



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Bachelorarbeit
im Studiengang Umwelttechnik
zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science (B.Sc.)

**Erweiterte Abwasserbehandlung durch Bodenpassage mit anschließender Entkeimung:
Nutzen, Dimensionierung und Alternativen**

vorgelegt von

Sebastian Jürgen Alexander Mannes

Matrikelnummer: [REDACTED]

Hamburg,

den 20. April 2021

Gutachter: Prof. Dr.	Jörn Einfeldt	(HAW Hamburg)
Gutachter: Dr.	Norbert Müller-Blanke	(TIA - Technologien zur Industrie- Abwasser-Behandlung GmbH)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der Firma

TIA - Technologien zur Industrie-Abwasser-Behandlung GmbH

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Vorstellung des Forschungsprojekts	2
1.3 Zielsetzung	3
2 Technische Grundlagen	3
2.1 Re-Use von geklärten Abwässern	3
2.2 Stand der Technik der verwendeten Verfahren	9
2.2.1 Filtration.....	9
2.2.2 Entkeimung	14
2.2.2.1 Allgemein	14
2.2.2.2 UV-Elimination	19
2.2.2.3 Chlorung	21
2.2.2.4 Ozonung	22
2.2.2.5 Membranfiltration	24
2.3 Bodenpassage Versuchsanlage (VA).....	28
2.3.1 Grundlagen.....	28
2.3.3 Entwicklung & Aufbau.....	29
2.3.4 Einflussfaktoren	32
2.3.5 Messreihen und Ergebnisse	33
3 Material & Methoden.....	36
3.1 Vorgehen	36
3.2 Analytik	36
3.3 Bewertungskriterien	37
4 Durchführung	38

4.1	Auslegung und Aufbau der Filtrationsverfahren.....	38
4.2	Auslegung und Aufbau der Entkeimungsverfahren	42
4.3	Investitions-, Betriebs- und Personalkosten	46
5	Ergebnisse.....	48
5.1	Vergleich Bodenpassage mit alternativen Verfahren.....	48
5.1.1	Vergleich der <i>BodenpassageTA</i> , <i>SandfilterTA</i> und <i>MembranfilterTA</i>	48
5.1.2	Vergleich der UV-LED, UV-Strahler, Ozonung und Chlorung.....	54
5.1.3	Kombinierter Vergleich der technischen Anlagen.....	57
5.2	Optimierungs- und Einsatzmöglichkeiten der <i>BodenpassageTA</i>	58
5.2.1	Optimierung der <i>BodenpassageTA</i>	58
5.2.2	Einsatzmöglichkeit der <i>BodenpassageTA</i>	60
6	Fazit.....	62
	Literaturverzeichnis	64
	Anhang	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Reinigungsprozesse in Bodenfiltern	12
Abbildung 2:	Gehalt an fäkalcoliformen Bakterien im Rohabwasser und in den Abläufen der einzelnen Reinigungsstufen einer kommunalen Kläranlage	15
Abbildung 3:	Varianten der Membranfiltration	24
Abbildung 4:	Prinzip Membranfiltration im Cross-Flow-Verfahren.....	26
Abbildung 5:	Scaling und Fouling an Membranen	27
Abbildung 6:	Prozessschema und Aufbau der BodenpassageVA	31
Abbildung 7:	BodenpassageVA ohne UV-Einheit in Güster	31
Abbildung 8:	Rinne & UV-Bestrahlungseinheit	32
Abbildung 9:	Anordnung der Komponenten und Probenahmestellen	34
Abbildung 10:	Investitionskosten der Technischen Anlagen	49
Abbildung 11:	Jährliche Kosten der Technischen Anlagen inkl. Abschreibung der Investitionskosten	50

Abbildung 12: Aufschlüsselung aller jährlichen Kostenfaktoren der BodenpassageTA	50
Abbildung 13: Aufschlüsselung aller jährlichen Kostenfaktoren der SandfilterTA	51
Abbildung 14: Aufschlüsselung aller jährlichen Kostenfaktoren der MembranfilterTA	51
Abbildung 15: Kosten und Energieverbrauch pro m ³ behandeltem Wasser	52
Abbildung 16: Auswirkungen des Strompreises auf die Kosten/m ³ (TA)	53
Abbildung 17: Investitionskosten der Entkeimungsverfahren	54
Abbildung 18: Jährliche Kosten der Entkeimungsverfahren inkl. Abschreibung der Investitionskosten	55
Abbildung 19: Kosten und Energieverbrauch pro m ³ behandeltem Wasser (Entkeimung)	55
Abbildung 20: Auswirkungen des Strompreises auf die Kosten/m ³ (Entkeimung)	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Güteklassen für die Qualität von aufbereitetem Wasser und zulässige landwirtschaftliche Verwendungszwecke und Bewässerungsmethoden	6
Tabelle 2: Anforderungen an die Qualität von aufbereitetem Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung	7
Tabelle 3: Überblick der Wiederverwendungsmöglichkeiten von geklärten Abwässern	8
Tabelle 4: Verfahren von Raumfiltern	13
Tabelle 5: Einteilung Entkeimungsverfahren	16
Tabelle 6: Eigenschaften der gebräuchlichen technischen Entkeimungsverfahren	18
Tabelle 7: Entfernungsraten (log10) von pathogenen Keimen und Viren	18
Tabelle 8: Mittlere Reduktionsleistung der BodenpassageVA	35
Tabelle 9: Küvettentests für Photometermessung	37
Tabelle 10: Übersicht durchgeführte Verfahrenskombinationen	45
Tabelle 11: Vor- und Nachteile der vorgestellten Verfahren	53
Tabelle 12: Vor- und Nachteile der alternativen Entkeimungsverfahren	57
Tabelle 13: Verfahrenskombination Kosten/ m ³	58
Tabelle 14: Verfahrenskombination Kosten/ Jahr	58
Tabelle 15: Grenzwerte für Anwendungen zur Wasserwiederverwendung	61

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AG	Aktiengesellschaft
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
ATV	Abwassertechnischen Vereinigung e.V. (jetzt: DWA)
BSB₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
c	Konzentration
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNP	Desinfektionsnebenprodukte
DNS	Desoxyribonukleinsäure (Erbinformation)
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FTU	Formazine Turbidity Unit (Einheit für Trübung)
GAK	Granulierte Aktivkohle
HT-Rohr	Hochtemperaturrohr
IBC	Intermediate Bulk Container (ugs. Gittertank)
KBE	Koloniebildende Einheit
KW	Kohlenwasserstoffe
kWh	Kilowattstunde
LED	Licht-emittierende Diode (Leuchtdiode)
log	Logarithmus
log₁₀	Zehnerlogarithmus
MF	Mikrofiltration
MPN	Wahrscheinlichste Anzahl (most portable number)
NF	Nanofiltration
N_{ges}	Gesamtstickstoff
NH₄⁺	Ammonium
NO₂⁻	Nitrit
NO₃⁻	Nitrat
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Einheit für Trübung, identisch mit FTU)
O	Sauerstoff
O₂	molekularer Sauerstoff
O₃	Ozon
p.	Seite (page)
PAK	Pulveraktivkohle
PAK	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe
PAN	Polyacrylnitril
PE	Polyethylen
PES	Polyethersulfon
P_{ges}	Gesamtphosphor
pH	Maß für Säure- und Basencharakter
PIA	Petrischale mit integriertem Ausstrichsystem

PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
Q	Volumenstrom / Durchflussmenge
TA	Technische Anlage
TH	Technische Hochschule
TIA	Technologien zur Industrie-Abwasser-Behandlung
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TS	Trockensubstanz
TSS	Abfiltrierbare Stoffe (Total suspended solids)
UF	Ultrafiltration
UV	Ultraviolettstrahlung
VA	Versuchsanlage
W	Watt

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Klimawandel - Bevölkerungsexplosion - Wasserknappheit - Mikroschadstoffe – Nährstoffe im Grundwasser - resistente Keime. Diese Begriffe sind in der heutigen Zeit nicht mehr nur miteinander in Verbindung stehende Schlagwörter von Fachleuten, sondern Thematiken, die bereits in der Politik und der Öffentlichkeit für Diskurs oder Konsens sorgen.

Das daraus resultierende Bewusstsein, dass Gesundheit, Hygiene, selbst Landwirtschaft und Industrie nicht ohne sauberes Wasser möglich sind, ist zwar vorhanden und sicheres Wasser ist von den Vereinten Nationen als Menschenrecht festgelegt worden, allerdings scheint der Weg laut des aktuellen UN-Weltwasserberichts (2021) noch weit zu sein (UNESCO, 2021): Demnach haben aktuell 2,2 Milliarden Menschen keinen Zugriff zu sicherem Trinkwasser. Über die Hälfte der Weltbevölkerung haben keine hygienisch sicheren sanitären Anlagen. Die daraus resultierende mangelnde Hygiene stellt eine Bedrohung gerade für weniger entwickelte Regionen dar. Der globale Wasserverbrauch steigt jährlich stetig an. Der weltweite größte Verbraucher von Wasser ist mit ca. 69% die Landwirtschaft, die, aufgrund des Bevölkerungswachstums, immer mehr Menschen versorgen muss (UNESCO, 2021). In vielen Regionen der Welt ist, aufgrund von ungleichmäßigen Ressourcenverteilungen, die Verfügbarkeit von Wasser bereits stark begrenzt und teilweise sogar rückläufig (WavE, 2016, p. 4).

Eine effizientere Nutzung der verfügbaren Wasserressourcen wird immer essenzieller für eine funktionierende Gesellschaft und der Wunsch nach zukunftsweisenden Entwicklungen, die den zu erwartenden Trend entgegenwirken können, immer stärker. Über drei Viertel aller Abwässer weltweit gelangen unbehandelt in Flüsse, Seen und Meere (WavE, 2016, p. 4).

Daraus resultiert eine Verschlechterung der mikrobiologischen und physikalisch-chemischen Wasserqualität und eine nachhaltige Schädigung für Umwelt, Tiere und Menschen. Durch das Trinken von kontaminiertem Wasser sterben jährlich ca. 2 Millionen Menschen. Dies betrifft vor allem Kinder in Entwicklungs- und Schwellenländern (Reischert, 2011, pp. 1-2).

Der Zugang aller Menschen zu sauberem Trinkwasser und Sanitäranlagen sowie Investitionen von Infrastrukturen und Systemen zur Abwasseraufbereitung ist ein essenzieller Punkt der Agenda 2030 der UN – Weltgemeinschaft (UNESCO, 2021).

Eine gesicherte Aufbereitung aller Abwässer schützt Menschen und Gewässer vor anthropogenen Verschmutzungen. Insbesondere die erweiterte Aufbereitung von geklärten Abwässern und Oberflächengewässern bietet großes Potential. Hierbei kann der Einsatz einfacher Mittel die Wasserqualität fördern, wodurch das Wasser wiederverwendet und somit die steigende Nachfrage nach sauberem, sicherem Trink- und Brauchwasser ausgeglichen werden kann.

1.2 Vorstellung des Forschungsprojekts

Auf dem Ansatz der weiteren Aufbereitung von geklärtem Abwasser fußt das Forschungsprojekt „*Entwicklung einer Hochdurchsatz (500l/h)-UV-C-LED-Reinwasserdesinfektions-anlage mit adaptivem Reaktordesign für den Einsatz in stark getrübbten (Ab-)Wässern mit bis zu 200 NTU*“ zwischen der TIA (Technologien zur Industrie-Abwasser-Behandlung) GmbH aus Breitenfelde und der Technischen Hochschule (TH) aus Ulm. NTU steht hier für Nephelometric Turbidity Unit und ist die Einheit für die Trübungsmessung. Aufgrund der Bedeutung hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie dieses Projekt gefördert (TIA GmbH, 2020).

