann aber als irrelevant bzw. ihr Einfluss auf Wachstum und Stoffumsatz als so gering angesehen werden, da die anderen Umwelteinflüsse sowie der Eintrag neuer Mikroorganismen über das Sickerwasser größere Auswirkungen auf den Versuchsablauf und die neue Algenkultur hatten. Der Sickerwasseranteil betrug in allen Versuchen 20 %, also ca. 500 L reines Sickerwasser in 2000 L Frischwasser. Damit war die Algenrinne zu 2/3 ihres Gesamtvolumens gefüllt.

Die Ergebnisse der Algenrinnenversuche werden zunächst nach den einzeln gemessenen Parametern betrachtet und anschließend zusammengefasst. Da die Versuche 1 bis 6 und Nummer 9 mit den gleichen Algen und Mischungsverhältnissen aber unterschiedlichen Umweltbedingungen und CO₂-Begasung und Umwälzung betrieben wurden, werden diese Versuche gemeinsam ausgewertet und Unterschiede hervorgehoben. Die drei anderen Versuche werden damit später verglichen.

4.8.1. pH-Wert

Das Sickerwasser aus der Ringdrainage zeigte über den Untersuchungszeitraum einen pH-Wert von ca. 8,00, der zwischen pH 7,90 und pH 8,37 schwankte. Dadurch war der pH-Wert des Versuchsansatzes in der Algenrinne ebenfalls immer leicht alkalisch. Je nach Versuchsverlauf, insbesondere nach abiotischen Bedingungen, stieg der pH-Wert auch weiter an oder sank ab. In 24h Messungen konnten natürliche Schwankungen von 0,5 pH-Werten im Tageslauf beobachtet werden, wobei die Werte zur Mittags- / Nachmittagszeit stiegen und zum Abend, bzw. zur Nacht wieder abgefallen sind. Dieser Schwankungsverlauf konnte an drei verschiedenen Stellen entlang der Rinne beobachtet werden (vgl. Tabelle 8, Segment 1, 6 und 11). Auch ein parallel durchgeführter Versuch in einem 10 Liter Gefäß mit gleichen Bedingungen zeigte diese natürlichen Schwankungen. Einzig ein ähnlicher Versuch mit einer erhöhten CO₂-Zufuhr zeigte eine andere Schwankung des pH-Wertes, was aber auf den pH-Wert erniedrigenden Effekt des Gases zurückzuführen ist. Die Schwankungen innerhalb einer Tageslänge konnten ebenfalls in den kleineren Rinnen in 3 Parallelen beobachtet werden. In diesem Versuch wurden die Messungen dreimal täglich durchgeführt, über einen Zeitraum von einer Woche.

In der Algenrinne wurden im ersten Versuch über den Zeitraum von 48 Tagen ohne CO₂-Einspeisung ein Anstieg des pH-Wertes auf bis zu pH 9,96 gemessen (Ausgangswert 7,86). Zum Abschluss des Versuchs sank dieser Wert aber wieder auf 7,21 ab. Zeitgleich mit dem Anstieg des pH-Wertes sank der Gehalt an Ammonium-N von 156 mg/ L auf 0 mg/ L, weshalb in diesem Versuch von Ammoniakstripping ausgegangen werden kann. Alle weiteren Versuche erfolgten dann unter CO₂-Begasung und Umwälzung statt, um diesen abiotischen Austrag von Ammonium zu verhindern. In den Folgeversuchen stieg der pH-Wert dann auch unter kurzer CO₂-Begasung nicht mehr über 8,6 an und blieb größtenteils zwischen pH 6,6 und 8,4. In diesem pH-Bereich sollte das vorhandene Ammonium zum größten Teil als NH₄⁺ vorliegen und ein Ammoniakstripping verhindert werden (Klee, 1991).

4.8.2 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit schwankte in allen Rinnenversuchen mit Cv zwischen 1,5 und 3,0 mS/ cm. In konzentrierten Fraktionen der Rinne wie der Schwimmschicht oder den parallel geführten Versuchen im Eimer konnten noch höhere Werte wie 4,1 bis 5,7 mS/ cm gemessen werden. Diese hohen Werten sind zum Teil durch die hohen Leitfähigkeitswerte des Sickerwassers mit 14 bis 20 mS/ cm zu erklären. Andererseits sind in diesen Gefäßen bzw. Fraktionen der Algenrinne eine hohe Konzentration von Materie jeglicher Art wie Algen, Feststoffe und anhaftende Bakterien zu finden, die die Leitfähigkeit mittels ihres Stoffwechsels und veränderter Strömungsbedingungen beeinflussen.

4.8.3 Stickstoffverbindungen

Auch in der Algenrinne wurden die drei Stickstoffkomponenten Ammonium, Nitrat und Nitrit in die Messungen mit einbezogen. Der Nitritgehalt zeigte sich in allen Versuchen mit Cv als sehr gering mit Werten zwischen 0,01 und 0,28 mg/ L oder auch nicht nachweisbar. Nur

drei Werte zeigten unabhängig voneinander und von anderen Ereignissen eine Nitrit-Konzentration von 0,61 sowie 0,67 und 1,22 mg/ L. Davor oder danach waren die Messwerte wieder gering oder unterhalb der Bestimmungsgrenze. Durch das Sickerwasser selbst wurde kaum oder kein Nitrit eingebracht. Die Nitrit-Bildung kann auf eine unvollständige Nitrifikation zurückgeführt werden.

Nitrat wurde ebenfalls durch das Sickerwasser in nur sehr geringer Konzentration eingebracht. Der Nitratgehalt im Sickerwasser schwankte zwar, lag aber immer unter 5,7 mg/ L. In den sieben Langzeitversuchen mit Cv an der Algenrinne wurden Messwerte von unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,21 mg/ L bis zu 50 mg/ L gemessen. Die direkte Messung vor und nach Zugabe von Sickerwasser während der Langzeitversuche zeigte ein leichtes Absinken nach der Zugabe, was auf einen Verdünnungseffekt schließen lässt. Erhöhte Nitratwerte in den Versuchen scheinen demnach auf Stoffwechselprozesse innerhalb der Algenrinne zurück zu führen sein.

Im Langzeitversuch Nr. 5 über 203 Tage wurden zu Beginn im Herbst 0,88 mg/ L gemessen und am Ende im Frühjahr 2016 lag der Nitratgehalt bei bis zu 50 mg/ L. Zeitgleich stieg auch der pH-Wert auf über 9,2 an. Der Ammoniumgehalt sank zwischenzeitlich, was auf Grund des hohen pH-Werts über Ammoniakstripping erfolgt sein kann. Kürzere Versuche zeigten wesentlich geringere Nitratwerte, wodurch die Erhöhung des Nitratgehalts im Langzeitversuch vermutlich auf mikrobielle Aktivität zurückzuführen ist. Eine Nitrifikation, die sich in der langen Versuchsdauer stabilisiert hat, könnte der Grund sein. Da an der großen Algenrinne keine Sauerstoffkonzentrationen gemessen wurden, kann keine Aussage über oxische oder anoxische Zonen getroffen werden. Allerdings sollten die Umwälzung der Anlage und die geringe Tiefe bei großer Oberfläche genügend Sauerstoff in alle Bereiche leiten. In kürzeren Versuchen mit Cv war ein massiver pH-Wert Anstieg und zeitgleicher Anstieg des Nitratgehalts nicht mehr zu beobachten und bei Versuchen mit der eigenen Algenmischung, die auch später in den kleinen Parallelrinnen benutzt wurde, bleibt der Nitratgehalt weitgehend konstant, während der Ammoniumgehalt abfiel.

Da in den Langzeitversuchen immer wieder Sickerwasser nachgefüllt wurde, schwankten die Werte für Ammonium stark. So wurde beispielsweise in Versuch Nr. 5 vor Zugabe des Sickerwassers am 11.11.2015 ein Ammoniumgehalt von 25 mg/ L gemessen und wies damit eine sinkende Tendenz zu den Vorwerten auf. Nach Zugabe von 200 L Wasser und 250 L Sickerwasser war der Ammoniumgehalt auf 300 mg/ L gestiegen, der Nitratwert und der pH-Wert waren dagegen gesunken.

4.8.4 CSB und TOC

Im Langzeitversuch mit Cv über 203 Tage stiegen der CSB und der TOC kontinuierlich an. In Versuchen mit anderen Algenmischungen sinken die CSB- und TOC-Werte oder bleiben gleich. Insgesamt ließen die Ergebnisse aber keine schlüssige Erklärung zu, da die Schwankungen teilweise sehr hoch waren. Anscheinend ist das System der großen Algenrinne auch durch die wiederholte Zugabe von Sickerwasser in seinen Werten sehr schwankend. Den-

noch konnten gerade in den letzten Versuchen an der großen Algenrinne gezeigt werden, dass auch bei steigenden oder gleichbleibenden CSB der Ammoniumgehalt signifikant sinkt

4.9. Versuche an Parallelrinnen im Labormaßstab

Neben der großen Algenrinne mit einem Gesamtvolumen bzw. Versuchsvolumen von 2,5 m³ wurden für Parallelversuche vier kleinere Algenrinnen mit insgesamt 16 L Volumen eingesetzt. Sie wurden unter möglichst gleichen Bedingungen im Bereich der FH Bielefeld, Campus Minden, direkt nebeneinander und mit gleicher Beschattung bzw. Sonneneinstrahlungsdauer aufgestellt, während ein Eintrag von Biomasse durch herabfallenden Blätter und Äste der umliegenden Bäume weitgehend vermieden wurde. Über einen Zeitraum von vier Wochen wurden im Sommer 2016 drei verschiedene Versuche über die Dauer von einer Woche in Versuch eins und zwei und über zwei Wochen in Versuch drei durchgeführt. Die Versuchsreihe sollte zeigen, ob sich die Ergebnisse in offenen Systemen wie einer Algenrinne bei gleichen Bedingungen wiederholen lassen und somit eine gewisse Gleichförmigkeit bei den Versuchen zu erwarten ist, oder, ob jeder Durchlauf in einem offenen System ein zufälliges Produkt ist.



Abbildung 28: Algenrinne zu Beginn und Ende Woche 1 (Quelle T. Egemann)

Der Versuchszeitraum lag zwar im Sommer, die Temperaturen und Wetterbedingungen waren aber trotzdem in den vier Wochen der Messungen sehr unterschiedlich. Es wurden die Parameter Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Nitrat, Nitrit, Ammonium, TOC und CSB in der Rinne sowie die Temperatur innen und außen gemessen. Sauerstoff, pH-Wert, Leitfähigkeit und Temperatur wurden dreimal täglich gemessen (vormittags, früher Nachmittag und früher Abend). Die anderen Parameter dagegen nur an Tag 1, 3 und 5 einmalig am Morgen erfasst. Abbildung 28 zeigt die Laboralgenrinne im Betrieb.

4.9.1 Versuch zur Parallelität der Rinnen

Die erste Versuchswoche zeichnete sich durch sommerliches Wetter und eine Durchschnittstemperatur von 25,1°C aus. Der Versuchsansatz in den Rinnen erreichte aufgrund der Sonneneinstrahlung zeitweilig bis zu 38°C in der Mittagszeit, während die Temperatur in den Morgenstunden auf 20°C absank. Aufgrund des geringen Volumens von 16 L und der fehlenden Beschattung zu manchen Tageszeiten konnte es zu diesen starken Schwankungen innerhalb eines Tages kommen. Dennoch wurden die hohen Schwankungen von den Algen toleriert und es konnte ein Wachstum der Algen beobachtet werden (s. Abb. 27). Die Ansätze waren in allen drei Rinnen gleich. Es wurden 12,8 L Leitungswasser mit 3,2 L Sickerwasser und 0,5 L einer gut gewachsenen Algenmischung aus Versuch 10 an der großen Algenrinne angesetzt. Diese Mischung bestand neben *Euglena gracilis* und *Chlorella vulgaris* aus verschiedenen anderen Mikroalgen, die mittels der zur Verfügung stehenden Methoden nicht weiter identifiziert werden konnten. Sie hatte sich aber als äußerst robust und schnell wachsend in den vorherigen Versuchen erwiesen und sollte für folgende Projekte genauer molekularbiologisch identifiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit war das aber leider nicht möglich. Die mikroskopische Kontrolle zeigte diverse Zellen von *Euglena* sp. und *Chlorella* sp. sowie Zellkonsortien der Art Cyanobakterien (Abb. 29).

Durch das 20 % Sickerwasser war die Leitfähigkeit zu Beginn des Versuchs mit fast 2.400 µS/cm hoch, sank aber im Verlauf der Woche auf ca. 1700 µS/cm in allen drei Rinnen. Die Messwerte der drei Rinne zeigen dabei eine hohe Übereinstimmung (Abb. 30), welches sich auch bei den Messwerten für pH-Wert; Sauerstoffgehalt und Temperatur widerspiegelt (Abb. 31, 32, 33). Somit konnte bereits mittels dieser Messungen eine Gleichförmigkeit der Parallelversuche an den Rinnen bewiesen werden. Kleine Unterschiede und Schwankungen, wie die Abweichung von 0,28 pH-Einheiten nach 29 Stunden kann durch die leichten Unterschiede in den Standortbedingungen (z.B. Länge der Sonneneinstrahlungsdauer) erklärt werden.

Neben der Parallelität der Versuchsrinnen ist gleichzeitig ein Wachstum der Algen zu erkennen. In Abbildung 28 sieht man die Algenrinnen zu Beginn und zum Ende der Woche. Die Färbung des Mediums ist von braun zu grün übergegangen und es sind Blasen an der Oberfläche zu erkennen. Diese zeigen eine Gasproduktion an. In diesem Fall kann von Sauerstoff ausgegangen werden, da ab Tag 4 des Versuchs keine Messung der Sauerstoffkonzentration mehr möglich war. Sie übertraf die Obergrenze der Sauerstoffelektrode von 20 mg/L. Auf grund des hohen Sauerstoffgehalts und des fehlenden Geruchs kann eine Bildung von Faulgasen relativ sicher ausgeschlossen werden.

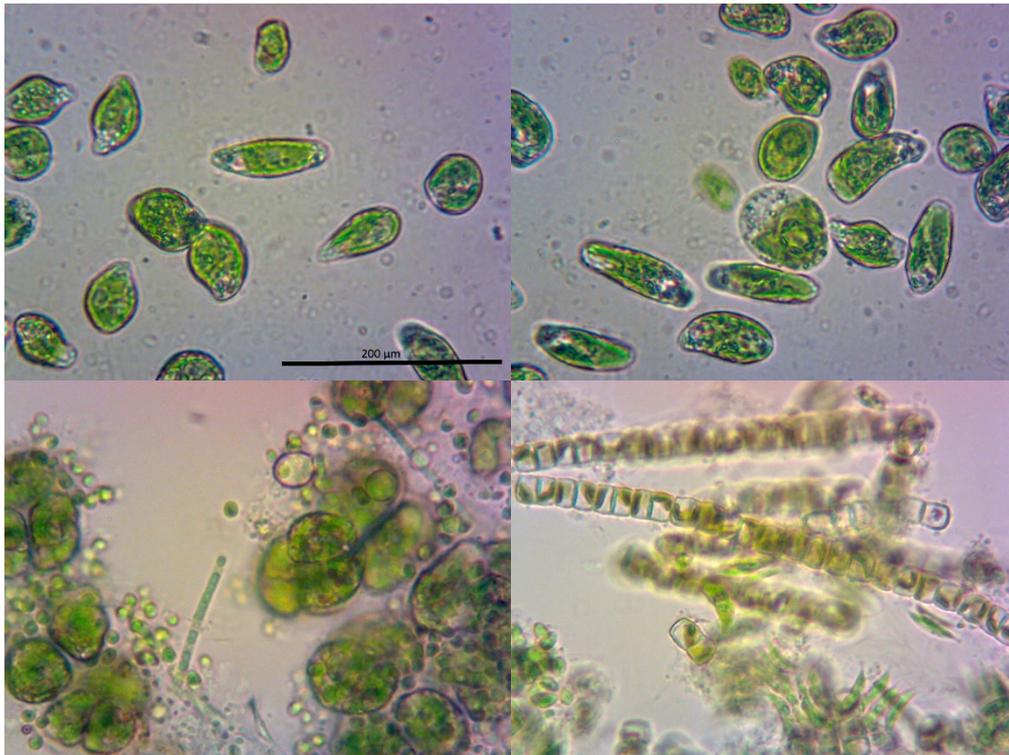


Abbildung 29: Mikroskopische Aufnahmen der Algenmischung, Skalierung gilt für alle Aufnahmen (Quelle N. Winkelmann)

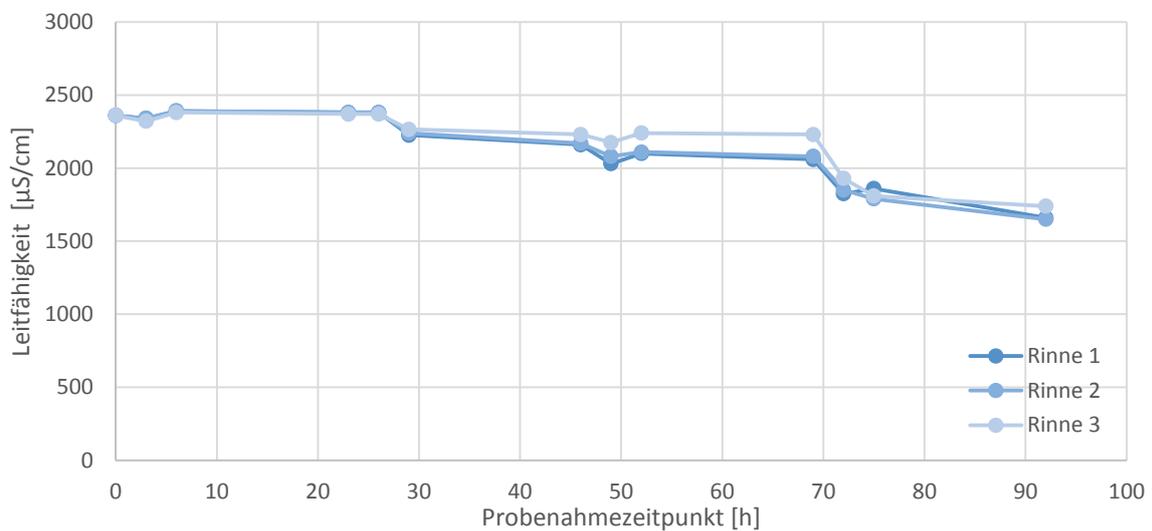


Abbildung 30: Veränderung der Leitfähigkeit in Woche 1 (Quelle T. Egemann)