Die daraus entwickelte Anlage trägt den Arbeitstitel *Bodenpassage*. Ein Prototyp der *Bodenpassage* wurde im Zeitraum von Mai 2018 bis Februar 2020 entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Während dieser Zeit wurden sowohl von der TH Ulm als auch von der TIA GmbH Messungen durchgeführt.

Die entwickelte Bodenpassage besteht aus zwei belüfteten Filtern, sowie einer LED-UV-Entkeimung zur Abtötung von Bakterien. Sie wurde als vierte Reinigungsstufe einer bestehenden Kläranlage nachgeschaltet, um vorgereinigtes Abwasser mit einfachen Mitteln aufzubereiten. Als übergeordnetes Ziel wurde eine direkte und erweiterte Wiederverwendung von Abwasser (und gegebenenfalls von Oberflächenwasser) vor allem in strukturschwächeren Regionen festgelegt.

Sie hat den Anspruch, ohne großes Knowhow betrieben zu werden und nur wenig Energie zu verbrauchen (TIA GmbH, 2020). Aus diesem Grund besteht die Anlage aus einfachen Komponenten, die annähernd überall auf der Welt erhältlich sein sollen.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Evaluierung der Wirtschaftlichkeit des entwickelten Verfahrens der *Bodenpassage* in einem hochskalierten Maßstab. Der Maßstab wurde nach dem Wunsch der *TIA GmbH* in einer Größe gewählt, die für einen Einsatz in Schwellen- und Entwicklungsländern realistisch ist. Für die Bewertung wird die Bodenpassage mit alternativen Reinigungsverfahren nach dem Stand der Technik verglichen. Der Vergleich soll die hochskalierten Verfahren (*Bodenpassage* und Alternativen) hinsichtlich ihrer Betriebswirtschaftlichkeit und der betriebstechnischen Anwendbarkeit (Aufwand, Umweltverträglichkeit, Reinigungsleistung) beleuchten. Dadurch sollen weitere Optimierungs- und Entwicklungsmöglichkeiten der Bodenpassage aufgezeigt werden.

Bezogen auf die erreichte Reinigungsleistung werden zudem die Einsatzmöglichkeiten der Bodenpassage dargestellt.

2 Technische Grundlagen

2.1 Re-Use von geklärten Abwässern

Die Wiederverwendung (ReUse) von Wasser beziehungsweise „Integriertes Wasserressourcenmanagement bedeutet vor allem, Bedarf und Ressource bezüglich Menge und Qualität in Einklang zu bringen“ (Haaken, 2014, p. 14).

„Die Aufbereitung und Wiederverwendung von behandeltem Abwasser bietet ein großes Potenzial. Um die Nutzung der Wasserwiederverwendung zu unterstützen und dazu anzuregen, sollte die Angabe spezieller Verwendungszwecke im Rahmen dieser Verordnung die Mitgliedstaaten nicht daran hindern, die Verwendung von aufbereitetem Wasser für andere Zwecke, einschließlich industrieller sowie mit Freizeit und Umwelt verbundener Zwecke, zuzulassen, wenn das angesichts der einzelstaatlichen Gegebenheiten und Erfordernisse für notwendig erachtet wird, sofern

ein hohes Maß an Schutz für die Umwelt sowie für die Gesundheit von Mensch und Tier sichergestellt ist.“ (EU, 2020, p. Grund 27)

Bei dem ReUse von Wasser wird zwischen der indirekten und direkten Wiederverwendung unterschieden. Bei der indirekten, ungeplanten Wiederverwendung wird das Wasser nach Verdünnung durch Einleiten in Oberflächengewässer und nach der Versickerung durch die natürliche Bodenpassage als Grundwasser wiedergenutzt. Dadurch wird gereinigtes Abwasser aus Kläranlagenabläufen wieder ein Teil des natürlichen Wasserkreislaufs. Seit Beginn des letzten Jahrhunderts rückt die direkte Wiederverwendung in den Fokus (Haaken, 2014, p. 4).

Die direkte Wiederverwendung (Mehrfachnutzung) kann mittels folgender Verfahren erfolgen:

- Mehrfache Nutzung des Wassers bei Anwendungen mit abgestuften Qualitätsanforderungen
- Kreislaufführung
- Kombination beider Systeme

Eine zusätzliche Aufreinigung, wie sie auch durch die natürlichen Prozesse der indirekten Wiederverwendung stattfindet, kann im technischen Maßstab ebenfalls einen erweiterten Nutzen ermöglichen (VDMA, 2010, p. 7). Die unterschiedlichen Anwendungen des Wassers setzen die Einhaltung von definierten Qualitätsanforderungen voraus. Nach den folgenden Merkmalen wird das Wasser beurteilt (VDMA, 2010, p. 4):

- Chemisch-physikalische Merkmale (Temperatur, pH-Wert, Färbung, Feststoffe, Trübung, Tenside, Salzgehalt/ Leitfähigkeit, Kohlenwasserstoffe (KWs), Schwermetalle, CSB)
- Biologische Inhaltsstoffe (Nährstoffe)
- Toxische Substanzen
- Hygienische Merkmale (pathogene Mikroorganismen)
- Organoleptische Merkmale (Geschmack, Geruch)

Mit den entsprechenden Anforderungen sollen die folgenden Ziele zum Schutz von Menschen, Tieren und der Umwelt verfolgt werden (Haaken, 2014, pp. 14-15):

1. Schutz der öffentlichen Gesundheit
 - Grenzwerte für Pathogene und toxische Wasserinhaltsstoffe
2. Schutz des Bodens, der Pflanzen, des Grundwassers und Oberflächengewässer
 - Begrenzung des Salz-, Nährstoff- und Schwermetallgehaltes in Böden und Wasser
 - Desinfektion von Brauchwasser
3. Sichere Speicherung
 - Begrenzung des Nährstoffgehalts und der Keimkonzentration gegen übermäßigen Biofilm- und Algenwachstum
 - Minimierung des Nährstoffeintrags
4. Akzeptanz
 - Berücksichtigung organoleptischer Parameter wie Geruch, Färbung, Trübung
 - Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Rahmenbedingungen, technischer Anforderungen, ökonomischer und regulatorischer Aspekte, der Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit.

Aufgrund von Unterschieden bezogen auf klimatische, geologische und geographische Voraussetzungen, ökonomische und soziale Aspekte und unterschiedlich verteilte Wasserressourcen gibt es keine allgemeinen globalen Regulierungen der Qualitätsbestimmungen für den ReUse von gereinigten Abwässern. Die Restkonzentration von anorganischen Nährstoffen, organischen Stoffen und die Keimbelastung stellen jedoch die prioritären Kriterien für eine sichere Wiederverwendung von häuslichen Abwässern dar. Industrieabwässer sind aufgrund der unterschiedlichen Charakteristiken (v.a. Salze, Schwermetalle, AOX, Kohlenwasserstoffe, etc.) generell schwieriger zu nutzen. (Haaken, 2014, pp. 14-15)

Die Anforderungen sind in entsprechenden Gesetzen und Verordnungen rechtlich geregelt. Diese Regelungen können je nach Wiederverwendungszweck auf verschiedenen Ebenen definiert sein. In der Verordnung 2020/741 des europäischen Parlaments und Rates vom 25. Mai 2020, geht es um die Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung (von aufbereitetem Wasser). (EU, 2020, p. Artikel 1)

Diese bezieht sich im Wesentlichen auf die Mindestanforderungen für den Einsatz für landwirtschaftliche Nutzung zu Bewässerungszwecken. Vor allem südeuropäische

Staaten nutzen aufbereitetes Wasser bereits seit vielen Jahren intensiv, allerdings mit unterschiedlichen Regelungen vor dem europaweiten Erlass der Verordnung 2020/741. (Umweltbundesamt, 2020)

Das behandelte Wasser wird für die Verwendungszwecke der Bewässerung in Güteklassen eingeteilt, die bestimmte Grenzwerte von Inhaltsstoffen nicht überschreiten dürfen (Mindestanforderungen). Produkte, die roh verzehrt werden, haben strengere Vorgaben und werden dementsprechend einer höheren Güteklasse zugeteilt als zum Beispiel Energiepflanzen. (EU, 2020, p. Anhang 1)

Tabelle 1: Güteklassen für die Qualität von aufbereitetem Wasser und zulässige landwirtschaftliche Verwendungszwecke und Bewässerungsmethoden (EU, 2020, pp. 16,17)

Mindestgüteklasse für die Qualität von aufbereitetem Wasser	Kategorie der Kulturpflanzen	Bewässerungs-methode
A	Alle Nahrungsmittelpflanzen, einschließlich roh verzehrten Hackfrüchten und Nahrungsmittelpflanzen, deren essbarer Teil unmittelbar mit dem aufbereiteten Wasser in Kontakt kommt	Alle Bewässerungs-methoden
B	Roh verzehrte Nahrungsmittelpflanzen, deren essbarer Teil über dem Boden erzeugt wird und nicht unmittelbar mit dem aufbereiteten Wasser in Kontakt kommt,	Alle Bewässerungs-methoden
C	verarbeitete Nahrungsmittelpflanzen und Non-Food-Kulturen, einschließlich Futterkulturen für milch- oder fleischerzeugende Tiere	* nur Tropfbewässerung
D	Industrie- und Energiepflanzen sowie aus Saatgut gewonnene Pflanzen	Alle Bewässerungs-methoden

(*) Tropfbewässerung (auch „Rieselbewässerung“) ist ein Mikrobewässerungsverfahren, bei dem die Pflanzen tropfenweise oder durch einen feinen Strahl mit Wasser versorgt werden. Dabei wird das Wasser in sehr kleinen Mengen (2-20Liter/Stunde) über ein System von Plastikschläuchen mit kleinem Durchmesser und als Emitter oder Tropfer bezeichneten Auslässen auf den Boden oder direkt unter die Bodenoberfläche geleitet.

Tabelle 2: Anforderungen an die Qualität von aufbereitetem Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung (EU, 2020, p. 18)

Güteklasse für die Qualität von aufbereitetem Wasser	Zielvorgabe für die Technologie	Qualitätsanforderungen				
		E. coli in KBE/100ml	BSB5 in mg/l	TSS in mg	Trübung in NTU	Sonstige
A	Zweitbehandlung, Filtration und Desinfektion	≤10 oder unter der Nachweisgrenze	≤10	≤10	≤5	<i>Legionella</i> spp.: < 1 000 KBE/l, wenn das Risiko der Aerosolbildung besteht Intestinale Nematoden (Eier von Helminthen): ≤ 1 Ei/Liter für die Bewässerung von Weideflächen oder Futterpflanzen
B	Zweitbehandlung und Desinfektion	≤100	Gemäß Richtlinie 91/271/EWG (Anhang I Tabelle 1)	Gemäß Richtlinie 91/271/ EWG (Anhang I Tabelle 1)	-	
C	Zweitbehandlung und Desinfektion	≤1000			-	
D	Zweitbehandlung und Desinfektion	≤10000			-	

Richtlinie 91/271/EWG Anhang I Tabelle1: Anforderungen aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen, die den Bestimmungen der Artikel 4 und 5 unterliegen (EU, 1991, p. 13)

Nach ähnlichen Bewertungskriterien erfolgt dies auch in anderen Rechtsvorschriften, die gegen Umweltrisiken und Risiken für die Gesundheit von Menschen und Tieren für weitere Wiederverwendungszwecke wirken sollen. Die Richtlinie 2006/7/EG dient dem Schutz der Qualität von Badegewässern, die Richtlinie 2006/118/EG dient dem Schutz des Grundwassers, die Verordnung Nr. 853/2004 soll die Lebensmittelhygiene sicherstellen und die TrinkwV die Gesundheit der Menschen schützen. Dies ist nur ein Auszug von Vorschriften, die die Anlagenbetreiber vor dem ReUse von behandelten Abwässern beachten müssen. (EU, 2020, p. Grund 27) (Verbraucherschutz, 2020)

Die Tabelle 3 zeigt einen Überblick der Möglichkeiten des ReUses entsprechend ihres Verwendungszweckes.

Tabelle 3: Überblick der Wiederverwendungsmöglichkeiten von geklärten Abwässern

Kategorien der Wiederverwendung	Beispiele
Landwirtschaftliche Bewässerung	<ul style="list-style-type: none"> - Bewässerung von Kulturpflanzen zum Verzehr und Nichtverzehr - Bewässerung von Blumenfeldern
Innerstädtische Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> - Bewässerung von Parks, Golfplätzen, Grünstreifen, Grünanlagen, Sportplätzen, Friedhöfen und Wohnanlagen - Toilettenspülwasser, Klimatisierung - Feuerlöschwasser
Industrielle Wiederverwendung	<ul style="list-style-type: none"> - Kühlwasser - Prozesswasser - Kesselspeisewasser
Freizeitnutzung	<ul style="list-style-type: none"> - Seen und Teiche - Erweiterung von Sumpfgebieten - Erhöhung der Wasserführung von Gewässern - Fischereien - Kunstschnee
Gewässerneubildung	<ul style="list-style-type: none"> - Grundwasseranreicherung - Vorbeugung der Salzwasserintrusion
Indirekte Wiederverwendung als Trinkwasser	<ul style="list-style-type: none"> - Beimischung in oberirdische Wasserspeicher - Beimischung im Grundwasserleiter

(Haaken, 2014, p. 5)

Diese Möglichkeiten der Wiederverwendung sind mitentscheidend für eine Bewertung von Reinigungsergebnisse. Anhand der spezifischen Grenzwerte kann eine Eignung des folgenden Konzepts der Bodenpassage für die jeweiligen Anwendungszwecke bestimmt werden.

2.2 Stand der Technik der verwendeten Verfahren

2.2.1 Filtration

Das Verfahren der (Abwasser-) Filtration zielt auf die physikalische Abtrennung partikulärer Inhaltsstoffe (abfiltrierbare Stoffe, kurz: AFS) eines Flüssigkeits-Feststoff-Gemisches (ATV, 1995, p. 2). Dies geschieht durch den Rückhalt von Partikeln (Kolloiden), die größer als die Poren des durchströmten Filtermaterials sind. Die Durchströmung eines Filters benötigt ein Druckgefälle, da das Filtermaterial einen Strömungswiderstand darstellt und somit einen Druckverlust verursacht. Dieser Filterwiderstand kann durch das natürliche Schwerefeld der Erde oder durch ein künstliches Druckgefälle, zum Beispiel durch eine Pumpe, überwunden werden.

Je nach Filtermaterial wird zwischen Oberflächen- und Raumfiltern unterschieden. Bei Oberflächenfiltern kommt der Filtereffekt durch ein dünnes Filtermedium und den sich darauf ablagernden Feststoffen, dem sogenannten Filterkuchen, zustande. Das Filtermaterial des Raumfilters besteht dagegen aus einer oder mehreren Schichten (Schüttungen), die mehrere Meter hoch sein können und von dem zu reinigenden Medium komplett durchströmt werden. (DWA, 2009, pp. 179-188)

Als Oberflächenfilter erfüllen Filter mechanische Reinigungswirkungen, wie die Entfernung von Sedimenten beziehungsweise abfiltrierbaren Stoffen durch die Filterschicht (Filterschichthöhe: max. 30 cm) (ATV, 1995, p. 2). Die mit der Zeit sinkende Durchlässigkeit des Filtermaterials wird als Kolmation bezeichnet und erhöht stetig den Filterwiderstand (Brunner, 2002, p. 11). Ist der Filterwiderstand durch die Kolmation und den Filterkuchen so groß, dass der Durchfluss stark verringert ist, muss die Filterschicht gereinigt werden. Dies geschieht im technischen Maßstab automatisiert durch einen Rückspülzyklus. Dabei wird der Filter durch eine Umkehrung der Filtrationsrichtung mit Klarwasser und / oder Druckluft gespült. Durch starke Verwirbelungen löst der Spülprozess die Feststoffe von und aus dem Filtermaterial und trägt sie aus der Filtereinheit. Darauf folgt eine gesonderte Behandlung des Rückspülwassers mit den Feststoffpartikeln. Mittels nachgeschalteter Sedimentation, Dekantern, Schlammpressen oder anderen Separationsverfahren wird der Wasseranteil des Flüssig-Feststoffgemisches reduziert.

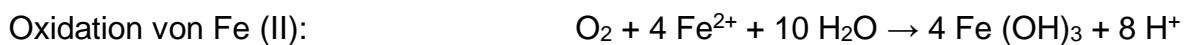
Bei Raumfiltern findet der Rückhalt der Feststoffe über einen großen Raumteil der Schüttung statt. Der Filterkörper wirkt hierbei als Speicher für die Feststoffe. Raumfilter bestehen in der Regel aus mehreren Schichten, die aus gröberen körnigen Materialien (Kies, Anthrazit) und am Ende des Filters aus feinerem Material (Sand,

Basalt) bestehen (Kunz, 1995, p. 106). Neben der äußeren Kolmation findet auch der Rückhalt kleinerer Partikel an bereits abgelagerten Partikeln infolge von Sedimentation, Einfang, Diffusion, Van-der-Waals-scher Kräfte, Sorption, u.a. über die gesamte Schüttung statt (ATV, 1995, p. 3). Diese Sorptionsleistung kann durch den Einsatz von Aktivkohle als zusätzliche Filterschicht oder als Mischung mit einer anderen Materialschicht verstärkt werden. Aktivkohle, die sowohl in Pulverform (PAK) als auch in granulierter Form (GAK) Verwendung findet, hat die Eigenschaft, dass sich an ihr besonders gut anthropogene Mikroschadstoffe und Spurenstoffe anlagern und so aus der Wasserphase abgetrennt werden können (Brunsch, et al., 2020, pp. 781-783). Bei nachlassender Adsorptionswirkung ist der Austausch beziehungsweise die Regeneration der Aktivkohle durchzuführen. Die Häufigkeit des Tausches ist abhängig von der Menge der zulaufenden Frachten.

Die Reinigungsprinzipien der Raumfilter können auch auf die der Bodenfilter übertragen werden. Die Filterschicht der Bodenfilter besteht aus naturbelassenen Materialien und kann, ähnlich zu den ursprünglichen Bodenschichten in der Lithosphäre, aus mehreren Schüttungen unterschiedlicher Art bestehen. Verschiedene Sand-, Kies- und Lehmzusammensetzungen sorgen für die physikalischen Abtrennungsvorgänge von Feststoffen. Neben der physikalischen Wirksamkeit kommen bei Bodenfiltern zudem verstärkt chemische und biologische Reinigungswirkungen vor. Für die biologische Elimination von gelösten abbaubaren Stoffen ist eine ausreichende Sauerstoffversorgung im Filter notwendig. Grundvoraussetzung für eine mikrobielle Metabolisierung von Mischwasserinhaltsstoffen in einem Bodenfilter ist der offene Gasaustausch über die Filteroberfläche. Hierbei kann Sauerstoff in das System eintreten und entstehende Gase, insbesondere Kohlendioxid, können aus dem System entweichen. (Brunner, 2002, p. 11)

Mikrobielle Umsetzungen liefern beim Abbau organischer Substanzen Spaltprodukte, die teilweise zum Aufbau von Biomasse auf dem Filtermaterial verwendet werden. Biologische Reaktionen mit Kohlenstoff, Stickstoff oder Schwefel im Boden werden als Redoxreaktionen bezeichnet. Der Sauerstoff ist dabei der wichtigste Elektronenakzeptor. Ist ausreichend Sauerstoff vorhanden, können unter dem Einfluss mikrobieller Katalyse Elektronendonatoren wie zum Beispiel organische Substanzen (BSB₅) und Ammonium oxidiert werden. (Brunner, 2002, pp. 11-12)

Im Folgenden sind die Reaktionsgleichungen dieser Redoxreaktionen dargestellt.



Der wichtigste Prozess bildet die aerobe Respiration (Zellatmung). Jedoch spielen auch andere Oxidationsvorgänge, wie das Ausfällen von Schwermetallen eine Rolle. Die Oxidation reduzierter Verbindungen ist, solange der Gasaustausch zwischen (Boden-) Filter und Atmosphäre gewährleistet wird, nicht limitiert.

Die Abbildung 1 zeigt die Reinigungsleistung und -prozesse entlang des Filtermaterials (Filterbett). Die höchste Reinigungsleistung findet oberflächennah auf und im Filtermedium statt. Dort werden die meisten Feststoffe zurückgehalten (äußere Kolmation) und die aeroben mikrobiellen Prozesse laufen aufgrund der höheren Sauerstoffkonzentration in der oberen Schicht besser ab. Mit einer zusätzlichen Bepflanzung der Bodenfilter, zum Beispiel mit Röhrichtpflanzen, kann die biologische Stoffwechselaktivität durch die so verbesserte Durchlüftung der Filter positiv beeinflussen. Die Wurzeln dienen zudem als zusätzlicher Lebensraum für die Mikroorganismen, so dass sich die Reinigungsleistung in der Vegetationsperiode merklich verbessert. (DWA , 2006, p. 298) (Brunsch, et al., 2020, p. 781)