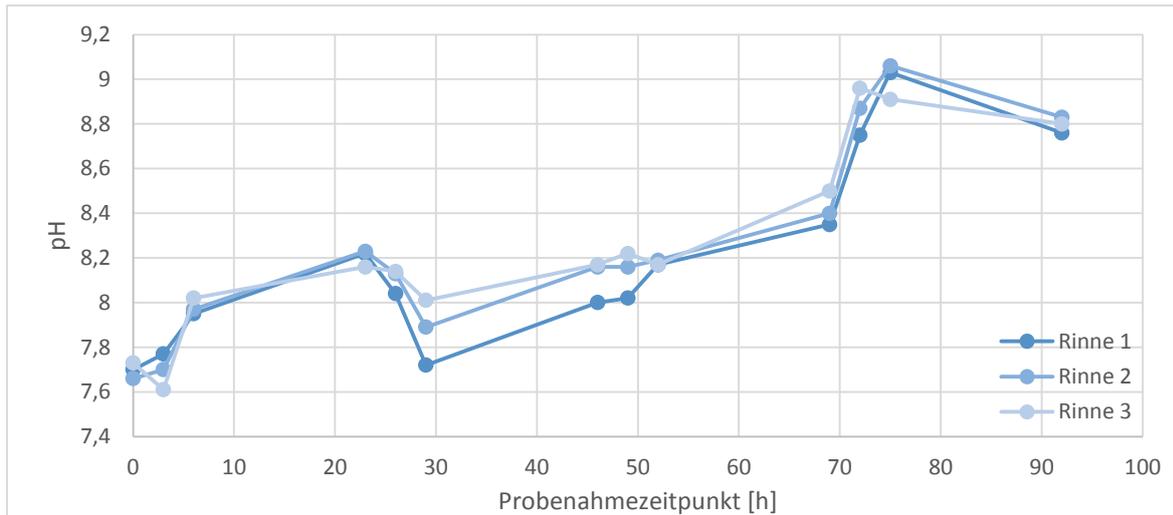


Abbildung 31: Änderung des pH-Wertes in Woche 1 (Quelle T. Egemann)

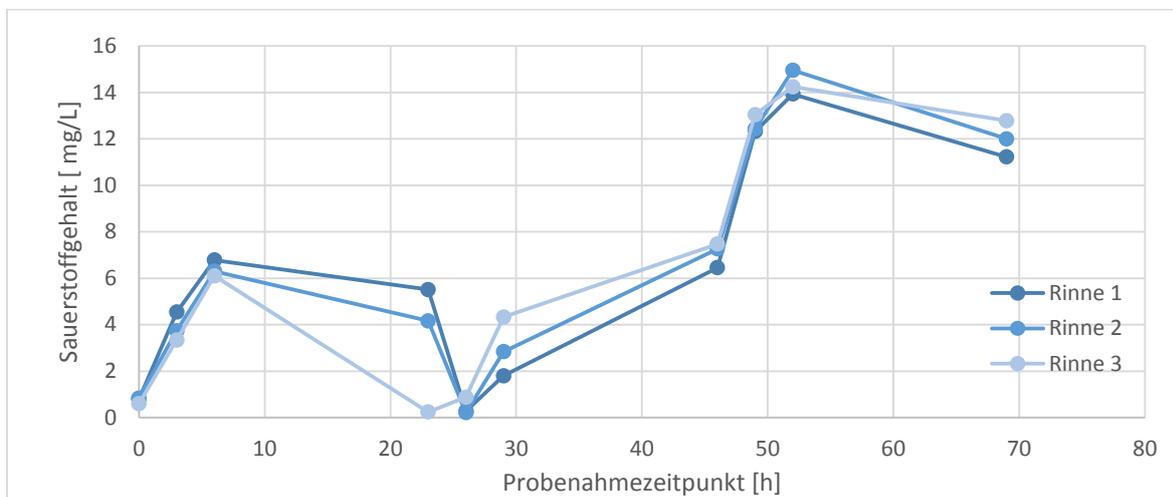


Abbildung 32: Änderung des Sauerstoffgehalts in Woche 1 (Quelle T. Egemann)

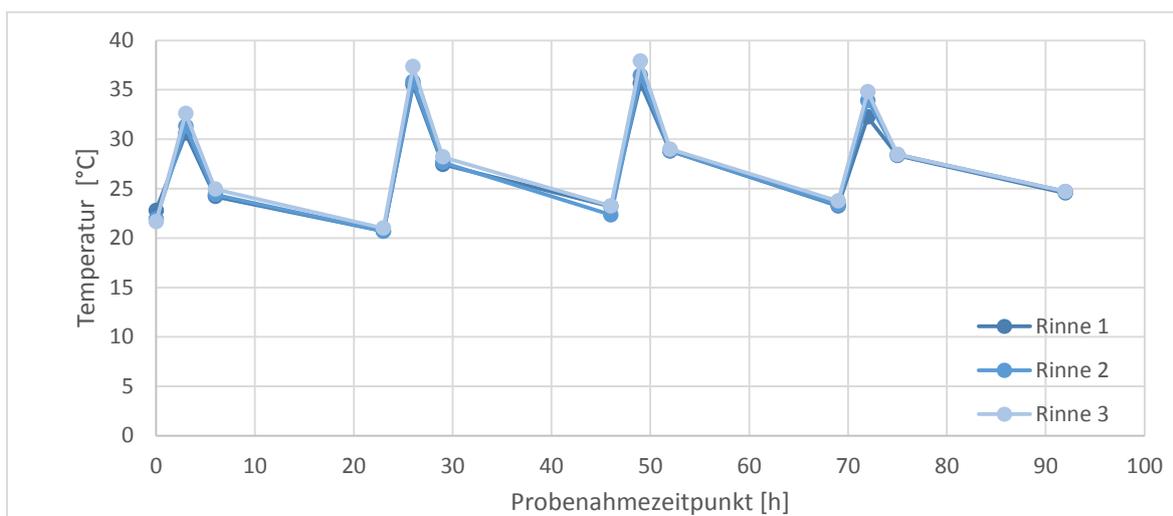


Abbildung 33: Veränderung der Temperatur in den Rinnen (Quelle T. Egemann)

Neben dem Wachstum der Algen zeigen sich noch weitere signifikante Veränderungen. Während die Leitfähigkeit absinkt, steigt der pH-Wert langsam in allen drei Rinnen von ca. 7,2 auf 8,9 an. Dieser parallele Anstieg wurde ebenfalls in den Versuchen im Labor und an der großen Algenrinne gemessen und wurde dort im Zusammenhang mit Algenwachstum beobachtet. Durch den koordinierten Eintrag von technischem CO₂ lässt sich dieser Anstieg aber kontrollieren und auch verhindern. Ein zu hoher pH-Wert würde Ammoniakstripping begünstigen, was in diesem Versuch aber weitestgehend verhindert werden sollte. Bei einem pH-Wert von 9,0 liegt das Gleichgewicht zwischen Ammonium (NH₄⁺) und dem für Wasserorganismen schädlichen Ammoniak (NH₃) bei 70 % zu 30 %, wobei aber auch die Temperatur einen hohen Einfluss hat. Durch den hohen Sauerstoffgehalt wird diese Wirkung aber abgemildert (Klee, 1991, Angewandte Hydrobiologie). Die geringe Pufferwirkung des verwendeten Mediums begünstigt wiederum einen schnellen Anstieg des pH-Wertes und damit eine Ausgasung des Ammoniaks.

Im Verlauf der Versuchswoche wurden an drei Tagen Proben aus den Rinnen auf Nitrat, Nitrit, Ammonium, CSB und TOC untersucht. Die Stickstoffverbindungen Nitrat und Ammonium waren zu Beginn der Versuchswoche in allen Rinnen gleich hoch. Der Gehalt an Nitrat liegt mit 0,6 mg/L weit unter der Grenze für Trinkwasser und sinkt im Laufe der Woche noch weiter auf bis zu 0,22 mg/L. Das im Verhältnis dazu gebildete Nitrit steigt von 0,01 mg/L auf 0,49 mg/L und überschreitet damit den Grenzwert für Trinkwasser. Da über den gesamten Zeitraum aber eine hohe Sauerstoffkonzentration zu messen war, kann eine Denitrifikation, die nur unter sauerstoffarmen bzw. anoxischen Bedingungen stattfindet, im Rahmen dieser Versuchsreihe nur in Biofilmen in strömungsarmen Teilen der Rinnen entstanden sein. Das verwendete Sickerwasser wies allein einen Nitritgehalt von 0,42 mg/L auf und hätte deswegen in einer 20 % Verdünnung 0,084 mg/L ausmachen dürfen. Weshalb der Nitritgehalt aber am Ende des Versuchs höher liegt, könnte auf eine Denitrifikation in anoxischen Biofilmen zurückgeführt werden (Abb. 34). Der Ammoniumgehalt liegt dagegen mit 76 mg/L weit über dem Einleitgrenzwert für Gewässer. Im Verlauf der Versuchswoche sinkt dieser Wert aber in allen drei Rinnen auf unter 1 mg/L. Das ist teilweise auf Nitrifikation bzw. auf ein Ammoniakstripping zurückzuführen. In der Bilanzierung Ammonium-Nitrat/-Nitrit- N_{organisch}(N_{org.}) wurde weniger als 80 % des Stickstoffs gefunden. Das bestätigt die Annahme des gasförmigen Entweichens des Stickstoffs als Ammoniak. (vgl. Abb. 34 und 35).

In der ersten Versuchswoche wurde auch der CSB und der TOC der drei Rinnen bestimmt. Entgegen der Erwartungen sanken die Werte dabei nicht, sondern stiegen nach einer kurzen Phase des Sinkens wieder an. Der Grund dafür könnte allerdings im technischen Ablauf der letzten Probenahme liegen, da beim Entleeren der Rinnen auch die Wände und Ränder der Rinnen mit einem Spachtel abgeschabt wurden, wodurch bereits gebundene Stoffe wieder freigesetzt werden konnten. In den beiden nachfolgenden Versuchen sanken sowohl der CSB als auch der TOC erwartungsgemäß (Abbildung 36 a+b).

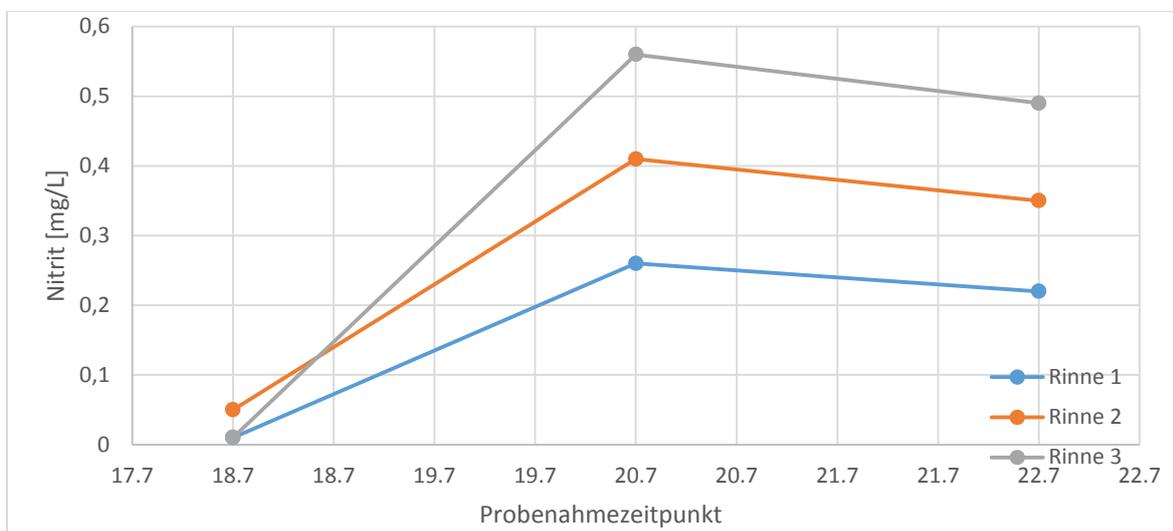
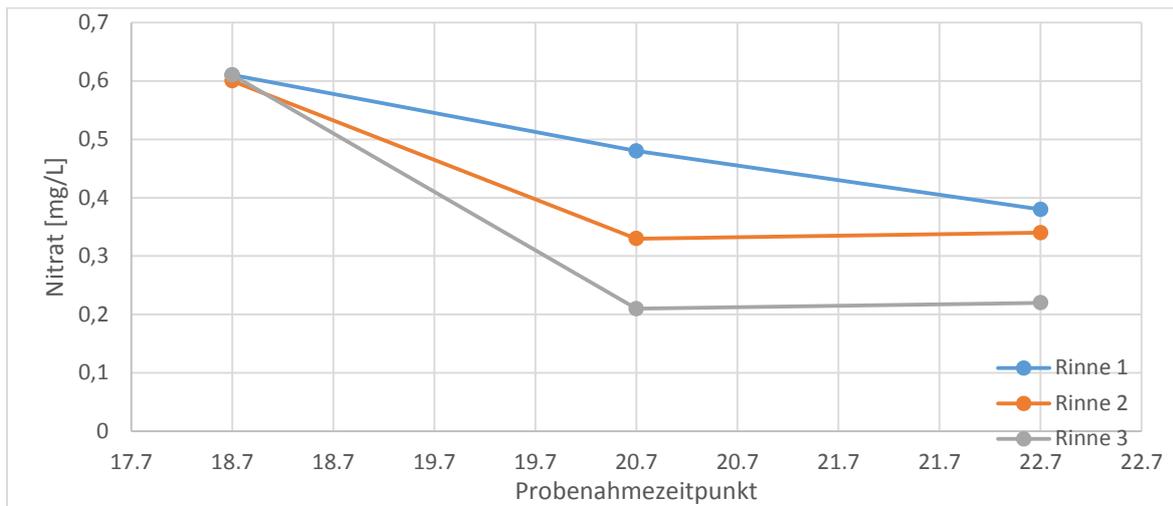


Abbildung 34a+b: Nitrat- und Nitritgehalt im Verlauf Woche 1 (Quelle T. Egemann)

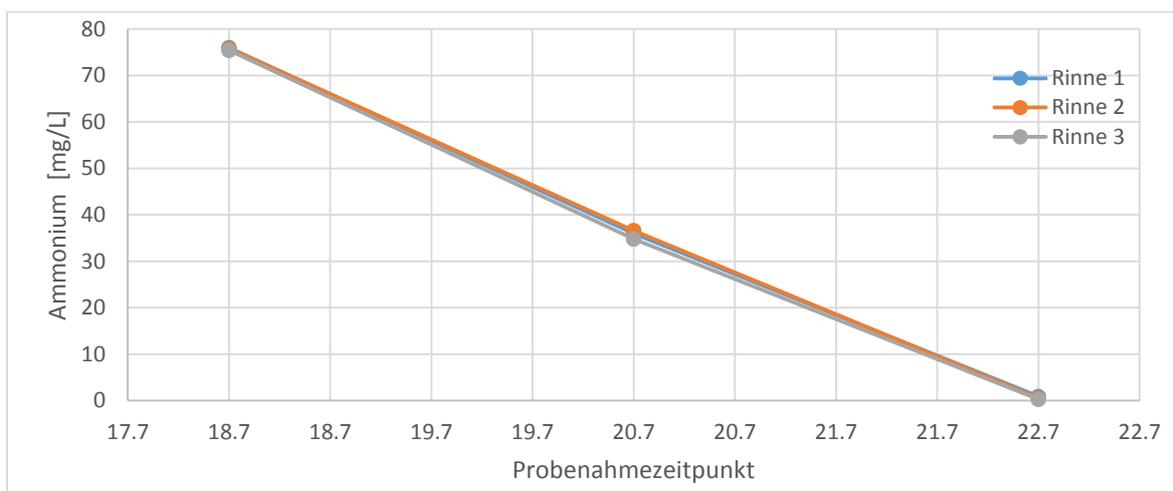


Abbildung 35: Ammoniumgehalt in Woche 1 (Quelle T. Egemann)