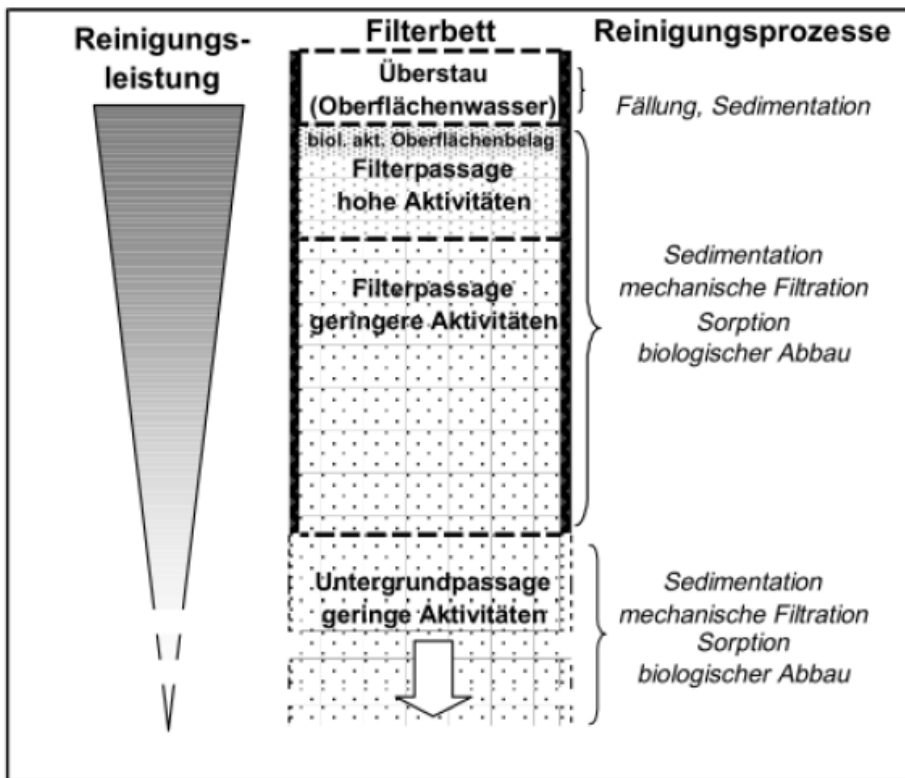


Abbildung 1: Reinigungsprozesse in Bodenfiltern (Schulte-Ebbert, 2004, pp. 403-439)

Bei Raumfiltern wird bezüglich des Stau-Verhaltens in weitere Varianten, so genannte Strömungsregime, unterschieden. Der (Ein-) Stau beschreibt die Wasserspiegelhöhe innerhalb des Filters (Brunner, 2002, pp. 12-13):

Permanenter Dauerstau (Überstau) = Wasserspiegel oberhalb Filterfläche

Permanenter Volleinstau = Wasserspiegel entspricht Oberkante Filterfläche

Kein permanenter Einstau (Rieselfilm) = Wasserspiegel unterhalb des Filters

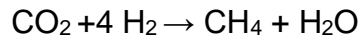
Tabelle 4: Verfahren von Raumfiltern (ATV, 1995, p. 5)

Strömungs- regime	Aufbau Filtermedium	Strömungs- richtung	Spülzyklus	Spül- medium	Eliminations- wirkung	Bezeichnung
Überstau	eine Filter- schicht	abwärts	diskont.	Wasser Luft	AFS AFS, CSB, NH ₄ ⁺	Einschichtfilter Biol. Intensivierter Filter
		aufwärts	diskont.	Wasser Luft	AFS AFS, CSB, P AFS, CSB, NH ₄ ⁺ AFS, CSB, P, NH ₄ ⁺	Aufwärtsfilter Flockungsfilter Biol. Intensivierter Filter Flockungsfilter biol. intensiviert
	Zwei Filter- schichten	abwärts	diskont.	Wasser Luft	AFS AFS, CSB, P AFS, CSB, NH ₄ ⁺ AFS, CSB, P, NH ₄ ⁺	Mehrschichtfilter Flockungsfilter Biol. Intensivierter Filter Flockungsfilter biol. intensiviert
Rieselfilm	Zwei Filter- schichten	abwärts	diskont.	Wasser Luft	AFS, CSB, NH ₄ ⁺ AFS, CSB, P, NH ₄ ⁺	Trockenfilter Flockungsfilter
Sonder- verfahren	Eine Filterschicht	horizontal oder aufwärts	kont.	Wasser Luft	AFS, (CSB, P, NH ₄ ⁺)	Radial oder aufwärts durchströmte Filter
AFS = abfiltrierbare Stoffe (bestimmt mittels Membran-Filtration, Porenweite 0,45 µm) CSB = Chemischer Sauerstoffbedarf P = Phosphor NH ₄ ⁺ = Ammonium						

Die Tabelle 4 unterteilt die Raumfiltervarianten bezüglich ihrer Strömungsregime, dem Filteraufbau, der Filtrationsrichtung (Fließrichtung), der Spülverfahren bei technischen Anlagen sowie der erreichbaren Eliminationswirkungen.

Alle Formen des (Ein-)Staus können eine Belüftungsbarriere darstellen, wenn im Filtersystem nicht ausreichend Sauerstoff über die gesamte Filterhöhe vorgehalten wird und somit die biochemischen Prozesse wie die mikrobielle Metabolisierung gehindert werden (Brunner, 2002, pp. 12-13). Dadurch finden anoxische und anaerobe Prozesse wie die Methanisierung, Faulungsprozesse und Denitrifikation statt, Mangan- und Eisenoxide werden nach der Oxidation wieder reduziert.

Methanisierung



Fäulnis (Desulfurylation)



Eine naturnahe Anwendung der Raumfilter sind die Retentionsbodenfilter. Diese bewachsenen Bodenfilter können aufgrund ihres vorgeschalteten Speicherraums (Retentionsraums) große Wassermengen puffern und dabei Schwebstoffe, Ammonium, organische Stoffe, Keime und Schwermetalle aus Abwässern deutlich reduzieren (Brunsch, et al., 2020, p. 780).

Um den aeroben mikrobiellen Abbau zu optimieren, kann zusätzlicher Sauerstoff in die Raumfilter eingetragen werden. Diese Methode wird in sogenannten Biofiltern angewandt. Biofilter sind wie Bodenfilter aus mehreren Schüttungen aus Materialien mit großen spezifischen Oberflächen aufgebaut, in denen die mechanischen (physikalischen) und biologischen Vorgänge die Reinigungsleistung bewirken. Wegen der großen spezifischen Oberfläche des Materials können Mikroorganismen in der Filterschicht besser anwachsen. Durch den zusätzlichen Eintrag von Luftsauerstoff wird der Schwerpunkt bei diesem Verfahren weiter Richtung aeroben, biologischen Abbau gelenkt. Der Lufteintrag beziehungsweise Gasaustausch in dem Filtermedium wird mittels eines Drainagesystems oder bei grobporigen Filtern und Rieselfilmen durch einen Kamineffekt erzeugt. In beiden Fällen wird der vertikal abwärts durchströmte Filter von unten nach oben, entgegen der Filtrationsrichtung mit Sauerstoff versorgt. Während sich in der Einfahrphase des Filters die Biofilme erst bilden müssen und deren Wirkung gering ist, nimmt mit steigender Laufzeit die Bedeutung der Filtermaterialien ab und die der Biofilme zu. Die abwärtsdurchströmte Betriebsweise gilt als besonders robust im langfristigen Betrieb und kann einfach im Freigefälle arbeiten. (Illian, 2010, p. 48)

2.2.2 Entkeimung

2.2.2.1 Allgemein

In der Medizin wird unter dem Begriff der Entkeimung beziehungsweise der Desinfektion die Abtötung oder Inaktivierung von pathogenen Keimen verstanden, so dass keine gesundheitliche Gefährdung oder Infektionsgefahr besteht. Im Bereich der Abwasserreinigung ist der Begriff der Desinfektion nicht exakt definiert, aber wird meist als "Behandlung von Abwasser oder Schlamm zum Vermindern der Aktivität von

Krankheitserregern unter einen vorgegebenen Wert" (DIN 16323, 2014) beschrieben. Die Verminderung der Keime beziehungsweise die Reduktionsrate wird in der Regel in log₁₀-Stufen und Zehnerpotenzen angegeben (Haaken, 2014, pp. 21-24).

Im Allgemeinen werden im Abwasser enthaltene Pathogene in die vier Gruppen Bakterien, Protozoen, Viren und Helminthen (Würmer) eingeteilt. Pathogene sind Auslöser von schweren Krankheiten bei Menschen und Tieren. Diese Krankheitserreger gelangen über das häusliche Abwasser in die Abwasserbehandlungsanlagen und werden dort zu einem Großteil zurückgehalten, inaktiviert oder abgetötet. Dadurch wird ein Austrag der Krankheitserreger in die Vorfluter aus den Kläranlagen verringert. In der Abwasserverordnung ist für kommunales Abwasser keine Anforderung für eine abschließende Entkeimung des behandelten Wassers definiert. Für manche Vorfluter (Oberflächengewässer, in die das behandelte Wasser eingeleitet wird) kann eine Entkeimung jedoch die hygienische Gewässerqualität verbessern. Die Maßnahme einer Entkeimung kann für die Einhaltung der Gütekriterien der EU-Badegewässerrichtlinie erforderlich sein. Gemäß der Trinkwasserverordnung ist eine solche Verfahrensstufe der Entkeimung für die Aufbereitung von Wasser zur Trinkwasserqualität zwingend erforderlich. (DWA, 2013, p. 3)

Herkömmliche kommunale Abwasserreinigung reduziert fäkale Keime, wie zum Beispiel *Escherichia coli* (*E. coli*), um über eine Zehnerpotenz (siehe Abbildung 2: Biologische Stufe und Phosphor (P) -Fällung) (Crook, 2009, pp. 559-589).

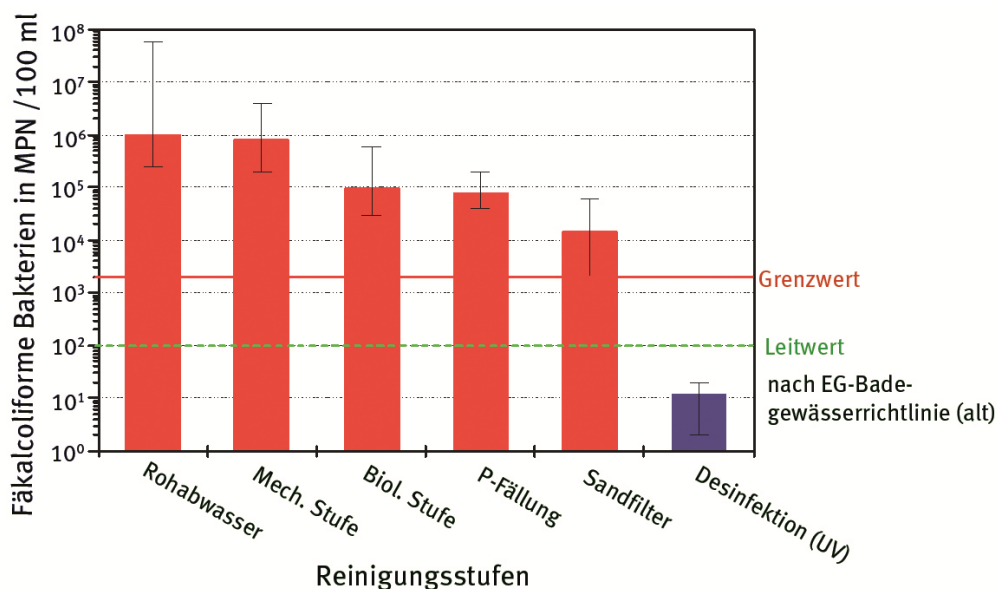


Abbildung 2: Gehalt an fäkalcoliformen Bakterien im Rohabwasser und in den Abläufen der einzelnen Reinigungsstufen einer kommunalen Kläranlage (DWA, 2013, p. 7)

E. coli und Enterokokken – Keime, die in menschlichen und tierischen Fäzes vorkommen – werden meist für eine Bewertungsgrundlage als sogenannte Leitorganismen herangezogen (DWA, 2013, pp. 8-11). Ausgehend von der Europäischen Badegewässerrichtlinie, die Trinkwasserverordnung und andere Vorgaben werden für Brauchwasseranwendungen unter anderem für diese Keime Grenzwerte angegeben. Diese werden in Koloniebildende Einheiten (KBE) / 100 ml gemessen. (Verbraucherschutz, 2020) (EU, 2006)

Die Abbildung 2 gibt die Quantitäten in MPN (most portable number) an. Dabei werden Verdünnungsreihen erstellt, bei denen die ursprüngliche Probe mit den Bakterien immer weiter verdünnt wird. Dieses Bestimmungsverfahren gilt jedoch als ungenau und ist sehr materialaufwendig (R-Biopharm AG, 2016). Über die Vergleichbarkeit beider Methoden (MPN und KBE) macht die Literatur unterschiedliche Aussagen. Das Bundesland Schleswig-Holstein hat 2008, als die neue EU-Badegewässerrichtlinie umgesetzt wurde und dadurch neue Untersuchungsverfahren eingeführt worden, entschieden, dass die Einheiten MPN und KBE im Zahlenwert gleichgesetzt werden können (Hippelein, 2021). Dies wird auch für diese Arbeit angenommen.