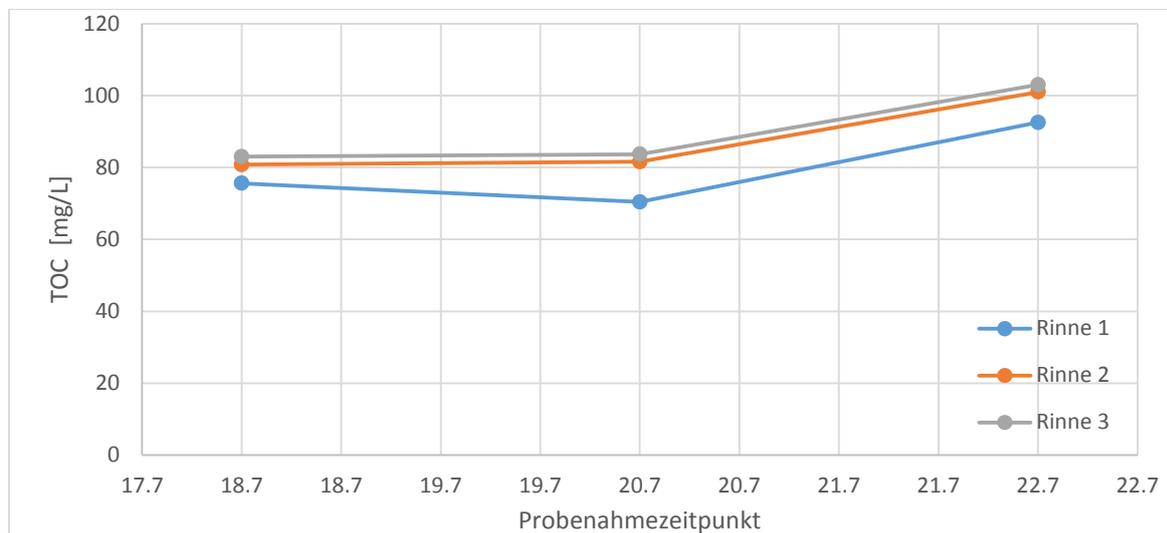
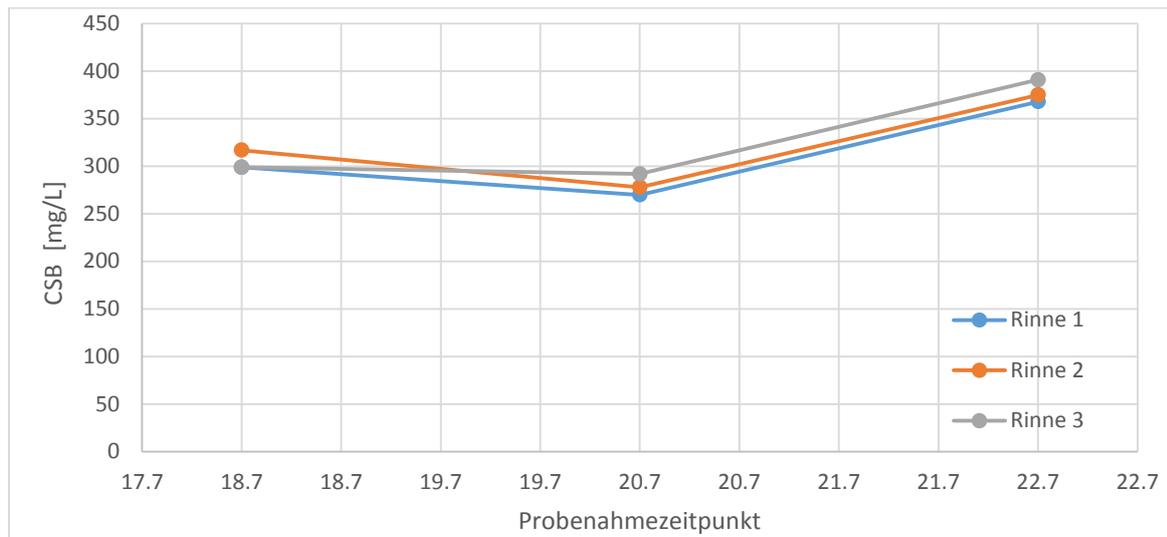


Abbildung 36a+b: CSB und TOC in Woche 1 (Quelle T. Egemann)

4.9.2 Unterschiedliche Sickerwasserkonzentrationen in Parallelrinnen

Die zweite Versuchswoche an den kleinen Rinnen erfolgte mit unterschiedlichen Konzentrationen von 50 %, 25 % und 12,5 % Sickerwasser. Damit steht das Ergebnis jeder Rinne für sich allein, sollte aber durch die in der ersten Versuchswoche nachgewiesene Parallelität vergleichbar sein. Die Umweltbedingungen waren in der Zeit vom 25.07.2016 bis 29.07.2016 mit einer Durchschnittstemperatur außen von 21,8°C zwar etwas kühler, aber vergleichbar gut in Bezug auf die Sonneneinstrahlung. Durch den hohen Anteil an Sickerwasser in Rinne 1 war hier allerdings durch die dunkle Färbung des Sickerwassers mit einer Eigenbeschattung bzw. eventuell Filterung des einfallenden Lichtes zu rechnen.

Alle anderen Messungen erfolgten wie zuvor in Woche 1, zum Teil dreimal täglich bzw. dreimal im Verlauf der Woche. Durch die unterschiedlichen Ansätze war eine Parallelität

der Werte nicht mehr gegeben. Auch spiegelt sich das Verhältnis der Verdünnung des Sickerwassers nicht unweigerlich in den Messwerten wieder.

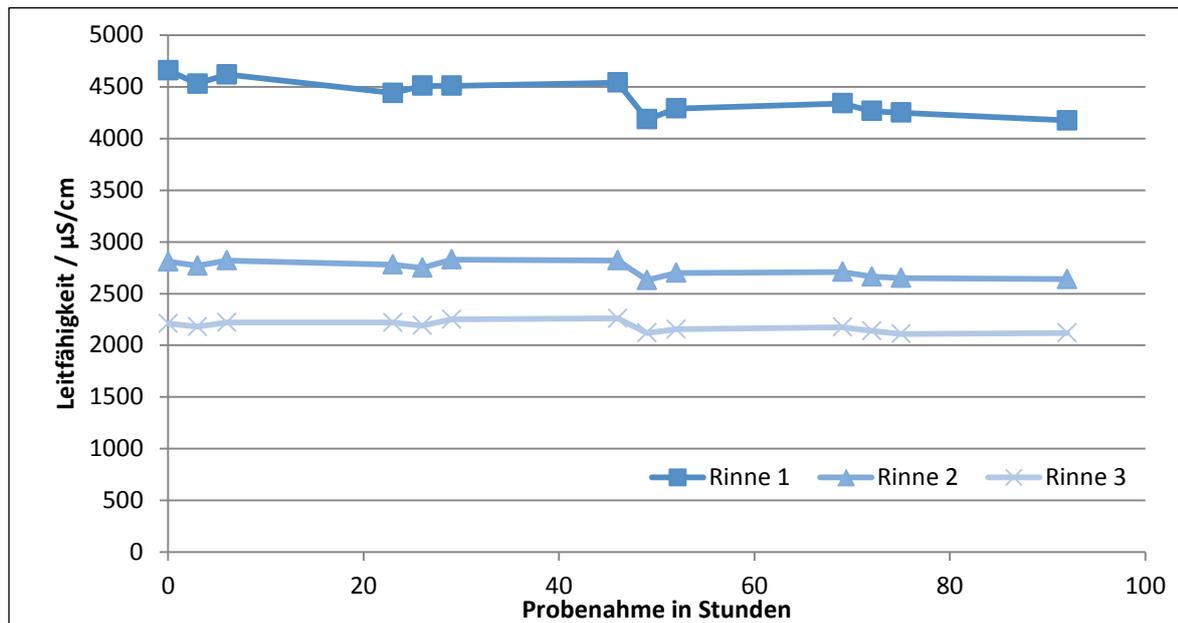


Abbildung 37: Leitfähigkeit in Woche 2 (Quelle T. Egemann)

Die Leitfähigkeit (Abb. 37) war für die hohe Sickerwasserkonzentration wesentlich höher als für die beiden niedrigeren Konzentrationen. Dennoch lag der Wert beim 50 % Sickerwasseransatz nicht doppelt so hoch wie bei 25 % oder 12,5 % Sickerwasser. Der Unterschied von Rinne 2 zu 3 fiel noch viel geringer aus. Auch sank die Leitfähigkeit in allen Ansätzen im Verlauf des Experiments. Die Abnahme war aber bei der hohen Konzentration wesentlich deutlicher als bei geringeren Sickerwasseranteilen. Da als Grund für die Abnahme eine Aufnahme durch Mikroorganismen und ein damit verbundenes Wachstum im Vorfeld vermutet wurde, ist eine höhere Aktivität bei höherem Sickerwasseranteil nicht erwartet worden. Der Grund für die Abnahme der Leitfähigkeit kann somit auch in abiotischen Faktoren begründet liegen. Zeitgleich stiegen aber die Werte des Sauerstoffgehalts (Abb. 39) und der pH-Wert (Abb. 40). Der Sauerstoffgehalt zeigte einen Anstieg auf bis zu 16 mg/L in Rinne 3 und nach einer Lag-Phase von 46 Stunden zeigte auch Rinne 1 einen deutlichen Anstieg des Sauerstoffgehalts auf 7,98 mg/L. Der Anstieg in Rinne 2 erfolgte zwar nicht ganz so schnell wie in Rinne 3, aber nach 92 Stunden konnten auch hier bis zu 12,85 mg/L erreicht werden. Diese Anstiege können als biologische Aktivität innerhalb der Rinnen gewertet werden. Welcher Organismus dafür verantwortlich ist, lässt sich aber so noch nicht sagen. Biomassezuwachs konnte in den Rinnen nur im geringen Maße beobachtet werden (siehe Abb. 38 oben und unten im Vergleich) und war bei Weitem nicht so groß wie beim Versuch in der ersten Woche. Allerdings betrug der Temperaturunterschied zwischen den beiden Wochen auch 3,4 °C, was durchaus einen Einfluss auf die Wachstumsrate und die Stoffwechselprozesse hatte. Der pH-Wert stieg in allen drei Rinnen kontinuierlich an, allerdings zeigte Rinne 3 mit der geringsten Sickerwasserkonzentration den höchsten Anstieg um fast einen ganzen pH-Wert während Rinne 1 nur um 0,5 pH-Einheiten anstieg.

Dieses scheint wiederum ein Indiz für eine mikrobiologische Aktivität innerhalb der Rinnen zu sein.



Abbildung 38a+b: Rinne zu Beginn(o) und Ende(u) von Woche 2 (Quelle T. Egemann)

Die weiteren Untersuchungen im Abstand von zwei Tagen im Labor des AML zeigten die Gehalte an Nitrat, Nitrit, Ammonium, CSB und TOC. Für die letzte Messung wurden die Rinnen komplett entleert und auch Reste von den Wänden der Rinne entnommen. So zeigten alle Rinnen einen Abfall des Nitratgehalts auf fast 0 mg/L. Allerdings zeigte Rinne 3 am fünften Tag plötzlich eine Erhöhung des Nitratgehalts auf einen höheren Wert als den Ausgangswert. Die Messung des Nitritgehalts zeigte wiederum einen kaum messbaren Wert zu Beginn und anschließend einen starken Anstieg auf das 4- bis 9-fache. Da der Ammoniumgehalt in allen drei Rinnen wie erwartet rapide gesunken war, ist das wie oben erwähnt auf Nitrifikation und Ammoniakstripping zurückzuführen. Zeitgleich sank auch der TOC und CSB in Rinne 2 und 3, Rinne 1 mit der höchsten Konzentration an Sickerwasser zeigte dagegen in beiden Messungen eine Erhöhung der der TOC- und CSB-Werte, was wiederum auf eine Verunreinigung schließen ließ. Da es in Rinne 1 im Verlauf der Versuchswoche zu einem massiven Befall mit Mückenlarven kam, kann an dieser Stelle auf eine Verunreinigung von außen geschlossen werden.

In Abbildung 39 und 40 ist der Sauerstoffgehalt bzw. der pH-Wert, in Abbildung 41 die Stickstoffwerte und in Abb. 42 sind der CSB und TOC in der Versuchswoche 2 über die Zeit dargestellt.

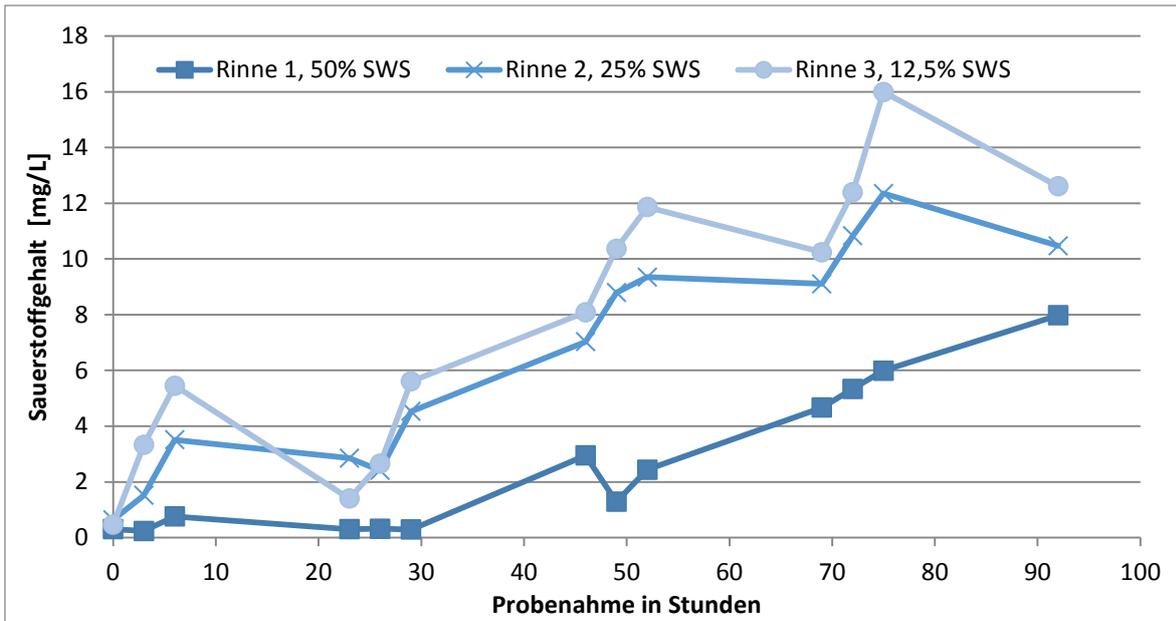


Abbildung 39: Sauerstoffgehalt in Woche 2 (Quelle T. Egemann)

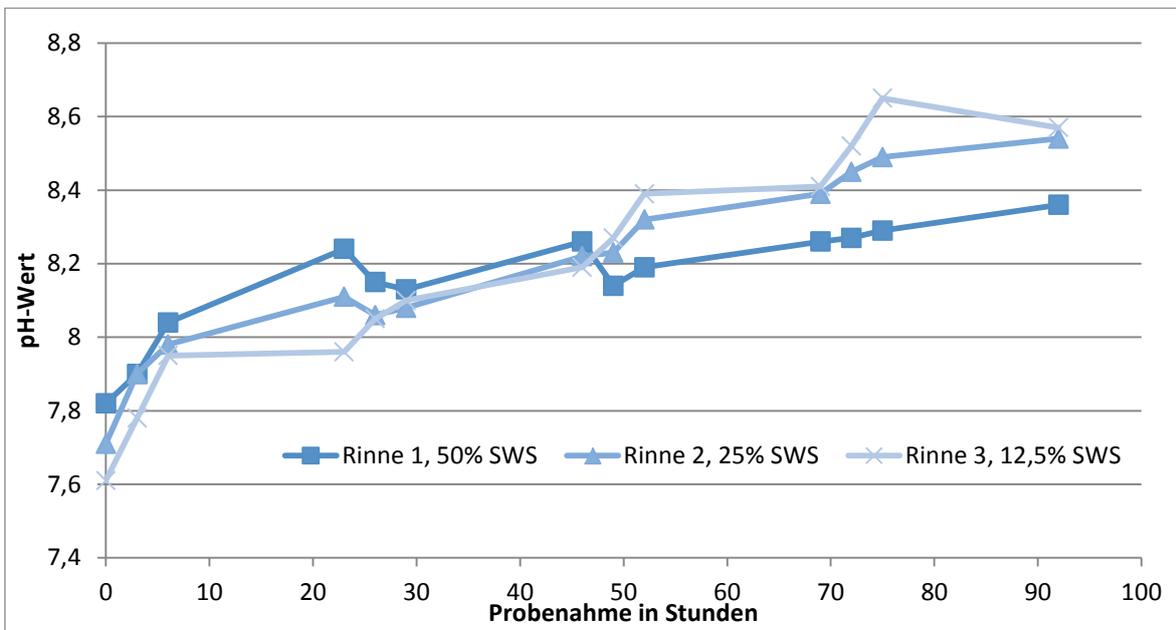


Abbildung 40: pH-Wert in Woche 2 (Quelle T. Egemann)

Die Aussagekraft von Rinne 1 und 3 war aufgrund der abweichenden Messergebnisse gering und mit Zweifeln behaftet. Rinne 2 mit einem Sickerwasseranteil von 25 % zeigte hingegen die erwarteten Ergebnisse. Deshalb wurde diese Konzentration für die abschließende Versuchsreihe in Woche 3 und 4 gewählt, sowie die Konzentration von 20 % aus Woche 1. Die Wassertemperatur in den Rinnen war auch in Woche 2 in allen Rinnen fast identisch und zeigte somit, dass die abiotischen Bedingungen innerhalb des Versuchsaufbaus konstant sind.