Für eine weiterführende Entkeimung von behandelten Abwässern bieten sich mehrere Verfahren an, die in der folgenden Tabelle 5 nach den Verfahrensarten kategorisiert werden.

Tabelle 5: Einteilung Entkeimungsverfahren (Haaken, 2014, p. 21)

Entkeimung			
Naturnahe Verfahren	Technische Verfahren		
	Physikalische Verfahren	Chemische Verfahren	Elektrochemische Verfahren
<ul style="list-style-type: none"> - Pflanzenbeete, Pflanzenkläranlagen - Schönungsteiche - Bodenfiltration 	<ul style="list-style-type: none"> - UV-Bestrahlung - Ultraschall - Thermische Behandlung - Membranfiltration 	<ul style="list-style-type: none"> - Chlorung - Ozonung - Peressigsäure - Wasserstoffperoxid 	<ul style="list-style-type: none"> - Erzeugung von freiem Chlor im Wasser

Die meisten Krankheitserreger sind innerhalb der natürlichen Litho- und Hydrosphäre als standortfremde Bakterien extremen Bedingungen ausgesetzt. Daher werden diese durch naturnahe Verhältnisse, zum Beispiel Temperatur, Licht, Fressfeinde und andere abiotische und biotische Faktoren, verdrängt und reduziert. Naturnahe Verfahren wie Bodenfilter, Schönungsteiche und Pflanzenkläranlagen können dadurch Keimeliminationsraten von 1,5 bis 2,5 Zehnerpotenzen erreichen. Im abwassertechnischen Sinn stellen naturnahe Verfahren umweltfreundliche Desinfektionsmethoden dar. Für diese ist kein großer technischer Aufwand oder Einsatz von chemischen Hilfsstoffen notwendig. Jedoch wirken sich unter anderem der enorme Flächenbedarf und eine hohe Verdunstungsrate nachteilig aus. Dezentrale Kleinstkläranlagen verwenden diese Methode zumeist. (DWA, 2013, p. 9)

Auch abiotische Einflussfaktoren reduzieren im technischen Maßstab die Mikroorganismen. Je nach Verfahren wird der entsprechende Einflussfaktor genutzt und konzentriert eingesetzt. Physikalische Verfahren zielen durch Bestrahlung, Temperatur und Schall auf eine Inaktivierung der Keime ab. Der Rückhalt durch Membranfilter wird oft als weiteres Verfahren aufgeführt. (Förstner & Köster, 2018, p. 333)

Die Zudosierung von oxidativen Mitteln, wie zum Beispiel Chlor, Ozon oder Peressigsäure, tötet unerwünschte Mikroorganismen im zu behandelnden Wasser chemisch ab. Die Stoffe stören die Proteinbildung der Zellen oder beschädigen das Erbgut (DNS). Durch die Zugabe und die Reaktion der Oxidationsmittel werden Spuren der Chemikalien und den daraus entstehenden Metaboliten in der Wasserphase hinterlassen. Diese können geruchs- oder geschmacksverändernde, aber auch toxische und cancerogene Eigenschaften besitzen. Dies wirkt sich auf die Umweltverträglichkeit der jeweiligen Verfahren aus. Ein schlechter Umweltverträglichkeitsfaktor wird bei der Auswahl des Entkeimungsverfahrens bei bestimmten Anwendungen in Kauf genommen, wenn andere positive Eigenschaften überwiegen (siehe Tabelle 6). (DWA, 2013, pp. 26, 31)

Tabelle 6: Eigenschaften der gebräuchlichen technischen Entkeimungsverfahren (ATV, 1998)

Verfahren	Desinfektionswirkung	Betriebserfahrungen	Umweltverträglichkeit
UV-Bestrahlung	+	++	+
Membranfiltration	++	-	++
Ozonung	+	+	-
Chlorung	++	++	-

Die Verfahren weisen in ihren Eigenschaften unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. Für die Auswahl der Entkeimungsmethode sollten folgende Faktoren nach Collivigbarelli & al. (2017, p.3) betrachtet werden:

- organische Belastung (DOC, TOC, BSB₅), suspendierte Stoffe (TSS) und Trübung des Abwassers
- Wassercharakteristik (Art und Konzentration der Mikroorganismen)
- gewünschte Qualität des behandelten Wassers
- Toxizität des Desinfektionsmittels
- Bildung von Nebenprodukten (Metaboliten)
- Art der (Ab-)Wasserbehandlungsanlage
- Kosten

Ergänzend dazu steht die Wahl zwischen einem naturnahen oder technischen Verfahren (Haaken, 2014, p. 21). Die jeweiligen Verfahren haben unterschiedliche Wirkungen auf verschiedene Arten von Keimen (Tabelle 7). Einige Formen von Pathogenen, vor allem Viren, Würmer und Dauerformen von Keimen, weisen eine erhöhte Resistenz auf.

Tabelle 7: Entfernungsraten (log10) von pathogenen Keimen und Viren (Collivigbarelli & al., 2017, p. 4)

Verfahren	Bakterielle Krankheitserreger (einschließlich Campylobacter)	Viren (einschließlich Adenoviren, Rotaviren und Enteroviren)
Chlorung	2,0-6,0	1,0-3,0
Ozonung	2,0-6,0	3,0-6,0
UV-Bestrahlung	2,0-4,0	1,0-3,0
Membranfiltration	3,5-6,0	2,5-6,0
Umkehrosmose	>6,0	>6,0
Bodenfiltration	2,0-3,0*	1,0-3,0*

* (Ziegler, 2001, p. 9)

Die nachfolgenden Kapitel stellen die häufigsten technischen Verfahren zur Entkeimung detaillierter dar und beinhalten die Verfahren der UV-Bestrahlung, der Chlorung, Ozonung und Membranfiltration.

2.2.2.2 UV-Elimination

Ultraviolette (UV) -Strahlung ist Bestandteil des natürlichen Sonnenlichts und aufgrund ihrer kurzen Wellenlängen (100-380 nm) sehr energiereich. Das Prinzip der UV-Entkeimung beruht darauf, dass die Strahlung die Erbsubstanz von Mikroorganismen schädigt und dabei die Reparaturfähigkeit der Zellen inaktiviert. Die wirksamste Inaktivierung erfolgt durch die UV-C-Strahlung (100-280 nm) bei Wellenlängen von ca. 260 nm. In diesem Bereich befindet sich das Adsorptionsmaximum der DNS-Bestandteile. Je mehr UV-Strahlung (UV-Dosis [J/m^2]) auf eine Zelle für eine bestimmte Zeit einwirkt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese irreversibel beschädigt wird. Für die Entkeimung von geklärten Abwässern wird eine Dosis von $400 \text{ J}/\text{m}^2$ empfohlen. Verschiedene Mikroorganismen haben nicht dieselbe Strahlungsempfindlichkeit, so dass die jeweils notwendige Dosis für eine ausreichende Inaktivierung variieren kann. (DWA, 2013, p. 14) (DWA, 2009, pp. 204-207)

Weitere Einflussgrößen sind die aus der Strahlungsdosis zusammengesetzten Größen der Bestrahlungsstärke [W/m^2] und der Aufenthaltszeit [s], sowie der UV-Durchlässigkeit des Wassers [%] (Transmission). Je größer die Bestrahlungsstärke des UV-Lichts und je länger die Aufenthaltszeit der Organismen im bestrahlten Raum, desto höher ist die Wirkung der Bestrahlung und der Inaktivierungsleistung. Dazu sollte das zu entkeimende Wasser möglichst feststofffrei und optisch durchlässig sein. Dies kann durch eine vorgeschaltete Sedimentation, Flotation oder Filtration erfolgen. Der Feststoffanteil sollte $20 \text{ mg}/\text{l}$ nicht überschreiten, so dass das Wasser eine Transmission von mehr als 50% pro cm Wasserschicht hat. Bei einem zu großen Feststoffanteil werden vermehrt pathogene Keime vor den UV-Strahlen abgeschirmt. Das Verfahren wird dadurch ineffizienter und die Gefahr besteht, dass einzuhaltende Grenzwerte überschritten werden und es zu einer Wiederverkeimung kommt. (DWA, 2009, p. 205)

Quecksilberniederdruck- und Quecksilbermitteldruckstrahler kommen im technischen Maßstab für die Emittierung von UV-Licht zum Einsatz. Bereits im Jahr 1910 wurden Quecksilber-Entladungslampen (Hg-Strahler) zur künstlichen Erzeugung von

energiereicher UV-Strahlung verwendet. Für die meisten Anwendungen wird noch immer auf diese Technik zurückgegriffen. (Heßling & Sift, 2014, p. 36)

Quecksilberniederdruckstrahler senden ein monochromes UV-Licht mit der Wellenlänge 253,7 nm aus. Dies ist nahe dem Absorptionsmaximum der DNS. Die Quecksilbermitteldruckstrahler decken Wellenlängen im UV-Bereich von 200 bis 300 nm ab. Durch die Streuung der Wellenlänge sind diese Strahler weniger effizient und werden in der Abwasserbehandlung weniger häufig für die Entkeimung eingesetzt. Die Mitteldruckstrahler eignen sich jedoch durch ihr breites Spektrum zur Photooxidation von Wasserinhaltsstoffen wie zum Beispiel Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX) -Verbindungen. Als Alternative lassen sich auch gepulste Quecksilberstrahler verwenden, die gegenüber E. coli und Phagen (Viren) eine insgesamt höhere Effektivität aufweisen als kontinuierliche Strahler. (Haaken, 2014, pp. 24-29)

Während UV-LEDs vor 10 Jahren noch sehr ineffizient waren und Lebensdauern von weniger als 1000 Stunden aufwiesen, sind sie heute eine wirtschaftliche Alternative. LEDs haben eine wesentlich geringere Leistungsaufnahme (Stromverbrauch), eine geringere Wärmeabstrahlung und dadurch einen höheren Wirkungsgrad als die Nieder- und Mitteldruckstrahler. LEDs mit einer Leistung von wenigen mW reichen aus, um Wasser mit der erforderlichen Dosis von 400 J/m² zu desinfizieren. Lebensdauern von mehreren zehntausend Stunden sind bei UV-LEDs mittlerweile verfügbar und die bisherigen Entwicklungen lassen eine weitere Steigerung der Leistung und der Lebensdauer für LEDs im gewünschten UV-Wellenlängenbereich von 253,7 nm vermuten. (Heßling & Sift, 2014, p. 36)

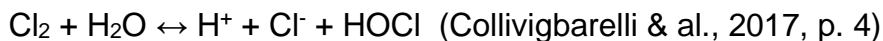
Die Vorteile der UV-Entkeimung sind zum einen die Kompaktheit der Anlage (im Vergleich zu entkeimenden Filtrationsverfahren) und zum anderen der insgesamt geringe Betriebs- und Wartungsaufwand. Es werden keine Chemikalien verbraucht, wodurch es keine Restkonzentrationen eben dieser oder der entstehenden Metabolite im zu behandelnden Wasser gibt (DWA, 2009, p. 206). Die UV-Strahlen „kontaminieren“ das zu entkeimende Medium nicht mit geruchs- oder geschmacksverändernden Stoffen und eignen sich dadurch zur Trinkwasserwasseraufbereitung und zum Einsatz in der Lebensmittelindustrie.

Ein Nachteil ist die Lagerungsfähigkeit des Wassers, da es bei einer nicht sofortigen Nutzung zu einer Reaktivierung der Mikroorganismen kommen kann. Das zuvor

behandelte Wasser kann durch eine zunächst ungefährliche Anzahl von nicht abgetöteten Bakterien wieder kontaminiert werden, indem sich die Pathogenen bei für sie günstigen Bedingungen wieder vermehren. (DWA, 2013, p. 13)

2.2.2.3 Chlorung

Weltweit gehört die Chlorung zu den am häufigsten verwendeten Verfahren zur Desinfektion und wird seit etwa 100 Jahren angewandt. Chlorgas, Natriumhypochlorit, Calciumhypochlorit oder Chlordioxid wird dem Wasser zugegeben. Im Wasser gelöst entstehen daraus oxidative hypochlorige Säure (HOCl) und Hypochlorid-Ionen (OCl⁻). Auf Grund der oxidativen Wirkung werden die Membranen und die Enzyme der Mikroorganismen irreversibel geschädigt, sodass diese inaktiviert oder abgetötet werden. Es gilt als zuverlässiges Verfahren, welches auch eine Wiederverkeimung des Wassers verhindern kann. (DWA, 2013, pp. 29,30)



Der Einsatz von Chlorgas und den Hypochloritverbindungen hat die Bildung von unerwünschten Nebenprodukten (zum Beispiel Chloramine, Trihalogenmethane und andere Organohalogenverbindungen zur Folge. Bei der Anwendung von Chlorgas wird am Einsatzort eine Chlorklösung aus Chlorgas und Wasser hergestellt und dem Abwasser zugegeben. Die Regelung der Zugabe muss sowohl mengenproportional als auch entsprechend der Chlorzehrung (Restchlorgehalt) erfolgen. Je nach dem Gehalt an organischen Stoffen im Abwasser sind 1 mg bis 20 mg freies Chlor pro Liter, eine gründliche Durchmischung sowie eine Kontaktzeit von 5 bis 20 Minuten erforderlich. Der pH-Wert sollte für die Reaktionen im Bereich von 6 bis 8 liegen. (DWA, 2013, p. 29)

Die entstehenden Metabolite können aufgrund ihrer bioakkumulierenden (Anreicherung eines Stoffes im Organismus) und toxischen Wirkung bei Einleitung des Wassers eine schädliche Wirkung auf die Gewässer und die darin lebenden Organismen haben (Wüpper, 2017, p. 14). Zur Vermeidung von Beeinträchtigungen dieser Gewässer muss der Restchlorgehalt im Abwasser auf ein ungefährliches Maß reduziert werden. Die EG-Fischgewässerrichtlinie 2006/44/EG gibt zum Beispiel einen Grenzwert für den Restchlorgehalt von $\leq 0,005$ mg/l im Gewässer vor (DWA, 2013, p. 29). Dies entspricht ungefähr einem Tausendstel der empfohlenen Dosierung zur effektiven Entkeimung durch die Chlorung. Daher ist eine zusätzliche

Entchlorungsstufe nach der Entkeimung erforderlich, welche sich auf die Kosten des Verfahrens auswirkt. Die Verwendung von Chlordioxid geht weniger mit der unerwünschten Bildung von Nebenprodukten einher. Zur Herstellung von Chlordioxid kommen eine Natriumchlorit-Lösung (nicht zu verwechseln mit Natriumchlorid: Kochsalz) und Salzsäure zum Einsatz (hydrophil wassertechnik gmbh, 2021).

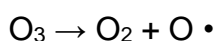


Aufgrund des Arbeitens mit den entsprechenden Chemikalien sind bei einer Chlorung strenge Anforderungen zum Arbeitsschutz und zur Anlagensicherheit zu beachten. Der kontinuierliche Chemikalienverbrauch ist zudem ein wesentlicher Kostenfaktor des Verfahrens. (DWA, 2013, p. 29)

2.2.2.4 Ozonung

Die Anwendung und Wirkung der Ozonung ist der der Chlorung in vielerlei Sicht ähnlich. Das Ozon („aktiver Sauerstoff“) wird als starkes Oxidationsmittel dem zu entkeimenden Abwasser hinzugegeben.

Ozon ist ein instabiles Gas, das durch die Dissoziation von einem Sauerstoffmolekül in atomaren Sauerstoff entsteht. Das Sauerstoffatom kann unter anderem durch die Reaktion von Stickstoffdioxid und der UV-Strahlung in der Atmosphäre entstehen. Aus der Reaktion des einzelnen Sauerstoffatoms mit Wasser entstehen 2 Hydroxyradikale (2 OH •).



Aufgrund der Instabilität ist der Prozess schwieriger zu händeln und das Ozon muss für den Einsatz vor Ort direkt erzeugt werden, da es nicht ohne aufwendige Verfahren gelagert werden kann. Das Ozon wird aus dem Sauerstoffanteil der Atmosphäre oder aus reinem Sauerstoff gewonnen. Letzteres hat einen geringeren elektrischen Verbrauch, allerdings muss dafür reiner Sauerstoff aus Druckflaschen verwendet werden, was ein großer Kostenfaktor ist. Die Ozonproduktion erfolgt durch Elektrolyse, radiochemische oder photolytische Reaktionen (Collivigbarelli & al., 2017, p. 5).

Die direkte Reaktion der Wasserinhaltsstoffe mit Ozon oder indirekt mit den Folgeprodukten (Radikale) bezeichnet man als Ozonierung (wvgw, 2015, p. 6). Das Ozon selbst reagiert besonders gut mit elektronenreichen aromatischen Verbindungen und ist demnach sehr wirkungsvoll gegenüber anthropogenen Spurenstoffen. Die Hydroxyl- (OH-) Radikale wirken gegen alle Wasserinhaltsstoffe (u.a. pathogene Keime) an (Jekel, et al., 2006, pp. 11-14).

Die Desinfektionswirkung der Ozonung basiert wie bei der Chlorung auf der oxidativen Veränderung von organischen Bestandteilen der Pathogene, sodass diese abgetötet und inaktiviert werden (DWA, 2013, pp. 24-28). Entscheidend für die Wirkung ist sowohl die Ozonkonzentration, die Kontaktzeit als auch das Wassermilieu (pH-Wert und Temperatur). In der Regel beträgt die erforderliche Ozonkonzentration zwischen 2 und 10 mg/l Abwasser und eine Aufenthaltszeit von 5-10 Minuten. Die Artabhängigkeit der Wirkung ist jedoch auch zu betrachten. Während E. coli bereits bei sehr geringen Dosen zuverlässig abgetötet wird, ist bei Dauerformen von Protozoen die fünfhundertfache Dosis für das gleiche Ergebnis notwendig (DWA, 2013, pp. 24-28). Aufgrund der selektiven Wirkung des Ozons gegenüber aromatischen Verbindungen ist die Anwendung von den Wasserinhaltsstoffen abhängig. Andererseits haben die Ozon-Metabolite (Radikale) auf alle Bestandteile gleichermaßen eine oxidative Wirkung, so dass auch eine Elimination von weiteren Spurenstoffen, wie zum Beispiel von Medikamenten oder Pestiziden, Vorteile bringen kann. Manche Reaktionsprodukte, wie Nitrosamine, sind jedoch wie bei der Chlorung als kritisch zu betrachten. Aufgrund der Toxizität des Ozons müssen die Restkonzentrationen in den Abgasen auf eine Konzentration von weniger als 0,02 mg/m³ reduziert werden, bevor diese abgeleitet werden. Dies erfolgt durch eine thermische Behandlung, der Ozonvernichtung. (DWA, 2013, pp. 24-28)

Die Ozonung findet vor allem in der Trinkwasseraufbereitung und als Reinigungsmittel bei Filtrationsverfahren Anwendung. In der Abwasserbehandlung wird die nachgeschaltete Ozon-Entkeimung bislang hauptsächlich in Versuchsanlagen realisiert. (DWA, 2013, pp. 24-28)

2.2.2.5 Membranfiltration

Die Membranfiltration stellt ein weiteres physikalisches Entkeimungsverfahren dar. Nach dem grundlegenden Prinzip der Filtration werden dabei die Bakterien und andere Wasserinhaltsstoffe an einem dünnen feinporigen Filtermaterial zurückgehalten und dadurch von einer flüssigen Phase getrennt.

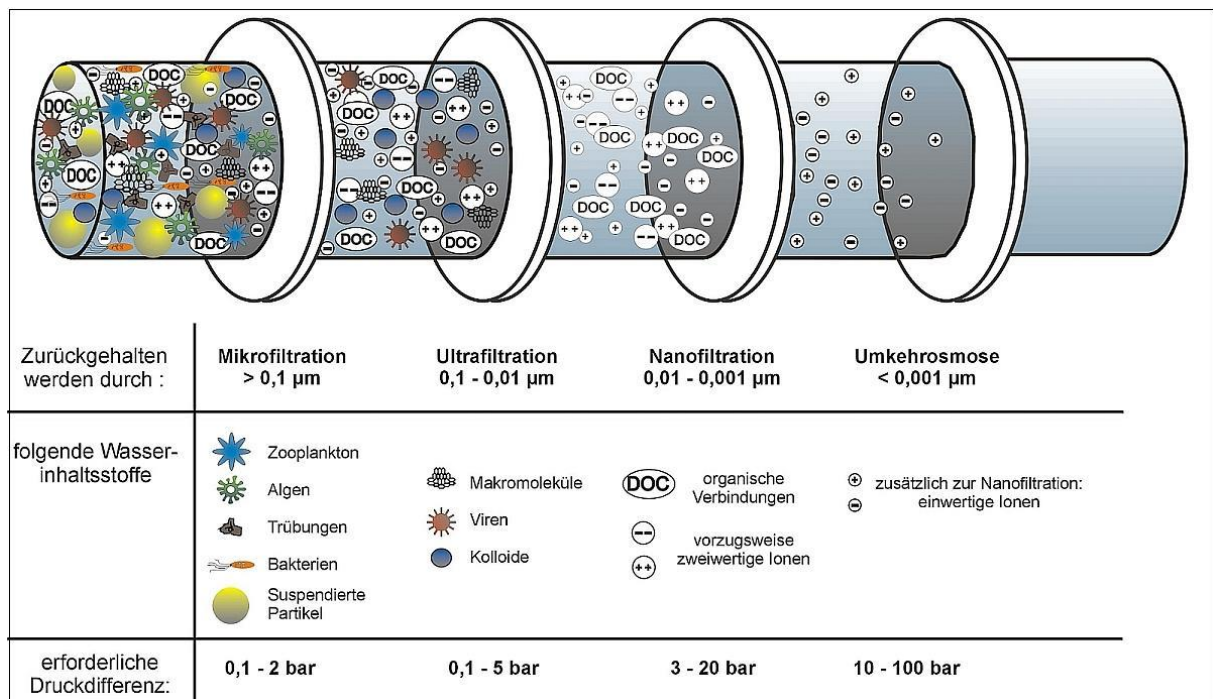


Abbildung 3: Varianten der Membranfiltration (Zühlke, 2014)