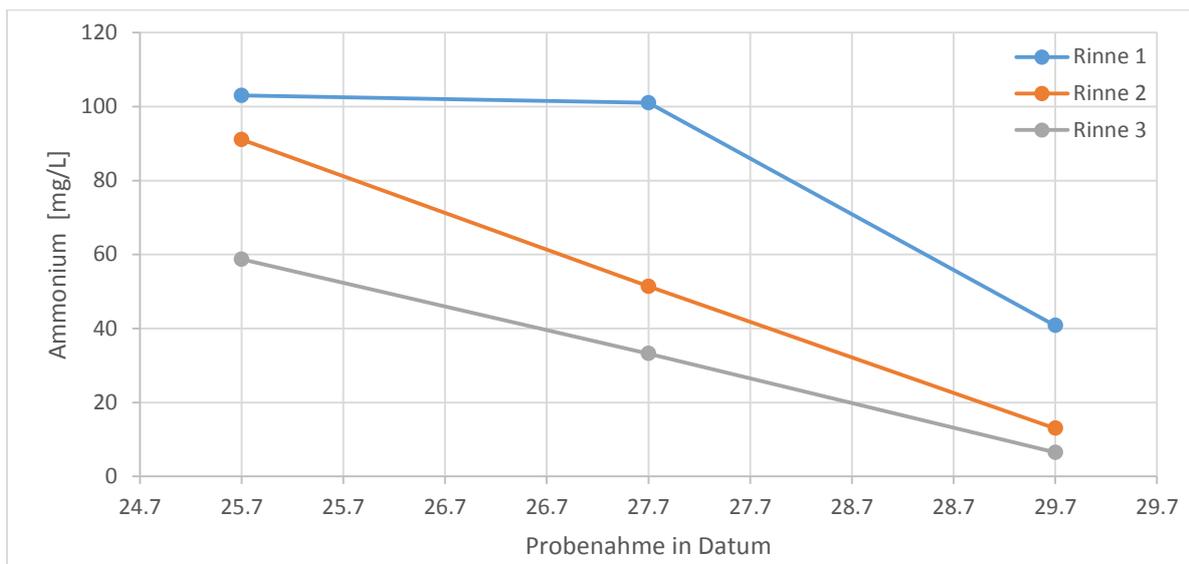
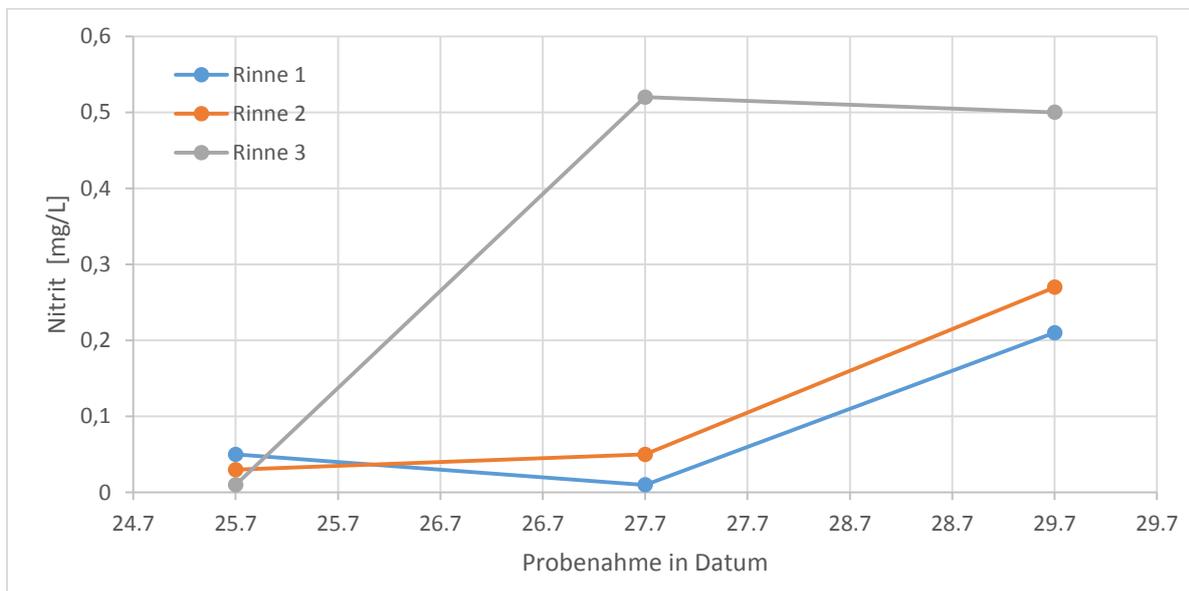
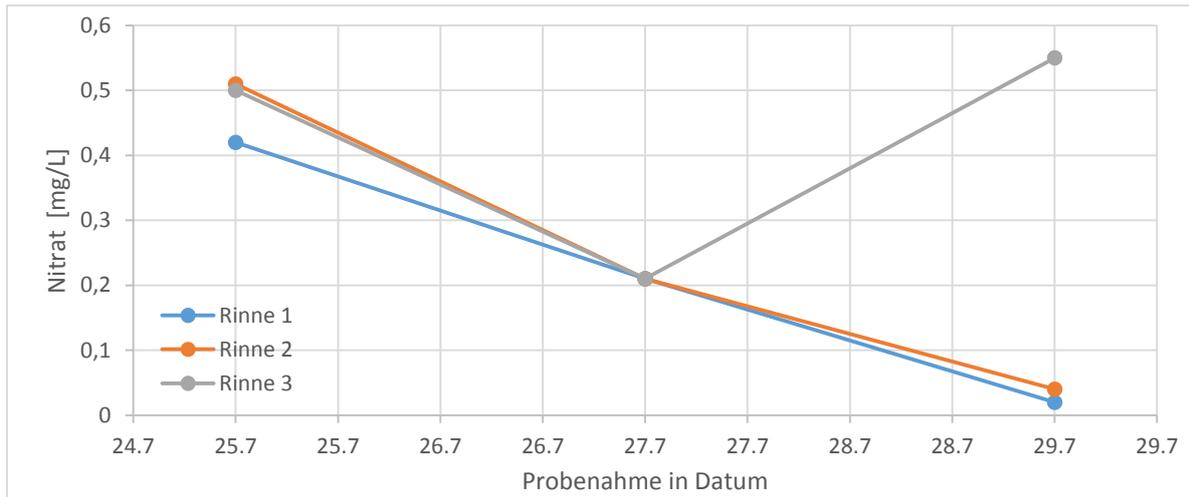


Abbildung 41a-c: Werte der Stickstoffkomponenten in Woche 2 (Quelle T. Egemann)

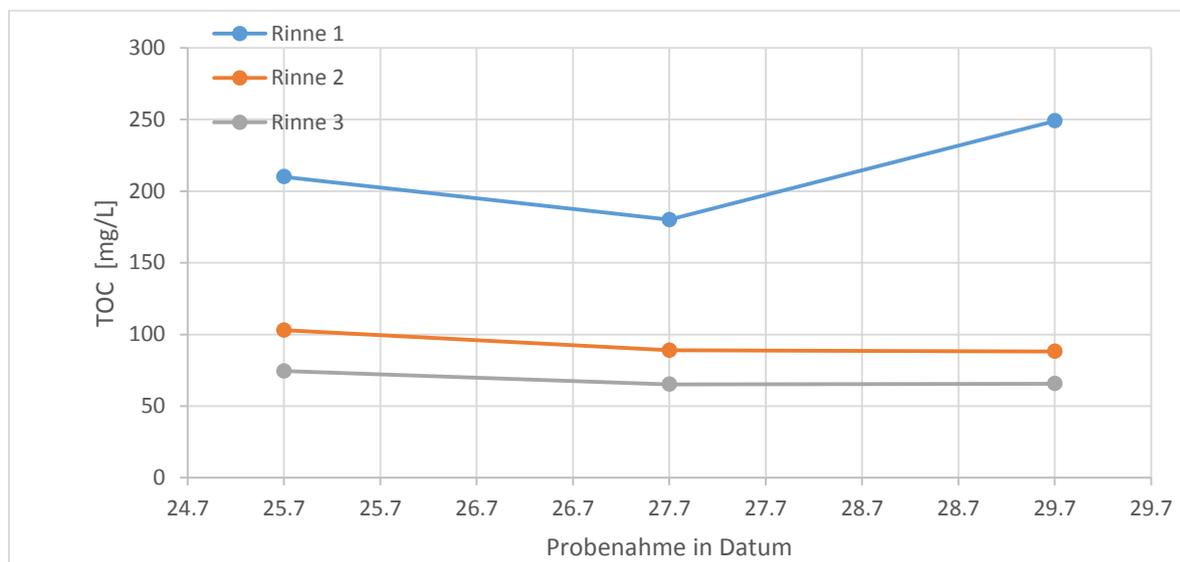
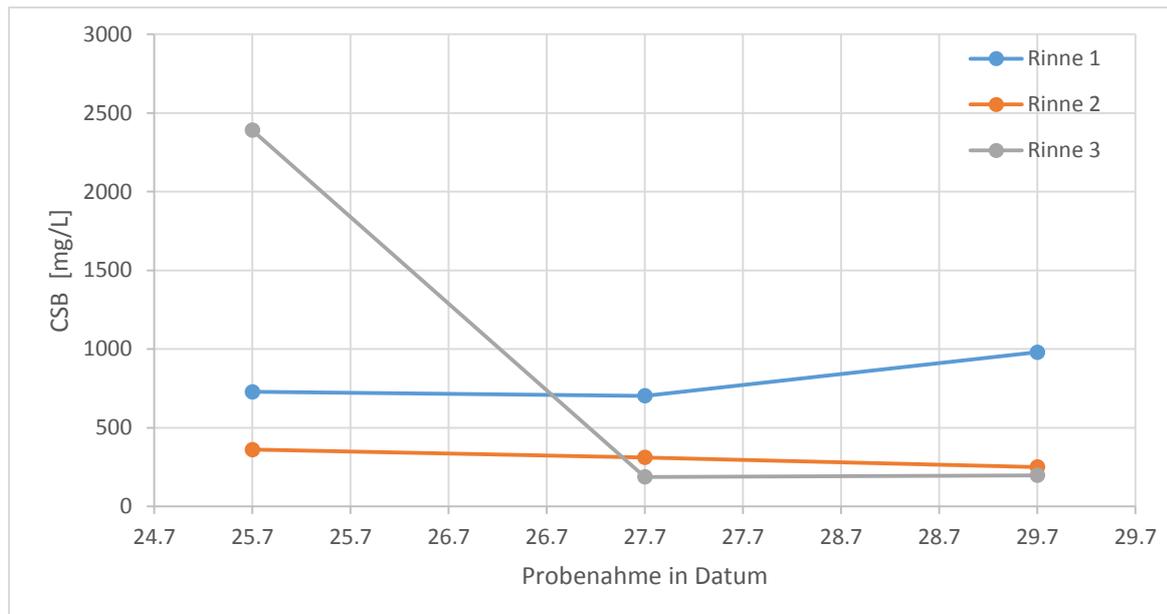


Abbildung 42a+b: CSB und TOC in Woche 2 (Quelle T. Egemann)

4.9.3 Einflussnahme durch Mikroalgen oder Mikrobiota des Sickerwassers

Die abschließende Versuchsreihe wurde in Woche 3 und 4 durchgeführt. Die Verlängerung des Versuchszeitraums lag hierbei in der starken Wetterverschlechterung begründet. Nach den sommerlichen Versuchsbedingungen in Woche 1 und 2 wurde im Zeitraum vom 01.08.2016 bis 12.08.2016 nur noch eine Durchschnittstemperatur von 17,8°C gemessen. Zudem regnete es häufig und war fast durchgängig bewölkt.

In dieser Versuchsreihe sollte mit Hilfe von vier verschiedenen Rinnen der Einfluss der natürlichen Mikrobiota des Sickerwassers im Vergleich zu den angeimpften Algenkulturen untersucht werden. Da das Sickerwasser aus dem Sickerwassersammelbecken der Pohl-schen Heide entnommen wurde und dementsprechend nicht steril war, könnten die bisherigen Ergebnisse durchaus durch Bakterien und andere bereits natürlich vorkommende

Mikroorganismen entstanden sein und nicht durch die artifiziell zugebenen Algenkulturen. Deshalb wurden Rinne 1 und 2 mit 25 % Sickerwasser und Rinne 1 zusätzlich auf 3 % mit einer gut gewachsenen Algenmischung angeimpft. Rinne 3 und 4 enthielten parallel 20 % Sickerwasser und Rinne 3 noch zusätzlich Algenmischung mit einer anfänglichen Endkonzentration von 3 %. Alle Messungen erfolgten wieder in der gleichen Häufigkeit wie in Woche 1 und 2. Zusätzlich wurde einmal täglich die optische Dichte der Algenrinnen bei $\lambda=690$ nm gemessen um eventuell eine Aussage über das Wachstum mittels Messwerten treffen zu können. Aufgrund der Inhomogenität des Rinnenbewuchses und der damit verbundenen fehlerbehafteten Probennahme von 1 ml aus 16 L Gesamtvolumen zeigten die Werte der Extinktion im Verlauf des Versuchszeitraumes nach einem kurzen Anstieg einen Abfall auf unter 0,1 in der zweiten Woche (Abb. 43).

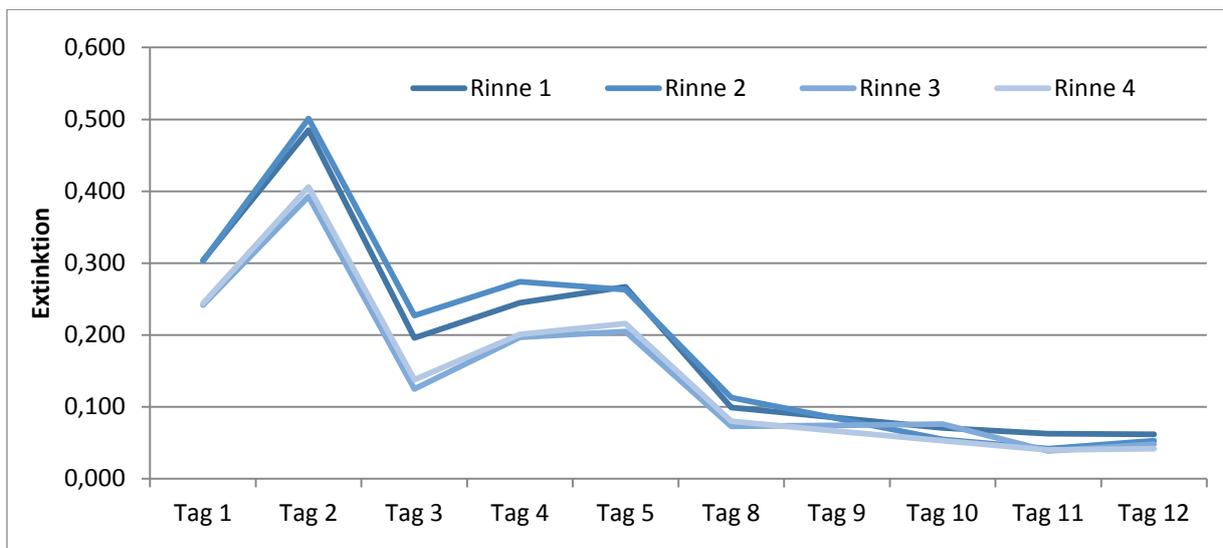


Abbildung 43: Extinktion in Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann)

Da die Verläufe der vom Sickerwassergehalt gleichen Rinnen fast deckungsgleich waren, kann in diesem Fall ein Zusammenhang mit der Entfärbung des Sickerwassers gezogen werden. Die Rinnen mit höherer Konzentration zeigten zu Beginn auch eine höhere Extinktion aufgrund der dunklen Eigenfärbung. Im Verlauf des Versuchs erfolgte ein Abbau der farbgebenden Bestandteile im Medium, wodurch ein Abfall der optischen Dichte gemessen wurde. Durch das ungünstige Wetter und die kurze Versuchsdauer konnte ein derart starkes Wachstum der Mikroorganismen, das eine Erhöhung der Extinktion zur Folge gehabt hätte, nicht erwartet werden.

Die Leitfähigkeit der vier Rinnen nahm über die Dauer des Versuchszeitraumes stetig in allen Rinnen ab. Da auch hier die Verläufe der Parallelen fast deckungsgleich waren, kann auch in diesem Fall von einem abiotischen Effekt im Zusammenhang mit der Sickerwasserkonzentration ausgegangen werden. Der starke Abfall mit anschließendem Anstieg in der zweiten Versuchswoche kann auf einem Verdünnungseffekt beruhen, da der Flüssigkeitsstand mittels Zugabe von 1 L Wasser wieder aufgefüllt wurde und kurz darauf ein starker Regenschauer weiteres Wasser in die Rinne einbrachte. Dieser Verdünnungseffekt relativierte sich aber bis zum Ende des Versuchszeitraumes (Abb. 43).

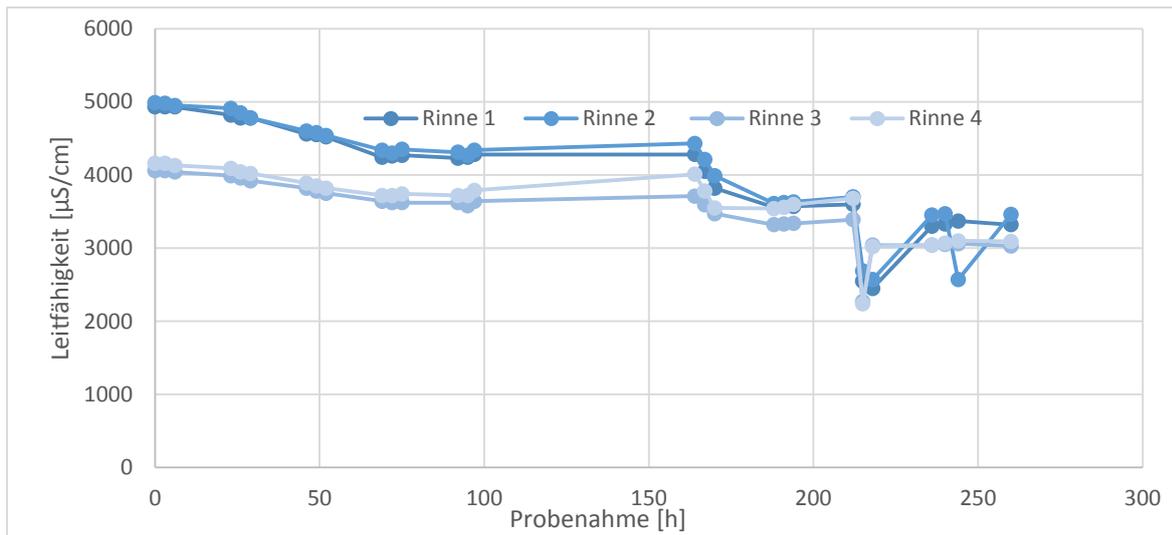


Abbildung 44: Leitfähigkeit Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann)