Abhängig vom erforderlichen Reinigungsgrad und der Porengröße werden bei der Membranfiltration zwischen Mikro- (MF), Ultra- (UF), Nanofiltration (NF) und Umkehrosmose unterschieden (siehe Abbildung 3). Je kleiner die Porengrößen sind, desto größer ist die Druckdifferenz, die an der Membran für die Filtration erforderlich ist. Eine höhere Druckdifferenz erfordert einen höheren energetischen, verfahrenstechnischen und finanziellen Aufwand. Für eine entkeimende Wirkung reicht die Mikro- oder Ultrafiltration in der Regel aus. (Förstner & Köster, 2018, pp. 332-333)

Diese Verfahren finden immer öfter in der Abwasserbehandlung Anwendung und ersetzen dabei die konventionelle Nachklärung (Sedimentation) (DWA, 2013, pp. 22-23). Für eine weitergehende Aufreinigung des Wassers (Entsalzung etc.) werden Hochdruckmembranen bei der Nanofiltration oder der Umkehrosmose verwendet (Förstner & Köster, 2018, pp. 332-333). Als Membranmaterialien werden zumeist Polymere (Polyvinylidenfluorid (PVDF), Polyethersulfon (PES), Polyvinylchlorid (PVC), Polyacrylnitril (PAN), Polyethylen (PE)) oder Keramik verwendet (DWA, 2013, pp. 22-

23). Die Qualität und Quantität des gefilterten Mediums (Permeat) ist abhängig von der Qualität im Zulauf, der Überstromgeschwindigkeit und der Druckdifferenz an der Membran. Je nach Anwendung kann die Filtration im Über- oder Unterdruckverfahren erfolgen. (DWA, 2013, pp. 22-23)

Bei der Membranfiltration wird zwischen dem Dead-End- und dem Cross-Flow-Verfahren unterschieden. Bei dem Dead-End-Prinzip wird das zu filternde Medium gegen die Membran gepumpt. Dadurch werden die Inhaltsstoffe direkt an der Membran zurückgehalten und das Permeat läuft durch die Poren ab. Dabei kommt es zu einer Aufkonzentrierung der Inhaltsstoffe direkt an der Membran, so dass ein Filterkuchen entsteht. Dieser erhöht mit der Zeit den Filterwiderstand, bis die Druckdifferenz nicht mehr ausreicht und der Filter bis zur Entfernung der Feststoffe blockiert ist. Das Entfernen kann durch eine manuelle Entfernung oder eine automatisierte Rückspülung mit Wasser oder Luft erfolgen. (DWA, 2009, pp. 185-186)

Im Cross-Flow-Verfahren wird das zu filternde Medium parallel zur Membran gepumpt (siehe Abbildung 4). Die Flüssigkeitsphase strömt durch die erzeugte Druckdifferenz durch die Membran. Anders als beim Dead-End-Prinzip lagern sich die Feststoffe nicht an der Membran ab, sondern werden im Medium aufkonzentriert. Dadurch entsteht ein gefiltertes (entkeimtes) Permeat und ein aufkonzentriertes Retentat auf den jeweiligen Seiten der Membran. Der Vorteil des Cross-Flow-Prinzips ist, dass der Filtrationsvorgang kontinuierlich läuft, da sich nur wenige Partikel wegen der Strömungsrichtung auf der Membran absetzen können. Ein Nachteil ist der höhere Energieaufwand im Vergleich zum Dead-End-Verfahren. (DWA, 2013, pp. 22-23)

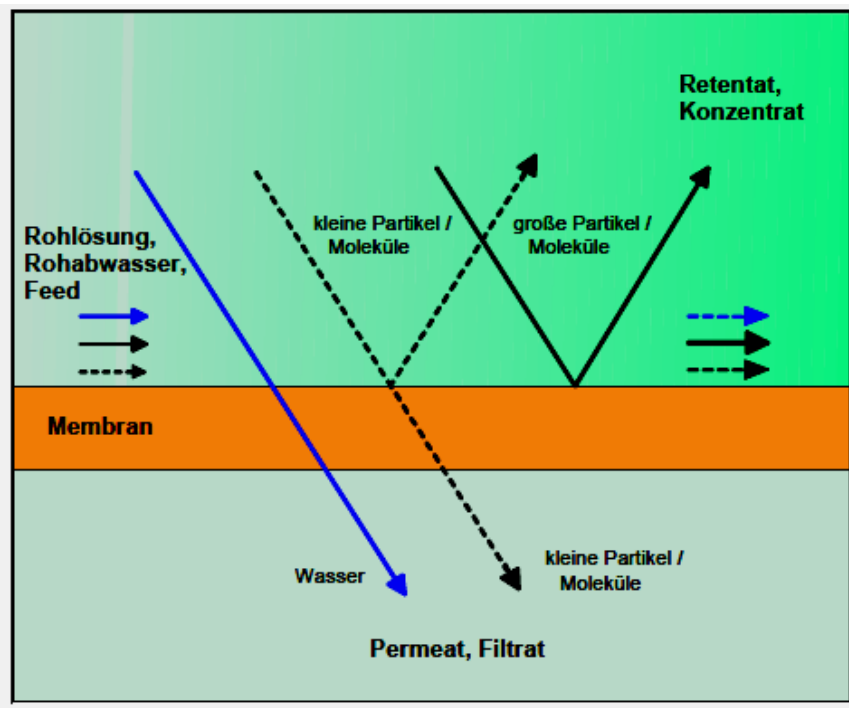


Abbildung 4: Prinzip Membranfiltration im Cross-Flow-Verfahren (Reischert, 2011, p. 8)

Membranfilter müssen regelmäßig gewartet, gereinigt oder ausgetauscht werden, da es während des Betriebs häufig zu anorganischen Ablagerungen (scaling), Partikelanlagerungen (particle fouling), organischer Adsorption (organic fouling) und mikrobiologischer Adhäsion (biofouling) kommt (siehe Abbildung 5) (Reischert, 2011, p. 15). Dadurch sinkt die Filtrationsleistung der Membranen. Eine entsprechende Vorbehandlung (verringern des AFS-Wertes) sowie eine chemische oder mechanische Entfernung des Belags auf den Membranen können die Laufzeit der Membranen erhöhen (Reischert, 2011, pp. 15-16). Als chemisches Reinigungsmittel werden zumeist oxidative Lösungen, wie zum Beispiel Chlorreiniger eingesetzt. Je

nach Art und Material der Membran muss jedoch auf die Verträglichkeit mit den Chemikalien geachtet werden.

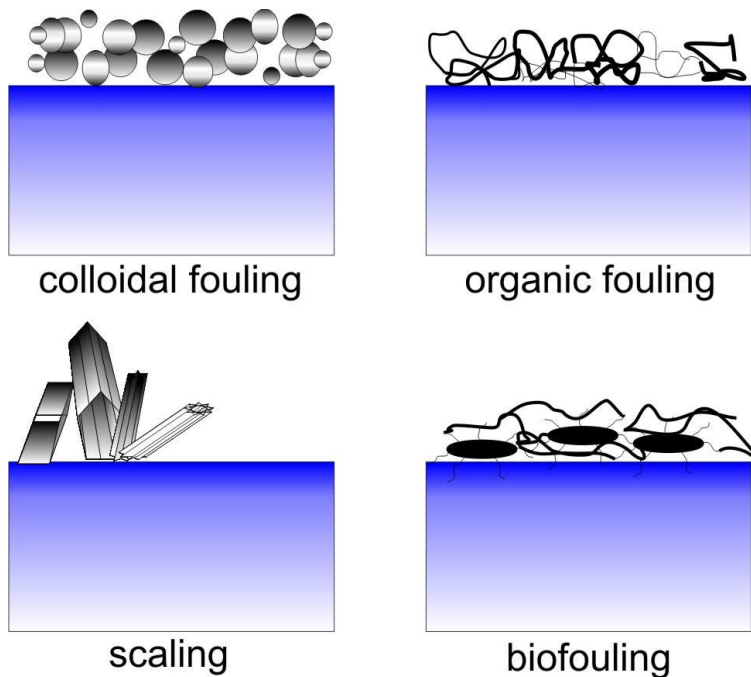


Abbildung 5: Scaling und Fouling an Membranen (Tiraferri, 2014)

Es gibt verschiedene Anwendungsvarianten der Membrantechnik. Zum einen wird diese in Belebungsbecken von Kläranlagen integriert / „getaucht“. Dort übernimmt die Membran die Feststoffabtrennung, die in konventionellen Belebungsverfahren über eine Sedimentationsstufe erfolgt. Über eine Vakuumpumpe wird das Wasser durch die Membranen gesaugt. Aufgrund des Unterdrucks ist nur eine Druckdifferenz von weniger als 1 bar möglich. Durch die Belüftung unterhalb der Membranmodule entsteht eine aufwärts gerichtete Strömung, so dass die Membranen im Cross-Flow-Verfahren betrieben werden. In der getauchten Variante sind die Membranen zum Beispiel in sogenannten Plattenmodulen angeordnet.

Als weitere Anwendung wird die trocken aufgestellte Variante aufgeführt. Dabei wird das Wasser über eine Pumpe durch die Membranen gedrückt. Die Membranen werden dabei als Rohr- oder Hohlfasermodule ausgelegt und bei der Wasseraufbereitung im Cross-Flow-Verfahren betrieben. Mit der trocken aufgestellten Variante können deutlich höhere Drücke und durch eine kleinere Porengröße bessere Reinigungsleistungen erzielt werden.

2.3 Bodenpassage Versuchsanlage (VA)

2.3.1 Grundlagen

Der Begriff *Bodenpassage* wird häufig für natürliche wasserdurchlässige Bodenschichten zur Grundwasseranreicherung oder Grundwasserfiltration im Trinkwasserbereich verwendet. Diese natürliche Bodenpassage beschreibt allgemein einen flächig großen Raum unterschiedlicher Bodenschichten sowie Bodenbeschaffenheiten und daraus resultierend lange Fließ- und Verweilzeiten. Dadurch erfolgt eine Entfernung der im Wasser enthaltenen Stoffe auf mechanische und biologische Weise, so dass das Filtrat als Grundwasser zur Trinkwasserverwendung im günstigen Fall entnommen werden kann. (Ziegler, 2001, pp. 5-8)

Generell finden in Bodenpassagen unterschiedliche Prozesse zur Minimierung von bestimmten Stoffkonzentrationen statt:

- Mechanische Filtration
 - Ablagerung von abfiltrierbaren Stoffen (AFS)
 - Reduktion von CSB, BSB, Nges und Pges
- Mikrobiologischer Abbau
 - Aerobe Respiration
 - Nitrifikation
 - Denitrifikation
 - Mangan-/Eisenreduktion
 - Reduktion von Sulfat
 - Methanfermentation
 - N₂-Fixierung
- Sorption
 - Biotische Adsorption durch mikrobielle Tätigkeit
 - Abiotische Adsorption durch Chemismus des Bodens

Bei der Versickerung von biologisch vorgereinigtem Abwasser wird durch die Bodenpassage eine noch weitergehende Reinigung erzielt, wobei die

Reinigungsleistung neben dem Grad der Vorreinigung von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig ist (Blumberg, et al., 1994, p. 9).