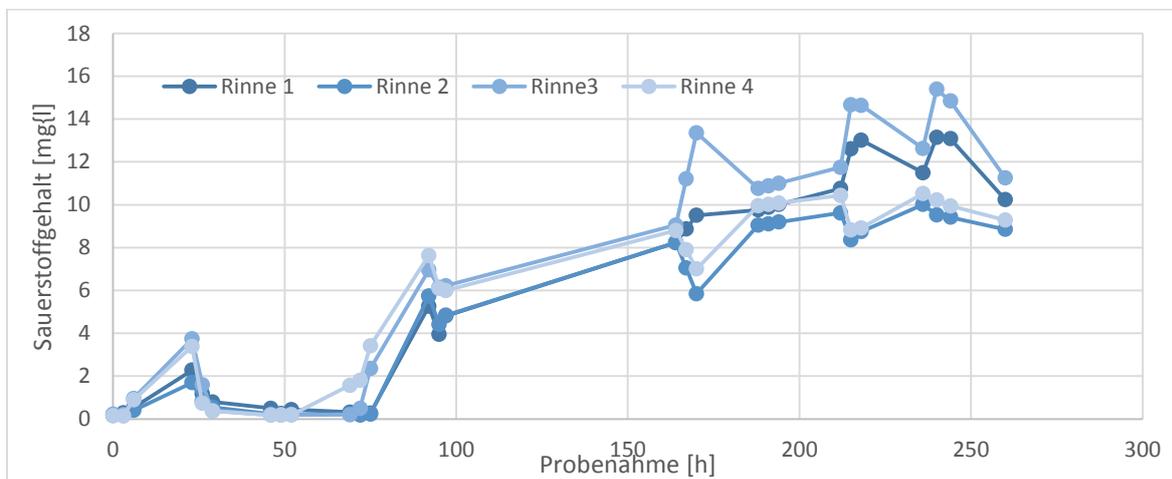


Abbildung 45: Sauerstoffgehalt Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann)

Der Sauerstoffgehalt (Abb. 45) entwickelte sich in den vier Rinnen im Verlauf der zwei Wochen sehr ähnlich. In der ersten Woche waren die Rinnen mit gleicher Sickerwasserkonzentration noch deckungsgleich und stiegen an. In der zweiten Versuchswoche hingegen stagnierte der Sauerstoffgehalt in den Rinnen ohne Algenzugabe, während die angeimpften Rinnen einen weiteren starken Anstieg an gelöstem O_2 zeigten (Abb. 45). Diese Entwicklung war das erste Anzeichen für das Wachstum einer oder verschiedener Organismen, die oxygene Photosynthese in den Rinnen durchführten. Zudem zeigten die Sauerstoffkonzentrationen einen leichten Abfall in den Morgenstunden und stiegen im Verlauf des Tages wieder an, was ebenfalls ein Zeichen für eine lichtabhängige Sauerstoffproduktion wie bei der Lichtreaktion der Photosynthese ist. Das Wachstum von Algen oder Cyanobakterien konnte zwar nicht direkt mittels einer Erhöhung der optischen Dichte nachgewiesen werden, aber die Sauerstoffbildung innerhalb der angeimpften Rinnen legte dieses nahe. Der Sauerstoffgehalt in den nicht mit Algen versetzten Rinnen kann dagegen mit den wechselhaften Wetterbedingungen und der daraus resultierenden guten Durchmischung der Me-

dien mit Oberflächenwasser erklärt werden. Dass der Sauerstoffgehalt auch ohne Zugabe von Mikroorganismen fast so stark anstiegen war wie in Rinne 1 des zweiten Versuchs, lag auch an den niedrigeren Temperaturen, die zum Ende dieses Versuchs bis auf 11°C in den Rinnen absank.

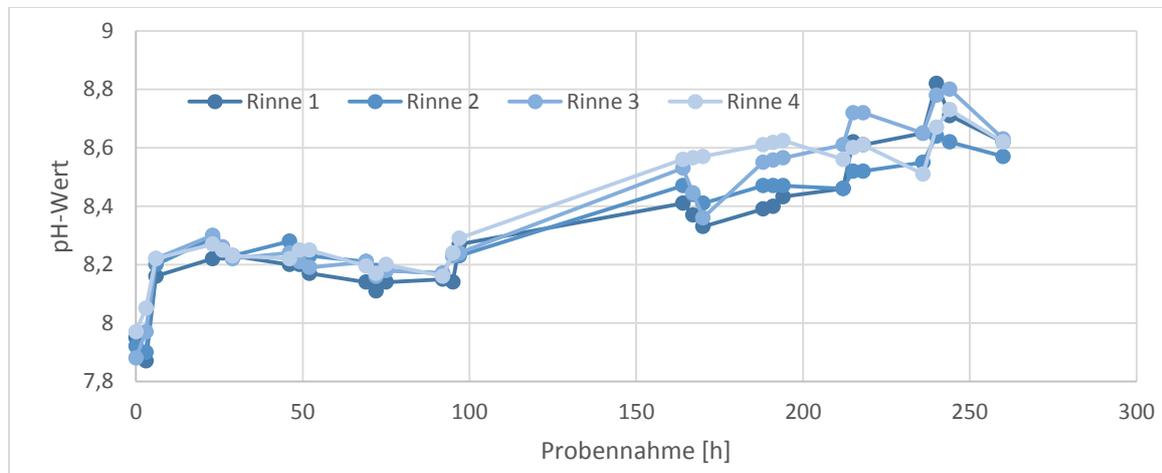


Abbildung 46: pH-Wert Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann)

Der pH-Wert stieg in allen vier Rinnen im Verlauf der zwei Versuchswochen von pH 7,9 auf pH 8,6 an. Ein signifikanter Unterschied konnte dabei nicht erkannt werden. Vielmehr erscheinen alle vier Ansätze fast gleich (Abb. 46).

Die verschiedenen stickstoffhaltigen Komponenten wurden auch in dieser Versuchsreihe gemessen und verglichen. So stieg der Nitratgehalt in allen vier Rinnen bis Tag 12 an, während es zu Beginn zu einem leichten Abfall kam. Da zeitgleich der Nitritgehalt in allen Rinnen drastisch abfiel, könnte der Nitratanstieg am letzten Tag eventuell auf die Erntemethode zurückzuführen sein. Da der höchste gemessene Gehalt dieses Versuchs 0,38 mg/L NO_3^- beträgt. Im Vergleich zu den gemessenen Nitratwerten in der großen Algenrinne, sind diese Werte nur ein Bruchteil (Abb. 47).

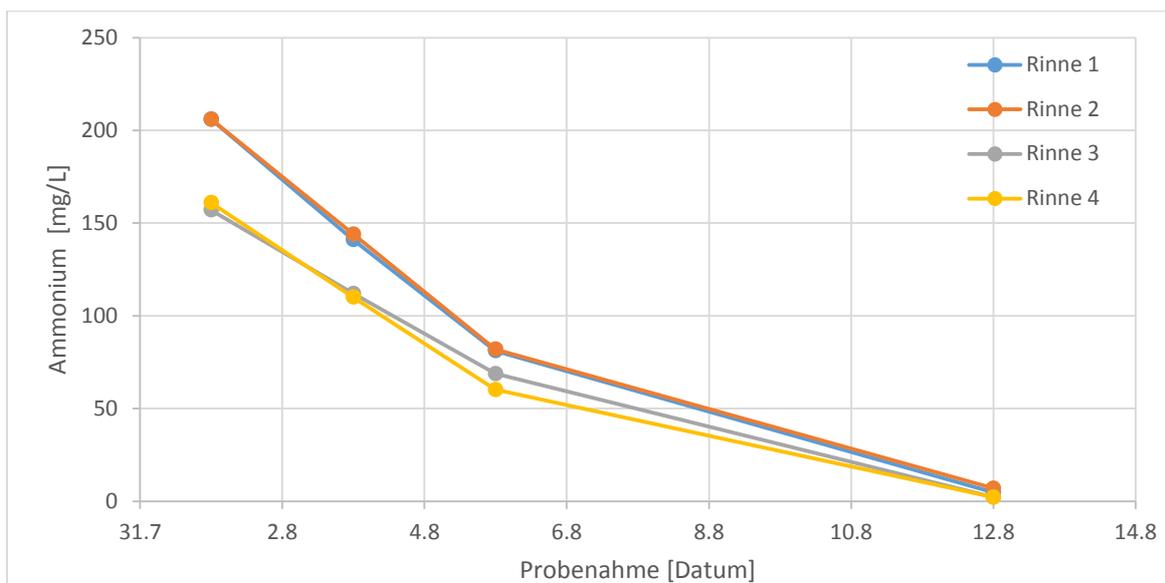
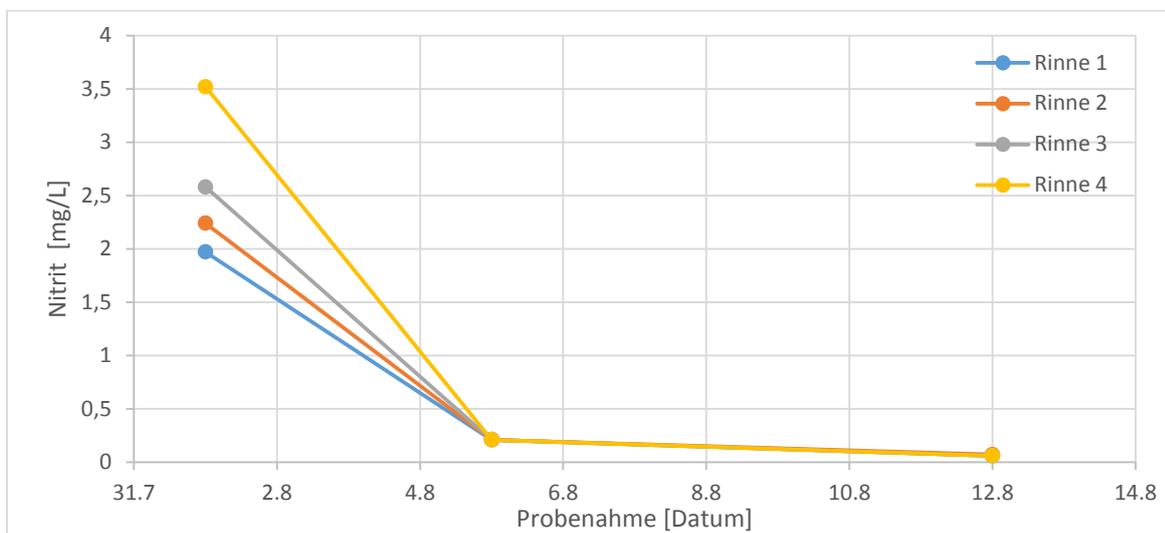
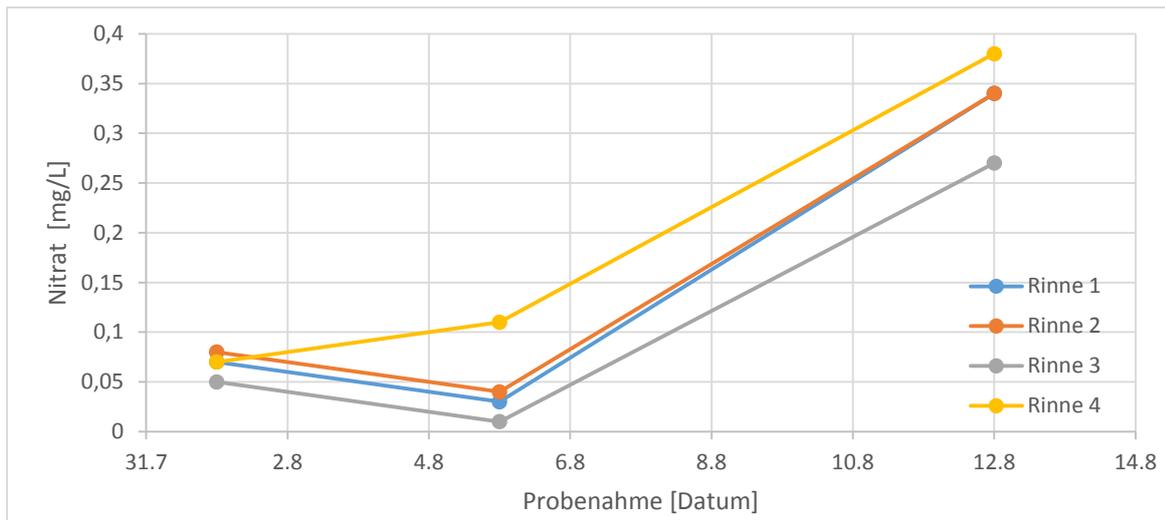


Abbildung 47a-c: Stickstoffkomponenten in Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann)

Eine höhere Aussagekraft hat dagegen der Abfall der Ammoniumkonzentration (Abb. 47a-c). Zu Beginn des Versuchs lag die Ammoniumkonzentration in Rinne 1 und 2 bei 206 mg/L und in Rinne 3 und 4 bei 160 mg/L. Zum Ende der Versuchsreihe wiesen alle Rinnen nur noch einen Ammoniumgehalt von 2,2 bis 6,97 mg/L auf. Das macht einen Restgehalt von 1,37 bis 3,3 % des ursprünglichen Ammoniumgehalts. Da alle Rinnen einen ähnlichen Abfall zeigten, ist dieser Effekt vermutlich einem Vorgang zu zuschreiben, der nicht auf den Eintrag der Algenmischung beruhte. Ob dieser Effekt biotischen (Mikroorganismen des Sickerwassers) oder abiotischen (Ammoniakstripping) Ursprungs war, kann abschließend nicht gesagt werden. Aber dennoch zeigte die Versuchsreihe eine erfolgreiche Minderung.

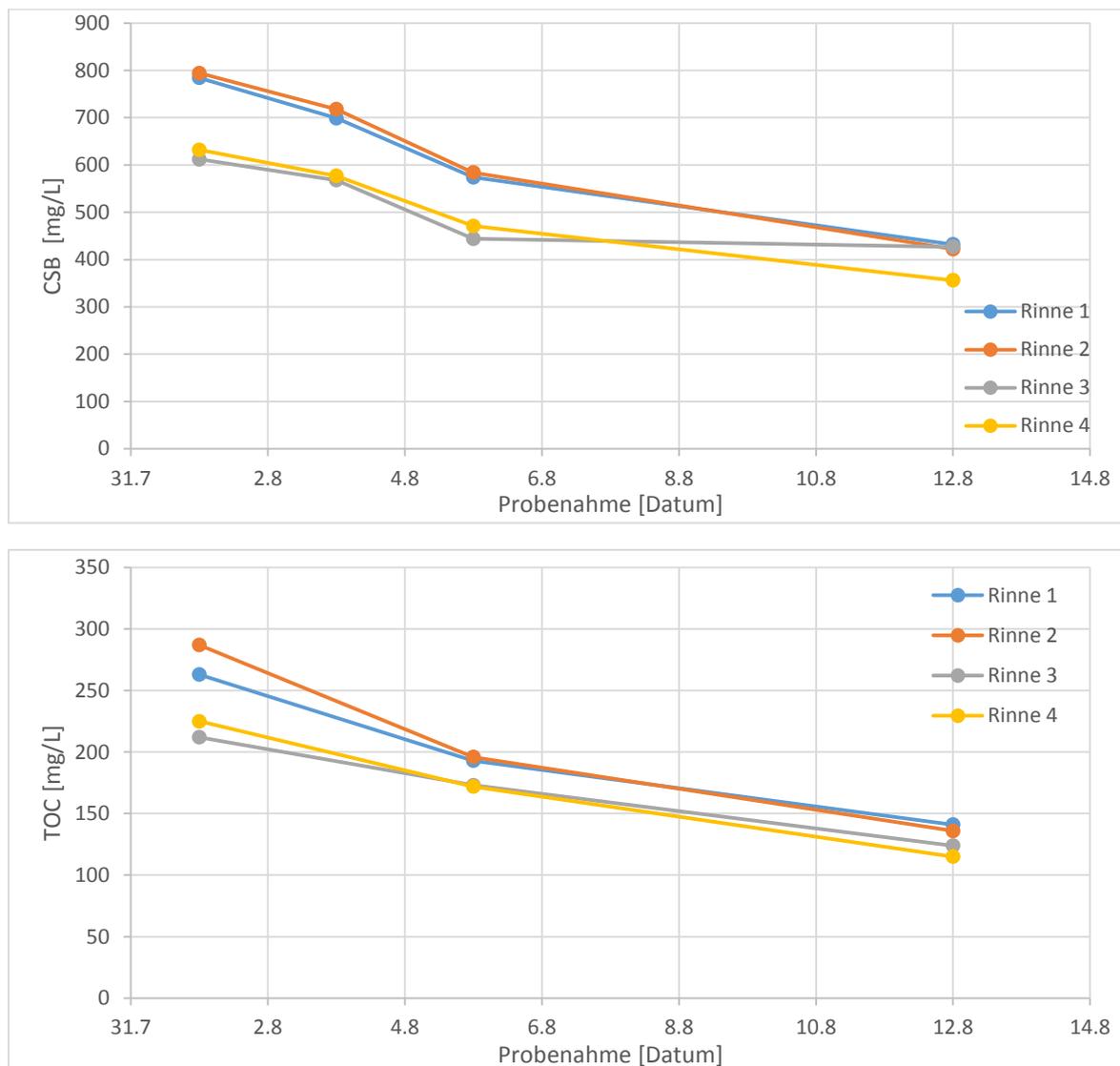


Abbildung 48a+b: CSB und TOC der Woche 3 und 4 (Quelle T. Egemann)

Als weitere Parameter wurden der CSB und der TOC gemessen (Abb. 48). Auch diese zeigten in allen vier Rinnen unabhängig einer Algenbeimischung einen Abfall um bis zu 46 % für den CSB und 53 % für den TOC (in Rinne 2). Damit konnte die Versuchsreihe an den kleinen Algenrinnen eine Elimination von Organik infolge biologischer Behandlung nachweisen.

4.10. Gasbildungsraten

Die mittels Zentrifuge geerntete Algenmasse wurde anschließend auf ihr Gasbildungspotential hin untersucht. Hier wurde gem. DIN 38414 Teil 8 der GB_{21} -Wert bestimmt. Dabei wird über 21 Tage die Algenmasse unter konstanter Temperatur von 37°C gelagert und das dabei entstehende Gas aufgefangen und das Volumen bestimmt.

Die Algenmasse wurde unterschiedlich vorbehandelt. Zum einen wurde frisches Material direkt nach der Ernte untersucht. Zum anderen wurde das gleiche Material bei minus 18°C vierzehn Tage gelagert und dann die Gasmenge ermittelt. In der Literatur findet man Hinweise, dass die Gasbildungsraten von frischer Algenmasse sehr niedrig sind. Begründet wird dies mit der hohen Widerstandskraft der Algen, die den anaeroben Prozess der Biogasgewinnung mehr oder weniger schadlos überstehen. Es gab daher die Idee, durch Einfrieren der Algenmasse die Algen aufzuschließen. Durch die Eigenschaft von Wasser, dass im gefrorenen Zustand ein höheres Volumen einnimmt, sollten die Algen „platzen“ und damit einfacher für den anaeroben Prozess zugänglich sein.

Parallel wurde auch das Sickerwasser direkt, sowie eine Probe vom Boden der Rinne auf die Gasbildung hin untersucht.

Die Ergebnisse der Gasbildung werden in der Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10: Gasbildung Algen, frisch, tiefgefroren, Sickerwasser und Rinnensediment

Gasbildungsraten aus den Algen, Deponiesickerwasser und Sediment						
Material	Parameter	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert, gemessen	Standard, theoretisch
Algen, tiefgefroren	GB_{21} [l/kg TS]	226	225	227	226	432
	pH-Wert (Anfang)	7,9	7,9	7,9		
	pH-Wert (Ende)	7,5	7,5	7,5		
Algen, frisch	GB_{21} [l/kg TS]	52	46	48	49	432
	pH-Wert (Anfang)	7,7	7,8	7,9		
	pH-Wert (Ende)	7,4	7,4	7,5		
Sickerwasser	GB_{21} [l/kg TS]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	432
	pH-Wert (Anfang)	7,9	7,9	8,0		
	pH-Wert (Ende)	7,6	7,6	7,6		
Sediment, Rinne	GB_{21} [l/kg]	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	432
	pH-Wert (Anfang)	7,7	7,5	7,7		
	pH-Wert (Ende)	7,6	7,5	7,5		

Aus den tiefgefrorenen Algenproben wurden 52,3 % der Biogasmenge im Vergleich zu einem „Mais-Standard“ gemessen. Und zwar wurden im Mittel 226 l/Kg TS gewonnen („Mais-Standard“ 432 l/kg TS). Aus den frisch geernteten Algen konnten 49 l/kg TS, also 11,3 % des „Mais-Standards“ gewonnen werden.

Sowohl aus dem Sediment als auch aus dem Sickerwasser wurden jeweils weniger als 0,5 l/kg TS an Biogas gewonnen.

Praktisch keine Gasbildung aus dem Deponiesickerwasser war auch zu erwarten. Die Konzentrationen an gelöstem Kohlenstoff, gemessen als CSB oder TOC im Wasser sind für eine anaerobe Behandlung zu gering.

Aus dem Sediment ist ebenfalls praktisch keine Gasbildung feststellbar. Das ist insofern interessant, dass sich ein Ernten des Sediments aus energetischer Sicht, und Kreislaufführung, nicht lohnt.

Ob sich am Boden der Rinne anaerobe Verhältnisse bilden, die eine Ausfäulung der Algen ermöglichen kann aufgrund der Messergebnisse nicht entschieden werden. Diese Frage ist in dem vorliegenden Zusammenhang nicht weiter relevant.

5. Wirtschaftliche Betrachtung

Die betriebswirtschaftliche Betrachtung des vorliegenden Verfahrens kann so abgeschätzt werden:

Die Reinigung von 1 m³ Deponiesickerwasser wird aktuell mit ca. 10 €/ m³ veranschlagt. Mit dem vorliegenden Verfahren kann das Deponiesickerwasser in die Kanalisation zur kommunalen Kläranlage abgeleitet werden. Die Kosten für kommunales Abwasser liegen zwischen 2 und 4 €/ m³.

Mit der vorbeschriebenen Anlagentechnik und dem Betriebsaufwand zur Behandlung des Deponiesickerwassers ist der Kostenaufwand deutlich unter 1 €/ m³. Hierbei ist die kommunale Klärtechnik mit den großen Beckenvolumina (Bautechnik), der Maschinenteknik (Belüftung und Ausfäulung), dem Betriebsaufwand (Energie für Belüftung) und dem Personalaufwand für die Schlammbehandlung berücksichtigt.

Damit liegt die Kosteneinsparung zur Behandlung von Deponiesickerwasser zwischen 5 und 7 €/ m³.

Der Volumenstrom auf der Pohlschen Heide liegt bei 10 m³/h. Mit dem Einsparpotential durch die Green Technology ergibt sich:

Kostenansatz Behandlung Deponiesickerwasser

Bisher, konventionell $10 \text{ m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 365 \text{ d/a} \times 10 \text{ €} / \text{m}^3 = 876.000 \text{ €/a}$

Green Technology $3\text{-}5 \text{ m}^3/\text{h} \times 24\text{h} \times 365 \text{ d/a} \times 10 \text{ €} / \text{m}^3 = 876.000 \text{ €/a} =$

262.800€/a bis 438.000 €/a

Also liegt das Einsparpotential zwischen 438.000€ und 614.000 €/a

Der Aufwand zur Ernte und Biogasbildung der so erzeugten Algen lässt sich derzeit betriebswirtschaftlich nicht darstellen. Aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht können die Algen kofermentiert werden.

6. Diskussion

Im Rahmen des DBU Fördervorhabens Algenprojekt AZ 32197 „Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Behandlung von Sickerwasser mit Hilfe eines identifizierten Algentypus unter Verwendung von CO₂ aus dem Rotteprozess einer MBA-Deponie mit Energiebilanz“ konnten die Ziele erreicht werden. Es wurden aus einer natürlich gewachsenen Algenpopulation in der Ringdrainage zwei Algengruppen bestimmt, die dort am häufigsten vorkamen. Im Vorprojekt wurden die Algen nach Literaturwerten ausgewählt und dann konnten die Milieubedingungen in der Anwendung nicht eingestellt werden.

Eine Kultivierung und Vereinzeln der gewünschten Algenkultur wurde nach einer mikroskopischen Begutachtung nicht realisiert. Die identifizierten Algengattungen wurden in einer Algensammlung als axenische Stammkultur bezogen. So war ein definierter Startpunkt der Laborversuche möglich. Anstelle einer Speziesbestimmung mittels Lichtmikroskop wurde nach Bestimmung der Gattung der Katalog der Göttinger Algensammlung (SAG) auf mögliche Kandidaten durchsucht.

Die Wahl fiel auf zwei Stämme, die sich durch ihre Robustheit für Schülerversuche eignen, die eine Toleranz gegenüber leicht verschmutzen bzw. Brackwasser aufwiesen und die als Reinkultur vorlagen. Diese Kriterien erfüllten die Stämme *Chlorella vulgaris* SAG 211b und *Euglena gracilis* SAG 1224. Der Stamm von *Chlorella vulgaris* entspricht dabei sogar dem ursprünglichen Isolat von M. W. Beijerinck von 1889 und ist das älteste Isolat der Algensammlung. Der gewählte Stamm von *Euglena gracilis* war dagegen der einzige Stamm mit vollständiger Sequenz in der Datenbank, was für spätere molekulare Versuche eventuell von Interesse sein könnte. Beide Stämme wurden als Reinkultur zugesandt und direkt in verschiedenen Medien angeimpft. Aufgrund der fehlenden Möglichkeiten für sterile Medienkompositionen, wurde bereits von Anfang an auf eine leichte Anwendbarkeit und geringe Kosten der Medien geachtet. Ziel war eine Adaptation der Stämme an eine Mischung aus Komponenten, die zu einem großen Teil aus Wasser und Sickerwasser bestanden. Eine Stammkultur wurde aber zu jeder Zeit in einem hochwertigen Medium als Rückstellprobe (Sicherung) kultiviert.

Bei dem vorliegenden Projekt geht es nicht um hochreine Biomasse zu erzeugen, sondern um die Eliminierung von Stör- und Schadstoffen aus dem Abwasserstrom. Das Ziel und die Umsetzung der Verfahren soll robust und kostengünstig sein. Aufgrund der hohen mikrobiellen Belastung des Sickerwassers wurde auf sterile Medien in den Versuchen verzichtet, was zu einem höheren Ausfall an Ansätzen und Parallelen in den Versuchen geführt hat. Einige Versuche wurden auch mit sterilem Sickerwasser (Filtration und Autoklavieren) im Labor durchgeführt. Da dieses aber keine Lösung für den Einsatz an der Algenrinne und den eigentlichen Zweck des Projektes darstellte, wurde dieser Versuchsansatz wieder eingestellt. Die natürlichen Bedingungen an der offenen Algenrinne sind vom Prinzip nicht mit sterilen Zuständen zu betreiben und waren auch nie beabsichtigt. Insofern wurde die Al-

genmischung der Firma LimnoSun GmbH, Hille unter den natürlichen Bedingungen der Rinne verdrängt, während sie unter Labormaßstäben ein sehr konstantes und unkompliziertes Wachstum zeigte. Auch die Toleranz gegenüber Kältestress und Dunkelheit zeigte vielversprechende Ergebnisse. Durch die Eigenschaft zum Absinken bei fehlender mechanischer Bewegung und die damit verbundene Beschattung durch andere Algenarten, konnten die ursprüngliche Algenmischung zwar in Spuren bzw. einzelnen Gruppen wiedergefunden werden. Eine reine Algenrinne mit nur diesen Spezies war aber nicht möglich. Für spätere Versuche könnten aber einzelne Arten und ihre Eigenschaften interessant sein.

Die wissenschaftliche Belastbarkeit von Ergebnissen wird zu einem großen Teil mit ihrer Wiederholbarkeit und der Parallelität der Ergebnisse in Mehrfach-Ansätzen begründet. Diese Konstanz ermöglicht eine Aussage zu Vorhersagbarkeit und lässt Rückschlüsse ziehen. Dazu werden nahezu alle Bedingungen gleich gehalten und kleinste Änderungen vollzogen, die dann als Ursache für die Erneuerung betrachtet werden darf. Dieses Projekt hingegen ist von Beginn an durch seine Vielzahl an Variablen einer hohen Bandbreite an Einflüssen ausgesetzt gewesen. Mittels Laborversuchen mit Reinkulturen sollten diese Effekte so klar wie möglich abgegrenzt werden. Allerdings hat bereits der Faktor des nicht sterilen Sickerwassers die Durchführung der Versuche erschwert. Die Aussagen zu tolerierten Konzentrationen an Sickerwasser und der Einfluss von Medienkompositionen und Begasungrate sind in ihrer Bandbreite dargestellt. Erntetechniken mit geringen Laborvolumina sind nicht mit dem Ansatz in einer 2500L fassenden Algenrinne zu vergleichen. Dieses Scale-Up erfordert ein erhöhtes Investitionsvolumen, das aus betriebswirtschaftlicher Sicht genauer betrachtet werden muss. Deshalb wurden die Versuche im Kreislauf geschlossen, aber betriebswirtschaftlich und technisch nicht durchkalkuliert. Die vielen einzelnen Versuche zeigen, dass das Prinzip des Ansatzes richtig ist. Die großvolumige Algenrinne konnte konstant über den Jahreslauf betrieben werden und zeigte auch im Winter noch eine hohe Biomassebildung (siehe Abb. 49).

Demnach scheint der kontinuierliche Betrieb einer auf Algen und Photosynthese beruhenden Technik in den gemäßigten Breiten bei entsprechender Technik zur Verhinderung eines Einfrierens der Anlage eine vielversprechende Möglichkeit zu sein. Die Sonneneinstrahlung und damit verbundene Erwärmung des Mediums und eventuelle Schädigung der Algenkultur ist bei Weitem nicht so stark, wie befürchtet. Entgegen den bisherigen Ansichten, dass der Betrieb einer auf Mikroalgen basierenden Technik nur in sonnigen Regionen rentabel möglich ist, zeigt dieses Projekt, dass bei entsprechenden Schutzmaßnahmen auch die Wintermonate in den gemäßigten Breitengraden dazu geeignet sind.

Der große Einfluss der abiotischen Faktoren wie Wetter und Eintrag von Fremdkörpern ist in offenen Systemen immer groß. Versuchsansätze wurden mit variierenden Parametern wiederholt, wenn singuläre Ereignisse den Versuchsablauf störten (Blätter/ Laub in der Rinne, Beschattung). Die gleiche Tendenz ist in allen Ansätzen zu erkennen. Eine Verbesserung der Schadstofffracht des Sickerwassers ist möglich.



Abbildung 49: Algenrinne am 02.12.2015

Aktuelle deutsche Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Abwasserwirtschaft nutzen ebenfalls Mikroalgen zur Aufreinigung verschiedener Formen von häuslichen und kommunalen Abwässern. Die in der Einleitung erwähnte Firma LimnoSun, dessen Algenmischung im Rahmen dieses Projektes ebenfalls in der Rinne getestet wurde, versucht Grauwasser aus einfachen Haushalten in Bezug auf Stickstoff, Phosphor sowie Schwermetalle und Mikroschadstoffe wie Arzneimittelrückstände zu reinigen. Dieses Forschungsvorhaben erfolgt allerdings in einem geschlossenen System des Röhren-MAK. In dem in dieser Arbeit verwendeten offenen System zeigten die Algen, dass sie schnell von anderen Arten verdrängt wurden. In Spuren konnte aber *Scenedesmus* sp., ein Bestandteil der angeimpften Algenmischung wiedergefunden werden und sich anscheinend danach auch in der Rinne etablieren. Ein weiteres aktuelles Forschungsprojekt in diesem Bereich wird an der Technischen Hochschule Mittelhessen betrieben. Auch hier soll mittels Mikroalgen der Phosphorgehalt in kommunalen Abwässern reduziert und dem Stoffkreislauf zur Neuverwertung, z.B. als Düngemittel wieder zugeführt werden. Beide Projekte sind aber noch nicht abgeschlossen, bzw. haben gerade erst begonnen und haben aus diesem Grund auch noch keine Ergebnisse veröffentlicht, die mit diesem Projekt verglichen und diskutiert werden können. Da aber beide mit geschlossenen Systemen in Röhrenreaktoren arbeiten, sind die Einflüsse durch Wetterbedingungen und Fremdkörpereintrag als gering zu erwarten.

7. Fazit und Ausblick

In diesem Projekt sollten in zwei vollständige Vegetationsperioden in der Algenrinne am Deponiestandort folgendes näher untersucht werden:

- Algentypen bestimmen für ein biologisches Verfahren zur Deponiesickerwasserbehandlung;
- Einflussfaktoren auf die Wachstumsbedingungen ermitteln;
- Optimale Bedingungen für geeignete Algenkultur ermitteln;
- Eine Energie- und CO₂-Bilanz erstellen;

Unter Berücksichtigung des Wetters wurden die Ergebnisse weitgehend erzielt.

Der Sommer 2015 zeigte sich als einer der wärmsten und sonnenintensivsten der letzten Jahre und der Sommer 2016 war zumindest im Frühsommer wesentlich zu kalt und zu feucht. Daher können die Ergebnisse an der Anlage nicht genau miteinander verglichen werden. Es wurden aber zu allen Versuchsreihen die Umweltbedingungen dokumentiert, so dass ein Vergleich von Ergebnissen aus gleichen Außenbedingungen möglich ist.

Es wurden die beiden vorherrschenden Algengattungen der Sommersaison 2014 in der Algenrinne mikroskopisch bestimmt und entsprechende Vergleichskulturen bei der SAG Göttingen bestellt. Als Versuchsorganismen wurden *Chlorella vulgaris* (SAG 211-11b) und *Euglena gracilis* (SAG 1224-5/25) gewählt, da die beschriebenen Umweltparameter in der Stammbeschreibung unseren Voraussetzungen in der Algenrinne mit einem Sickerwassergemisch am nächsten kamen. Außerdem wurde von beiden Kulturen eine Eignung für Praktika Versuche berichtet, was auf eine gewisse Robustheit schließen lässt, die für unsere Versuchsreihen erstrebenswert war. Beide Stämme wurden auf verschiedenen Medien im Labor vorgezogen und entsprechende axenische Kulturvolumina gewonnen. Die Reinheit der Kulturen wurde mittels Mikroskopie kontrolliert. Das Wachstum wurde mittels photometrischer Messung und gleichzeitiger Auszählung eines entsprechenden Zellvolumens in einer Bürkerzählzelle bestimmt. Somit konnte für jede Art ein entsprechender Faktor ermittelt werden, der die direkte Umrechnung der photometrischen Extinktion in eine Zellzahl ermöglichte. Diese Kalibrierung des Zellwachstums wurde von verschiedenen Mitarbeitern unabhängig kontrolliert. Es konnten für beide Algenspezies bevorzugte Medien und Wachstumsbedingungen festgesetzt werden, bevor weitere Versuche gestartet wurden.

Die beiden Algenspezies wurden im Labor unter verschiedenen Bedingungen kultiviert. Es wurden physikalische und chemische Parameter variiert und in weiteren Versuchen auch Mischkulturen beider Algen genutzt. Parallel wurden alle Einflüsse direkt auf das Sickerwasser dokumentiert und dabei auch die biotischen und abiotischen Faktoren berücksichtigt. Zudem wurden in der Sommersaison auch Proben der Algenrinne mit der originalen

Algenzusammensetzung für Versuche verwendet. Aus allen Ergebnissen wurde die weitere Vorgehensweise bestimmt.

In Vorversuchen an der Algenrinne wurden Reinkulturen von Cv und Eg in die Algenrinne mit der tolerierten Sickerwassermenge gegeben. Die Veränderung in der Zusammensetzung und mögliches Wachstum wurde beobachtet. Eine weitere Mischkultur aus anderen Algen wurde Vergleichsweise in der Algenrinne verwendet um zu sehen, ob die gewählte Algenmischung wirklich die beste Alternative darstellt.

In verschiedenen Versuchen im Labormaßstab und an der großen Algenrinne wurden Daten zu CO₂- und Energiebilanz gesammelt. Dabei wurde die kurze Sommerperiode und der damit eingeschränkte Versuchszeitraum insofern erweitert, dass eine kleinere Version der Algenrinne in 4-facher Ausfertigung auf dem Gelände der FH Bielefeld, Campus Minden für Versuche in Parallelen genutzt wurde.

Zusammenfassend kann abschließend berichtet werden, dass der Betrieb einer Algenrinne mit einer artifizialen Algenmischung über einen längeren Zeitraum möglich ist und in dieser Zeit auch eine Reinigungsleistung in der Algenrinne beobachtet werden konnte. Das Wachstum in der großen Algenrinne konnte durch die verwendete Isolierung und Begleitheizung auch in den Wintermonaten aufrechterhalten werden. Teilweise zeigen die Aufnahmen der Algenrinne in den Wintermonaten eine größere Wachstumsrate als in den Sommermonaten.

Insgesamt erwies sich eine Konzentration von 20 % Sickerwasser in der Rinne für die Algen als tolerabel ohne signifikante Hemmung des Wachstums. Auch konnte sowohl Algenwachstum als auch eine Elimination von Stör- und Schadstoffen erreicht werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können für weitere Verfahrensoptimierungen genutzt werden.

Ein geschlossener Stoffkreislauf wurde nicht aufgebaut. Die Gasproduktion war zu gering. Die gefundene Erntetechnik war für die insgesamt geringen Algenmassen ausreichend. Für Scale-Up Erntetechnik fehlte die Algenmasse. Die Algenmischung war sehr heterogen und lies sich am besten mittels Zentrifugation ernten. Da die zur Verfügung stehenden Geräte aber nur die Zentrifugation kleinster Mengen erlaubten, konnte nie die gesamte Algenmasse geerntet werden. Für eine effizientere Ausbeute müsste neben Anpassungen in der Kultivierung auch eine Neuanschaffung in der Erntetechnik erfolgen. Separatoren oder Siebandpressen aus der Abwasserwirtschaft scheinen dabei am Vielversprechendsten.

Des Weiteren wäre eine genauere Analyse der Algenmischung mit molekularen und biochemischen Methoden in einem darauf spezialisierten Labor wünschenswert. Die Möglichkeiten in den chemischen Laboren zur mikrobiologischen und molekularen Arbeit waren sehr begrenzt. Die vorherrschenden Bakterien und eventuell auch Archaeen im Sickerwasser könnten identifiziert werden. So ist eine Zuordnung der verschiedenen Effekte zu einer biotischen oder abiotischen Ursache möglich.

Die Thematik der ressourcenschonenden Aufarbeitung von Abfallstoffen und der Weiter- bzw. Wiederverwendung einzelner chemischer und biologischer Energieträger ist aktueller denn je. In Zukunft kann mit einem weiteren Anstieg der Weltbevölkerung gerechnet werden, während die Ressourcen auf diesem Planeten endlich sind. Es kann von einer weiteren Verknappung lebenswichtiger Elemente und grundlegender Stoffe wie Trinkwasser ausgegangen werden. Gleichzeitig entwickeln sich Nationen der dritten Welt weiter und haben Bedarf an modernen und effizienten Techniken zur Abwasserbehandlung mit robusten Verfahrenstechniken. Hier bieten sich biologische Verfahren an.

Die Nutzung von Sonnenenergie zur Herstellung von Biomasse bei gleichzeitiger Behandlung von Brauchwasser ist ein interessanter Ansatz für zukünftige Deponietechnologien. Durch die Salinitätstoleranz der verwendeten Algen können diese auch an anderen Standorten mit Brackwasser oder in mineralischen Regionen verwendet werden. Natürlich ist die Implementierung an gegebene örtliche Verhältnisse immer ein Inbetriebnahme Prozess, teilweise mit In-Situ-Versuchen.

8. Danksagung

Wir danken der DBU für die Förderung dieses Folgeprojektes. Des Weiteren danken wir den verschiedenen Studierenden und Mitarbeiterinnen, die die verschiedenen Phasen des Projektes begleitet haben und zu seinem Erfolg beigetragen haben. Namentlich möchten wir Rebecca Groß, Marvin Vauth, Luisa Eichner, Katharina Schulz und Timo Egemann danken. Des Weiteren danken wir dem AML und seiner Leiterin Dipl. Biologin Doris Rohde für die Untersuchung der Vielzahl an Proben, die genommen wurden, und die guten Ideen und Diskussionsbeiträge im Verlauf des Projekts.

Wir danken der Sammlung von Algenkulturen der Universität Göttingen (SAG) für die Überlassung der beiden Algenstämme *Chlorella vulgaris* (SAG 211-11b) und *Euglena gracilis* (SAG 1224-5/25).

9. Literaturverzeichnis

- Bannwarth, H.;** Kremer, B.; Schulz, A. (2013). Basiswissen Chemie, Physik und Biochemie, Vom Atom bis zur Atmung – für Biologen, Mediziner und Pharmazeuten. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Bayrisches Landesamt für Umwelt. (2013).** Umweltwissen–Schadstoffe: Ammoniak und Ammonium.
- Bender, H. F. (2008).** Das Gefahrstoffbuch / sicherer Umgang mit Gefahrstoffen nach REACH und GHS. 3. Auflage. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Benemann, J. R. (1979).** Production of nitrogen fertilizer with nitrogen-fixing blue-green algae. Enzyme and microbial technology, Volume 1.
- Bilitewski, B.;** Härdtle, G.; Marek, K. (2000). Abfallwirtschaft Handbuch für Praxis und Lehre. 3. Auflage. Springer Verlag.
- Binder, H. H. (1999).** Lexikon der chemischen Elemente. 1. Auflage. S. Hirzel Verlag Stuttgart Leipzig.
- Bischof, F. (2012)** Rationelle Energiewandlung und erneuerbare Energien Hochschule Amberg-Weiden, Amberg. Forschungsbericht. 2012.
- Bliefert, C. (1997).** Umweltchemie. 2. Auflage. Wiley-VCH Verlag.
- Börnigk, H.;** Dittmar, T. (2011). Wasserinhaltsstoffe Teil I: Einführung, Organische Wasserinhaltsstoffe, Desinfektions- und Oxidationsprodukte. pdf-Download der Internetseite des Instituts für Wasserchemie, TU Dresden, (http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifw/lehre/downloads_lehr-veranstaltungen);
- Boelee, N. C.;** Temmink, H.; Janssen, M. *et al.* (2011). Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater effluent using microalgal biofilms. Water Research, Volume 45.
- Brauer, H. (1996).** Additiver Umweltschutz: Behandlung von Abwässern. Band 4. Springer Verlag.
- Büscher, B.;** Harborth, P., Thiel, T. (2013). Abschlussbericht: Entwicklung eines integrierten Verfahrens zum Einsatz von Algen zur Steigerung der Energiebereitstellung und –effizienz und zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Vergärungsanlagen. Gesellschaft zur Verwertung organischer Abfälle GmbH & Co. KG.
- Chmiel, H. (Hg). (2011).** Bioprozesstechnik. 3. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Christen, P.;** Jaussi, R. (2005). Biochemie / eine Einführung mit 40 Lerneinheiten. 1. Auflage. Springer Verlag.
- Cypionka, H. (2006).** Grundlagen der Mikrobiologie. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Danilov, R.A.;** Ekelund, N.G.A. (2001). Effects of pH on the growth rate, motility and photosynthesis in *Euglena gracilis*. Department of Natural and Environmental Sciences, Mid Sweden University, 871 88, Härnösand, Sweden. Abstract abgerufen am 09.08.2015.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.:** 25. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen (2012). http://de.dwa.de/tl_files/_media/content/PDFs/Abteilung_WAW/mj/Leistungsvergleich_2012_klein.pdf; (zuletzt aufgerufen am 10.09.2014).
- Dittmar, T. (2010).** Vorlesungsskript: Wasserinhaltsstoffe Kationen II Teil. pdf- Download der Internetseite des Instituts für Wasserchemie, TU Dresden, (http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydro-wissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifw/lehre/downloads_lehrveranstaltungen).
- Egemann, T., (2016)** Untersuchungen zur Wachstumsrate von Algen im Medium Deponiesickerwasser, Bachelorarbeit FH Bielefeld. 2016.
- Eichner, L., (2015)** Untersuchungen zur Wachstumsrate von Algen im Medium Deponiesickerwasser, Bachelorarbeit FH Bielefeld. 2015.
- Fricke, K. (2013).** Entwicklung eines integrierten Verfahrens zum Einsatz von Algen zur Steigerung der Energiebereitstellung und –effizienz und zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Vergärungsanlagen. Abschlussbericht DBU Fördervorhaben, Technische Universität Braunschweig.

- Friday**, E.T.; Rapheal, E.; Nwalo, F.O. *et al.* (2010). Mixed cultivation of *E. gracilis* and *Chlorella sorokiniana*: a production method of algae biomass on a large scale. Journal of Applied Biosciences, www.biosciences.elwas.org, abgerufen am 23.08.2015.
- Gey**, M. H. (2015). Instrumentelle Analytik und Bioanalytik – Biosubstanzen, Trennmethoden, Strukturanalytik, Applikationen. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Görtz**, H.-D.; Brümmer, F. (2012). Biologie für Ingenieure. 1. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Giesecke**, J.; Heimerl, S.; Mosonyi, E. (2014). Wasserkraftanlagen – Planung, III Bau und Betrieb. 6. Auflage. Springer Vieweg Verlag.
- Groß**, R. (2014). Untersuchungen zum Einfluss von Algen auf die Konzentration von Inhaltsstoffen ausgewählter Abwässer unter Variation der Versuchsparameter. Bachelorarbeit. Technische Universität Dresden und FH Bielefeld.. 2014.
- Guderian**, R. (Hrsg.); Gunkel, G. (Hrsg.); Herbst, V. (2000). (1): Aquatische Systeme Band 3 A, Grundlagen – Physikalische Belastungsfaktoren – Anorganische Stoffeinträge. 1. Auflage. Springer Verlag.
- Guderian**, R. (Hrsg.); Gunkel, G. (Hrsg.); Kinzelbach, R. *et al.* (2) (2000). Aquatische Systeme Band 3 B, Biogene Belastungsfaktoren - Organische Stoffeinträge – Verhalten von Xenobiotika. 1. Auflage. Springer Verlag.
- Gujer**, W. (2007). Siedlungswasserwirtschaft. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- GVoa mbH & Co. KG**, (2013) Abschlussbericht, DBU-Fördervorhaben: Entwicklung eines integrierten Verfahrens zum Einsatz von Algen zur Steigerung der Energiebereitstellung und-effizienz und zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Vergärungsanlagen. Hille, Juli 2013
- Haber**, W.; Zimmermann, H.; Dreyhaupt, F.-J. *et al.* (1991). (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen): Abfallwirtschaft. 1. Auflage. Metzler-Poeschel Stuttgart Verlag.
- Hartmann**, L. (1992). Biologische Abwasserreinigung. 3. Auflage. Springer Verlag.
- Hempel**, N. (2013). Biodieselproduktion aus Mikroalgen. Dissertation.
- Hirsch-Kauffmann**, M.; Schweiger, M. (1996). Biologie für Mediziner und Naturwissenschaftler. 3. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart New York.
- Höll**, K. (Hrsg.); Grohmann, A. (Hrsg.); Dieter, H. H. *et al.* (2002). Wasser: Nutzung im Kreislauf, Hygiene, Analyse und Bewertung. 8. Auflage. De Gruyter Verlag.
- Hoek**, C. van den; H. M. Jahns. (1978). Algen. 1. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart.
- Hoek**, C. van den; H. M. Jahns.; Mann, D. G. (1993). Algen. 3. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart New York.
- Holler**, S.; Schäfers, C.; Sonneberg, J. (1996). Umweltanalytik und Ökotoxikologie. 1. Auflage. Springer Verlag.
- Hosang**, W.; Bischof, W. (1998). Abwassertechnik. 11. Auflage. B. G. Teubner Verlag Stuttgart Leipzig.
- Hulpke**, H. (Hrsg.); Hartkamp, H. (Hrsg.); Tölg, G. (Hrsg.) u.a. (1988). Analytische Chemie für die Praxis Umweltanalytik Eine allgemeine Einführung. 1. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart New York.
- Jäger**, E. J.; Neumann, S.; Ohmann, E. (2003). Botanik. 5. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Kemnitz**, E.; Simon, R. (Hg). (2007). Abiturwissen Chemie. 2. Auflage. Dudenverlag Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich.
- Klee**, O. (1991). Angewandte Hydrobiologie. 2. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart New York.
- Kleesattel**, W. (2008). Biologie *pocket Teacher* Abi. 2. Auflage. Cornelsen Scriptor Verlag. IV.
- Knoch**, W. (1991). Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Abfallentsorgung – Chemische und analytische Grundlagen. 1. Auflage. VCH Weinheim, New York, Basel, Cambridge.
- Kohl**, J.-G.; Nicklisch, A. (1988). Ökophysiologie der Algen. 1. Auflage. Gustav Fischer Verlag Stuttgart New York.

- Krebs, P. (2009).** Vorlesungsskript Abwassersysteme. Kapitel 3, Institut der Siedlungswasserwirtschaft, TU Dresden, pdf-Download über das OPAL-Bildungsportal (<https://bildungsportal.sachsen.de/opal/dmz/>).
- Lampert, W.; Sommer, U. (1999).** Limnoökologie. 2. Auflage, Thieme Stuttgart, New York. (abgerufen am 26.07.2015 von: <https://books.google.de/books>, Auszug von Seite 236).
- Lebensministerium Österreich (2010). Umweltbundesamt GmbH,** Aufkommen und Behandlung von Deponiesickerwasser. Bestandsaufnahme an ausgewählten österreichischen Deponien. REPORT REP-0249, Wien, 2010.
- Libbert, E. (1993).** Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. 5. Auflage. Gustav Fischer Verlag.
- Linne von Berg, K.-H.; Hoef-Emden K.; Marin B. et al. (2004).** Der Kosmos Algenführer, Die wichtigsten Süßwasseralgen im Mikroskop. 1. Auflage. Franckh-Kosmos Verlags GmbH & Co.KG Stuttgart.
- Lüttge, U.; Kluge, M. (2012).** Botanik – die Einführende Biologie der Pflanzen. 6. Auflage. Wiley-VCH Verlag.
- Lukas, W. (Hrsg.); Peters, T. (Hrsg.); Matschiner, H. (2000).** Abfall, Deponie Sickerwasser, Deponie-Gas: Wirtschaftliche Alternativen und Perspektiven für die Umweltgerechte Verwertung und Entsorgung. 1. Auflage. Vulkan-Verlag.
- Markl, J. (Hrsg.); Purves, W. K.; Sadava, D. et al. (2006).** Biologie. 7. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag.
- Marquardt, K. (Hauptautor); Henigin, P. L. A. (1989).** Deponiesickerwasseraufbereitung technische und wirtschaftliche Bewertung geeigneter Verfahren. 1. Auflage. expert Verlag.
- Medium Recipe, (2008).** Sammlung von Algenkulturen Göttingen.
- Mortimer, C.E. (1996).** Chemie. 6. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York.
- Mutschmann/Stimmelmayer, Fritsch, P, Hoch, W. et al. (2014).** Taschenbuch der Wasserversorgung. 16. Auflage. Springer Vieweg. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Neis, U. (2010).** Symbiotische Abwasserreinigung mit Algen-Bakterien-Aktivschlamm. TU Hamburg-Harburg, Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz.
- Nentwig, W.; Bacher, S.; Beierkuhnlein, C. et al. (2004).** Ökologie 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin.
- Phytolutions, (2012).** Industrielle Produktion und Verwertung von Algen. Umwelttage 2012, Bremen.
- Probst, W.; Schuchardt, P. (Hg). (2007).** Abiturwissen Biologie. 2. Auflage. Dudenverlag Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich.
- Raven, P. H.; Evert, R. F.; Eichhorn S. E. (Hrsg. (dt. Ausgabe): Friedl, Thomas; Gillet, Elizabeth; Komor, Ewald; Langenfeld-Heyser, Rosemarie; Pfanz, Hardy; Uhlarz, Helmut):** Biologie der Pflanzen (4. Auflage, 2006 (dt. Ausgabe)), Walter de Gruyter Berlin New York.
- Richert, O.; Stelling, A. (2002).** Entwicklung und Erprobung einer großtechnischen Versuchsanlage zur kombinierten Abluft- und Prozesswasseraufbereitung aus biologischen Abfallbehandlungsanlagen mittels Algentechnologie (EVA). MIN BWFT. Förderkennzeichen 0281110/5
- Richter, G. (1988).** Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. 5. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York.
- Richter, G. (1996).** Biochemie der Pflanzen. 6. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart New York.
- Richter, G. (1997).** Stoffwechselphysiologie der Pflanzen – Physiologie und Biochemie des Primär- und Sekundärstoffwechsels. 6. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart New York.
- Riedel, E. (2010).** Allgemeine und Anorganische Chemie. 10. Auflage. De Gruyter Verlag.
- Rosenwinkel, K.-H., Cornelius, A., Rhöle, D. (2004).** Abschlussbericht: Großtechnisches Untersuchungsvorhaben zur Deammonifikation von Stickstoff in hochbelasteten Teilströmen mit Hilfe eines Schwebbettverfahrens. Ruhrverband, ISAH, PURAC, Ministerium für Umwelt, Natur, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Hannover/Essen.
- Ruiz-Martinez, A.; Martin Garcia, N.; Romero, I. et al. (2012).** Microalgae cultivation in wastewater: Nutrient removal from anaerobic membrane bioreactor effluent. In: Bioresource Technology, Volume 126.
- Round, F. E. (1968).** Biologie der Algen Eine Einführung. 1. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart.

- Round, F. E. (1973).** Biologie der Algen. 2. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart.
- Round, F. E. (1974).** Biologie der Algen Eine Einführung. 2. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart.
- Schmid, G. (1992).** Deponietechnik / Verordnungen, Vorschriften, Altlasten, Standortfaktoren, Abdichtungen: Verfahren und Bedingungen, Deponiesanierung. 1. Auflage. Vogel-Fachbuch: Umweltschutz, Entsorgungstechnik.
- Schneider, J.; Gäth, S. (2012).** Mikroalgen – Rohstoffquelle der Zukunft? Spiegel der Forschung, Volume 1.
- Schulz, K. J., (2015)** Untersuchungen zur Wachstumsrate von Algen im Medium Deponiesickerwasser, Bachelorarbeit FH Bielefeld. 2015.
- Schulz, R. (2010).** Mikroalgen – klein, aber groß im Kommen. Vortrag, Kinder- und Schüleruni Kiel. Botanisches Institut und Botanischer Garten, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Schwedt, G. (2007).** Taschenatlas der Analytik. 3. Auflage. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Schwetlick, K. (2001).** 21. *Organikum*. 21. Auflage. Wiley-VCH Weinheim New York Chichester Brisbane Singapore Toronto.
- Schwister, K. u.a. (1999).** Taschenbuch der Chemie. 2. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig.
- Schwister, K. (Hrsg.) (2003).** Taschenbuch der Umwelttechnik. 1. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Schwoerbel, J.; Brendelberger, H. (2005).** Einführung in die Limnologie. 9. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag.
- Sigg, L.; Stumm, W. (2011).** Aquatische Chemie – Einführung in die Chemie natürlicher Gewässer. 5. Auflage. vdf UTB Verlag.
- Sitte, P.; Weiler, E. W., Kadereit, J. W. et al. (2002).** Strasburger Lehrbuch der Botanik. 35. Auflage. Spektrum Akademischer VerlagGustav Fischer.
- Sonnleitner, V.; Rojacher, J. (2009).** BASICS Biologie. 1. Auflage. Elsevier Urban & Fischer München Verlag.
- Stöcker, F. W.; Dietrich, G. (1986).** Biologie, Band 1 A – ME. 6. Auflage. VEB F.A. Brockhaus Verlag.
- Su, Y.; Mennerich, A.; Urban, B. (2011).** Synergistic cooperation between wastewaterborn algae and activated sludge for wastewater treatment: Influence of algae and sludge inoculation ratios. *Bioresource Technology*, Heruntergeladen auf: [www. sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) (zuletzt aufgerufen am: 11.09.2014).
- Thiele, S.; Salzer, R.; Zuern, A. (2014).** <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/croma/kalibrierung.vlu.html> (zuletzt aufgerufen am: 30.08.2014).
- Thomé-Kozmiensky, K. (Hrsg.) (1987).** Deponie Ablagerung von Abfällen. 1. Auflage. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH Berlin.
- Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.), Collins, H.-J. (1997).** Abfallwirtschaft am Wendepunkt. 1. Auflage. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.
- Uhlmann, D.; Horn, W. (2001).** Hydrobiologie der Binnengewässer. 1 Auflage. UTB Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- Umweltrecht** – Wichtige Gesetze und Verordnungen zum Schutz der Umwelt (23. Auflage, **2012**), Beck-Texte im dtv, Abwasserabgabegesetz AbwAG (Fassung des 18. Januar 2005) § 3 Absatz 1 (S. 389).
- Vauth, M. (2015).** Bachelorarbeit: Untersuchungen zum Einfluss von Algen auf die Konzentration von Inhaltsstoffen ausgewählter Abwässer unter Variation der Versuchsparameter. Fachhochschule Bielefeld.
- Voet, D.; Voet J. G.; Pratt, C. W. (Hrsg. (dt. Ausgabe): Beck-Sickinger, Anette G.; Hahn, Ulrich):** Lehrbuch der Biochemie (2. Auflage, **2010**), Wiley VCH VerlagGmbH & Co KGaA.
- Wegl, R. (1985).** Das Leben im Abwasser, Biologische Beurteilung von Abwasserreinigungsanlagen, verschmutzten Wasserläufern, hypertrophen Gewässern und Abwässern aller Art. 1. Auflage. F. Hirthammer Verlag München.
- Weiler, E.W., Nover, L. (2008).** Allgemeine und molekulare Botanik. 1. Auflage. Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York.

Weiss, A. (2011). Energie- und Rohstoffherzeugung mit Mikroalgen. Vortrag auf der Ökobilanz-Werkstatt 2011, RWTH Aachen.

Wilderer, P. A. (Hrsg.); Eisner, P. (Hrsg.); Leonhard, K. (1992). Die Deponie des 21. Jahrhunderts (16. Mülltechnisches Seminar). 1. Auflage. Bericht aus Wassergüter- und Abfallwirtschaft der technischen Universität München, Berichtsheft Nr. 113, Druck: Hieronymus Buchreproduktions-GmbH.

Worch, E. (Hrsg.: Bahadir, Müfit; Collins, Hans-Jürgen; Hock, Bertold) (1997). Wasser und Wasserinhaltsstoffe - Eine Einführung in die Hydrochemie. 1. Auflage. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart Leipzig.

Zilch, K., Diederichs, C.J., Katzenbach, R. et al. (2013). Wasserbau, Siedlungswasserwirtschaft, Abfalltechnik. 2. Ausgabe. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.

Internetquellen:

www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0249.pdf (Stand: 10.08.2015)

<http://www.chlorella-vulgaris.eu/> (Stand: 01.08.2015)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Alge> (Stand: 07.08.2015)

www.wikipedia.org/wiki/pH-Wert (Stand: 18.07.2015)

https://de.wikipedia.org/wiki/Chlorella_vulgaris (Stand: 28.08.2015)

https://de.wikipedia.org/wiki/Euglena_gracilis (Stand: 28.08.2015)

<http://www.zentrum-der-gesundheit.de/chlorella-algen-pi.html> (Stand: 25.07.2015)

www.creed-ev.de (Stand: 30.07.2015)

www.wasser-wissen.de (Stand: 22.07.2015)

<http://www.uni-goettingen.de/en/184982.html> (Stand: 30.08.2015)

www.chemie.de (Stand: 07.08.2015)

www.das-deutschland.de (Stand: 25.07.2015)

<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/abwv/gesamt.pdf>
(abgerufen am 26.07.2015), Version 2014

<http://scienceservices.de> (abgerufen am 05.07.2015)

<https://de.vwr.com> (abgerufen am 05.07.2015)

<https://www.algaescrubbing.com/threads/algae-scrubber-basics.264/>

<http://www.algas-invest.de/ueber-algas-invest/services/>

<https://www.biooekonomie-bw.de/de/fachbeitrag/aktuell/wie-mikroalgen-kohlendioxid-binden-und-als-rohstoff-dienen/>

<http://www.bing.com/videos/search?q=mikroalgen+&&view=detail&mid=4D02838EC842791E3F384D02838EC842791E3F38&rvsmid=1854DE8452715C52386E1854DE8452715C52386E&FORM=VDQVAP>

<http://www.bing.com/videos/search?q=mikroalgen+&&view=detail&mid=76781D2EA66F85269A3576781D2EA66F85269A35&rvsmid=1854DE8452715C52386E1854DE8452715C52386E&fsscr=-330&FORM=VDFSRV>

<http://www.bing.com/videos/search?q=mikroalgen+&&view=detail&mid=7DDF2B7AA0D4FDDCD78C7DDF2B7AA0D4FDDCD78C&rvsmid=1854DE8452715C52386E1854DE8452715C52386E&fsscr=-330&FORM=VDFSRV>

von <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02818001#page-1>

<http://www.limnosun.de/documents/Rohren-MAK.pdf> (Dezember 2015)

<https://www.thm.de/site/hochschule/aktuelles/aus-lehre-und-forschung/3881-abwasserreinigung-mit-algen-3.html> (August 2016)

<http://biooekonomie.de/interview/mikroalgen-als-gruene-klaerwerker> (Februar 2017)

Anhang:

Algen Projekt : Versuchsverlauf an der halbtechnischen Algenrinne auf der PoH 2015-2016

Versuch-Nr.	Versuchsanordnung, Zeitraum	Algen	Sickerwasser-Anteil in %	CO ₂ -Begasung	Bemerkung
1.0	Cv angeimpft, 24.04.15 - 10.06.15	Cv	20	nein	
2.0	Cv angeimpft, 16.06.15 - 28.07.15	Cv	20	ja	
3.0	Cv angeimpft, 04.08.15 - 22.09.15	Cv	20	ja	
4.0	200 Liter Sickerwasser dzugegeben , 22.09.16 - 07.10.15	Cv	20	ja	
5.0	Cv angeimpft und Sickerwasser dazugegeben, 04.08.15 - 29.09.15	Cv	20	ja	Sickerwasser am : 07.10.15 (200 L); 27.10.15 (500 L); 04.11.15 (200 L); 11.11.15 (250 L); 25.11.15 (150 L); 02.12.15 (50 L); 15.12.15 (500 L); 21.12.15 (150 L); 01.03.16 (200 L); 07.03.16 (200 L) dazugegeben. Wasser am 11.11.15 (200 L); 21.12.15 (200 L)
5.1	Zentrifugieren der Algenmasse, 07.01.2016	Ernte aus Algenrinne : Frische und gefrorene Masse	–	nein	Trennung von gefrorene Masse ist besser
5.2	Algenernte :Versuch mit der Saftpresse, 07.01.2016 - 08.01.2016	Ernte aus Algenrinne	–	nein	Saftpresse
5.3	Versuch mit Filterpapier-Durchlässigkeit von der Algen-erntemass	Ernte aus Algenrinne	–	nein	Wasserstrallpumpe
6.0	Cv angeimpft, 29.04.16 - 11.05.16	Cv	20	ja	1l (2 Flaschen je 500ml) Medium angesetzt
7.0	Algen von Holm angeimpft in der Rinne und zwei Eimer, 12.05.16 -24.05.16	Holm	20	ja	1l (2 Flaschen je 500ml) Medium angesetzt
8.0	"Neuen" Algen angeimpft in der Rinne und zwei Eimer, 28.05.16 -08.06.16	"Neu"	20	ja	1l (2 Flaschen je 500ml) Medium angesetzt
9.0	Cv angeimpft, 09.06.16 - 23.06.16	Cv	20	ja	1l Flasche Medium angesetzt
10.0	"Neuen" Algen angeimpft in der Rinne und zwei Eimer, 23.06.16 -21.07.16	Neue Algen au der Rinne	21	ja	1l (2 Flaschen je 500ml) Medium angesetzt

Belichtungsversuche

Nr.	Belichtungsversuch mit	Anfang	Ab-schluss	Dauer in d	Al-gen-Typ	Sicker-was-seran-teil in %	Medium	Be-lichtung in h/d	Magnet-rührer U/min
1	Chlorella vulgaris mit Sickerwasser(gefiltrert)	06.03.15	16.03.15	10	Cv	0,10,15, 20	BB +Dest. Wasser	12	80
2	Chlorella vulgaris mit Sickerwasser(gefiltrert)	18.03.15	27.03.15	10	Cv	0,10,15, 20	BB +Dest. Wasser	12	80
3	Chlorella vulgaris mit Sickerwasser(gefiltrert)	30.03.15	28.04.15	30	Cv	0,20,25, 30	BB +Dest. Wasser	12	80
4	Belichtungsversuch mit Euglena graalis mit 0%, Sickerwasser (gefiltrert)	12.05.15	26.05.15	15	Eg	0,10,15, 20	Volvic, Bod.lsg.	12	0
5	Euglena graalis mit 0%, Sickerwasser (gefiltrert)	26.05.15	08.06.15	14	Eg	0,10,15, 20	Volvic, Bod.lsg.	12	0
6	Euglena graalis mit Sickerwasser	12.08.15	20.08.15	9	Eg	0,10,15, 20	Volvic, Bod.lsg.	6	80
7	Chlorella vulgaris mit Sickerwasser	12.08.15	20.08.15	9	Cv	0,10,15, 20	BB +Dest. Wasser	6	80
8	Chlorella vulgaris mit Sickerwasser	25.08.15	02.09.15	9	Cv	0,10,15, 20	BB +Dest. Wasser	3	80
9	Chlorella vulgaris mit Sickerwasser	08.09.15	18.09.15	10	Cv	0,10,15, 20	BB +Dest. Wasser	9	80
10	Chlorella vulgaris mit Sickerwasser	20.10.2015	26.10.2015	7	Cv	0,10,15, 20	BB +Dest. Wasser	12	80
11	Chlorella vulgaris mit Sickerwasser	04.12.15	14.12.15	11	Cv	0,10,15, 20	BB +Dest. Wasser	15	80
12	Euglena graalis mit Sickerwasser	19.01.16	26.01.16	8	Eg	0,10,15, 20	Volvic, Bod.lsg.	–	80
13	Sickerwasser VF4, 4 Proben aus der Rinne	11.08.16	18.08.16	8	"Neu"	VF4	Algen, dest. Wasser	12 h, künstlich	80
14	mit Sickerwasser, 4 Proben aus der Rinne	24.08.16	09.09.16	17	"Neu", Cv	VF4.,	Algen, dest. Wasser	12 h, künstlich	50

BB = Bold Basal Medium; Bod.lsg. = Bodenlösung; VF = Verdünnungsfaktor

Ammonium-/ Ammoniak-Ausgasung**Versuch 1:**

Sickerwasser 100 ml- Rühren und evtl. Gas auffangen im Borsäure + Indikator

Am 30.08.16 wurde Gasentwicklung beobachtet : 12:00 , 14:00 und 16:00 Uhr; Probe 1:10 Verdünnt

Ammoniumausgasung -Versuch 1			
Datum	30.08.2016	31.08.2016	02.09.2016
Uhrzeit	10:00	12:00	14:00
LF (mS/cm)	8	7,23	6,43
pH	7,6	8,28	8,17
NH ₄ -N (mg/L N)	286	280	300

Ergebnis Versuch 1: NH₄-N gast nicht aus.

Versuch 2:

Sickerwasser 100ml + Algen 2ml - Rühren und evtl. Gas auffangen in Borsäure + Indikator;
 Probe 1:10 Verdünnt

Ammoniumausgasung -Versuch 2					
Datum	14.09.2016	15.09.2016	16.09.2016	19.09.2016	23.09.2016
Uhrzeit	16:30	14:10	14:15	13:00	—
LF (mS/cm)	6,55	6,37	6,29	6,3	7,43
pH	8,28	8,35	8,41	8,41	8,36
NH ₄ -N (mg/L N)	280	260	280	260	290

Ergebnis Versuch 2: NH₄-N gast nicht aus.

Geräteliste des AML Labor- **Großgeräte -Raum Nassanalytik:**

Gerät	Hersteller	Analyse von:	InventarNr.	von
Ionenchromatograph (762 Interface + 732 Detector + 791 VA Detektor + 733 IC Separation Center + 752 Pump Unit + 709 Pump + 766 Sample Processor) 833 IC Liquid Handling Unit 754 Dialysis Unit	Metrohm	Fluorid, Chlorid, Nitrit, Nitrat, Sulfat	9160069	07 / 1999
	s.o.	s.o.	9160113	12 / 2005
	s.o.	s.o.	9160075	06 / 2001
Fotometer UV-2700 Autosampler ASX- 260	Shimadzu	Ammonium-N, Nitrit-N, Ni- trat-N, Phosphat, ChromVI, Eisen, Sulfat, Kupfer, Bor, Cyanide, Sulfid, Trübung s.o.	A 11675300587 LP	07 / 2015
	s.o.		061513A260	07 / 2015
CFA mit Autosampler	Seal Analyti- cal	Ammonium-N, Nitrit-N, Nit- rat-N	9160124-1	02 / 2008
TOC (DimaTOC 2000 + TNb- Ein- heit) mit angebautem Auto- sampler DimaAir Gasgenerator	Dimatec	TC,TIC,TOC, TNb	9160079	12 / 2001
	s.o.	Reinluft herstellen	9160085	01 200 4

Raum GC Probenvorbereitung

Gerät	Hersteller	Analyse von:	InventarNr.	von
Mikrowelle Mars 5	CEM	Aufschlüsse	9160096	01 / 2004

- ***Raum AAS***

Gerät	Hersteller	Analyse von:	InventarNr.	von
Flamme- und Graphitrohr- AAS Solaar M 6 Arsen- Einheit	Thermo Electron	Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Fe, Mn, As, Cr, Mg, Ca, Na, K	9160086	09 / 2002
	s.o.	As	9160115	07 / 2006
ICP 7000 Series: iCAP 7200 Duo-Spectrometer mit Autosampler ASX 260 und Kühler	Thermo Fisher Scientific	Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Fe, Mn, As, Cr, Mg, Ca, Na, K, B, P, Al, Se, Ba, Mo, Sb	9142616-01	02 / 2016

- *Raum Probenvorbereitung*

Gerät	Hersteller	Analyse von:	InventarNr.	von
Zentrifuge Rotina 380 R	Hettich	Zentrifugieren	9142607	12/2011

- *Raum AOX*

Gerät	Hersteller	Analyse von:	InventarNr.	von
XPlorer	Trace Elemental	AOX Säulen- und schüttel- methode	9142614-01	07/ 2014
EFU 100	Euroglas	Filtrieren für AOX	9185670/2	06 / 2005
XPrep 6	Schirmer Analytik	Säulenanreicherung für AOX	9142610	01 / 2012

02 Kleingeräte / Prüfmittel

Gerät	Hersteller	Analyse von	Raum	Inventar-Nr.	von
Ionenmeter inoLab pH / ION 735	WTW	Chlorid / Fluorid	Feststoff- analytik	9161017	07 /2006
Analysenwaagen			Nassana- lytik		
A 200 S	Sartorius	Wiegen	Feststoff- analytik	9160034	01 / 1989
CP 224 S	Sartorius	Wiegen	Nassana- lytik	9160103	01 /2005
TE 214 S	Sartorius	Wiegen	AOX	9160126-2	11 / 2008
Präzisions- waagen			Nassana- lytik		
U 6100	Sartorius	Wiegen	Feststoff- analytik	9160035	01 / 1989
TE 3102 S	Sartorius	Wiegen	Nassana- lytik	9160126-1	11 / 2008
Tragbares Fotometer Nanocolor 400 D	Macherey & Nagel	Messung Küvettentests	Nassana- lytik	9160088	03 /2003
Muffelofen Typ M 104	Heraeus Thermo Scientific	Glühverlust	Feststoff- analytik	9160123	12 / 2007
Trockenschrank	Heraeus Thermo Scientific	Trockenrück- stand	Feststoff- analytik	9160105	01 / 2005
Mikroskop	Euromex	Mikroskop.Bild	Lagerraum	9160051	1988
Tragbares O2- Gerät LDO HQ 40d	Hach- Lange	Sauerstoff	AOX	91426012	05/2012
Tragbares pH- Wert- und Leitf.messgerät Sension 156	HachLange	pH-Wert / Leitf.	AOX	9188008-17	10 / 2008