Vor allem die Redox-Bedingungen (Sauerstoffkonzentration) im Boden, die Fließstrecke, die Fließzeit und die Bodenbeschaffenheit haben dabei einen Einfluss auf die Entfernungsraten beziehungsweise auf die Reinigungsleistung (Ziegler, 2001, pp. 7-8).

2.3.2 Konzept

Basierend auf dem zuvor beschriebenen Prinzip wurde der natürliche Reinigungsmechanismus der Natur im Rahmen des Forschungsprojekts mit dem Arbeitstitel „*Bodenpassage*“ auf einen technischen Maßstab übertragen. Die technische Verfahrensvariante sollte dabei reproduzierbar, robust, einfach zu kontrollieren und kostengünstig sein. Sie besteht aus zwei in Reihe geschalteten und belüfteten Kies-Filterstufen gefolgt von einem UV-System zur Entkeimung von Oberflächenwasser und geklärten Abwässern. Für eine entsprechende Weiter-/Wiederverwendung wird das Abwasser analog zur natürlichen Bodenpassage durch die genannten Prozesse gereinigt.

Das im Forschungsprojekt entwickelte Konzept wird im Folgenden *BodenpassageVA* (*Bodenpassage Versuchs-Anlage* inkl. Filter und UV-System) genannt, um eine Verwechslung mit dem Begriff der natürlichen Bodenpassage auszuschließen.

Da die *BodenpassageVA* mit geklärtem Abwasser beschickt wird und daher einer Abwasserbehandlungsanlage nachgeschaltet wird, kann sie auch als Erweiterung sozusagen als 4. Reinigungsstufe dieser betrachtet werden.

2.3.3 Entwicklung & Aufbau

Das Forschungsprojekt zur Entwicklung der *BodenpassageVA* umfasste mehrere Arbeitspakete. Die Technische Hochschule Ulm (TH Ulm) und die *TIA GmbH* waren hierbei beteiligt. Die *TIA GmbH* hat sich mit der Auswahl und Evaluation der Verfahrensarten, dem Prinzip der Boden- und Raum- und Biofilter, sowie mit der Entwicklung der belüfteten Filter der *BodenpassageVA* beschäftigt. Die TH Ulm entwickelte auf Grundlage der aufgestellten Anforderungen ein System zur Entkeimung des aufbereiteten Abwassers, nachdem es den ersten Teil der

BodenpassageVA (Filter) durchflossen hat. Dies wurde mit der Bestrahlung durch energieeffiziente UV-LEDs verwirklicht.

Die Versuchsanlage wurde in dem Betriebsgebäude der kommunalen Kläranlage in Güster aufgebaut (Abbildung 7). Um den für das Projekt festgesetzten Anforderungen gerecht zu werden, sollte die *BodenpassageVA* dort mit dem Klarwasser der Nachklärung der Kläranlage beschickt werden.

Die beiden in Reihe geschalteten Filterstufen wurden in zwei Intermediate Bulk Containern (IBCs) mit einer Fläche von je ca. 1m x 1m realisiert. Dabei ist die erste Filtereinheit höher positioniert als der zweite Filter (siehe Abbildung 6). Damit soll die Anlage ohne Pumpen im Freigefälle (durch die Schwerkraft) betrieben werden, nachdem das Wasser in den ersten Filter gelangt ist. Beide Filter werden vertikal abwärts durchströmt und im Überstau (Wasserspiegel über Filtermaterial) betrieben. Die Zu- und Überleitungen bestehen aus HT-Rohren (Hochtemperatur-Rohre) und können für verschiedenste Anordnungen einfach variiert werden.

Eine wesentliche Anforderung war, dass das Filtermaterial für einen ubiquitären Einsatz der *BodenpassageVA* überall verfügbar sein sollte. Für die Auswahl des optimalen Materials hat die *TIA GmbH* verschiedene Proben getestet. Mit einer eigens von ihr dafür entwickelten Messapparatur wurden das Hohlraumvolumen, die Verweilzeit und der Druckverlust in Schüttungen verschiedener Materialien gemessen (siehe Anhang). Als mögliche Filtermaterialien wurden Rindenmulch, Torfhumus, Filtersand sowie Kies mit den Körnungen 2/8, 8/16 und 16/32 getestet. Nach den Testreihen fiel die Wahl auf den Kies mit der Körnung zwischen 2 und 8 mm (2/8), der für beide Filterstufen verwendet wurde. Beide Filterbetten haben eine Schütthöhe von ca. 0,8 m. Daraus resultiert ein Filtervolumen von 1,6 m³ für beide Stufen und eine Filtergeschwindigkeit von 0,3 m/h beziehungsweise ca. 0,1 mm/s bei einer Zulaufmenge von 300 l/h.

Die Belüftung beider Filter wurde mittels eines Gebläses und zweier perforierter Silikonschläuche verwirklicht. Je ein Schlauch wurde dafür im Grund des Filterbetts installiert (siehe Abbildung 6).

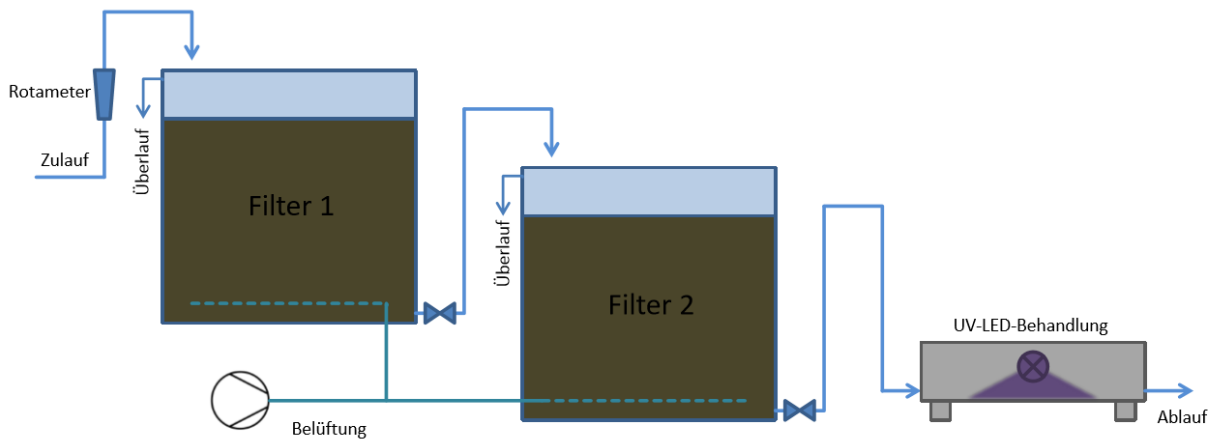


Abbildung 6: Prozessschema und Aufbau der BodenpassageVA



Abbildung 7: BodenpassageVA ohne UV-Einheit in Güster (TIA GmbH, 2020)

Nach der Bodenpassage durchströmt das vorgereinigte Abwasser zur Desinfektion eine PVC- Rinne mit einer PFTE-Beschichtung. Die PFTE-Beschichtung dient der Reflektion der UV-Strahlen, die von oben auf das durchfließende Wasser emittiert werden, so dass der Wirkungsgrad der Behandlung erhöht wird. Das Wasser wird über einen Einlaufkasten auf die komplette Breite der Rinne verteilt, um eine laminare und gleichmäßige Strömung und eine homogene Strahlungs-dosis durch die UV-Einheit zu erreichen. Auf der Rinne liegt die UV-Bestrahlungseinheit. Sie besteht aus einem Kasten aus Aluminium, der die UV-LEDs und die Steuerungselektronik enthält (Abbildung 8). Der Wirkungsgrad der verbauten LEDs beträgt ca. 1%. Die Anlagenteile wurden dabei so ausgelegt, dass sie Volumenströme von bis zu 300 l/h zuverlässig reinigen und entkeimen sollen.



Abbildung 8: Rinne & UV-Bestrahlungseinheit (TH Ulm, 2019)

Die Aufbereitung des verwendeten Abwassers erfolgt durch die oben genannten Verfahren, die auch bei der natürlichen Bodenpassage stattfinden. Die wesentlichen Verfahrensschritte der *BodenpassageVA* bilden die Raum- und Biofilter sowie das nachgeschaltete UV-System zur zusätzlichen Entkeimung. Dieser Aufbau soll die abfiltrierbaren Feststoffe (AFS), chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), Stickstoff, Phosphor und darüber hinaus Mikroschadstoffe, Arzneimittel, Keime und Bakterien in den Versuchen reduzieren.

2.3.4 Einflussfaktoren

Für natürliche Bodenpassagen und ebenso bei Bodenfiltern oder Sandfilteranlagen für die Trinkwasseraufbereitung gelten eine Vielzahl von Faktoren, die die Ablaufkonzentrationen beeinflussen. Von diesen können folgende auf die *BodenpassageVA* übertragen sowie einige weitere ergänzt werden:

- Material und Chemismus der Bodenpassage
- Struktur und Kornverteilung der Bodenpassage
- Schichtstärke der Bodenpassage
- Filtergeschwindigkeit durch die Bodenpassage
- Aufenthaltszeiten in der Bodenpassage
- Ablaufkonzentrationen aus der vorgeschalteten technischen Kläranlage beziehungsweise Zulaufkonzentrationen in die Bodenpassage
- Belüftung des Materials der Bodenpassage (Redoxpotential)

- Dauer von Beschickung und evtl. Pausenzeiten
- Temperatur in der Bodenpassage
- Chemismus und Struktur von filtrierbaren Stoffen
- Homogenität oder Inhomogenität der Bodenpassage
- Betriebsalter der Anlage

Diese Faktoren beeinflussen wiederum die Kolmation, also die fortschreitende Verengung der Poren durch Ablagerung des Schlammes (Zusetzen) in der *BodenpassageVA*. Dadurch macht die Häufigkeit des Zusetzens der Filter sowie die darauffolgenden notwendigen Reinigungsintervalle einen wesentlichen Teil der Betriebsführung und den Einfluss auf die Abbauleistung der Anlage aus.

Die Leistung des UV-Systems ist ebenfalls von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig:

- Bestrahlungsstärke (W/m^2)
- UV-Dosis (J/m^2)
- Aufenthaltszeit
- Strahlungstransmission
- Trübung des bestrahlten Wassers
- Fließgeschwindigkeit
- Keimarten

2.3.5 Messreihen und Ergebnisse

Die *BodenpassageVA* wurde für die Evaluierung über 12 Monate betrieben. In den ersten Wochen wurde die Anlage eingefahren, so dass sich auf dem Filtermaterial Mikroorganismen ansiedeln konnten, die die gelösten Stoffe in dem Abwasser reduzieren sollen. Während der gesamten Laufzeit wurden mehrere Messreihen durchgeführt und Beobachtungen festgehalten. Während des Projekts wurde die *BodenpassageVA* mit 70 - 300 l/h betrieben, um den Einfluss der Aufenthaltsdauer auf die Reinigungsleistung bewerten zu können.

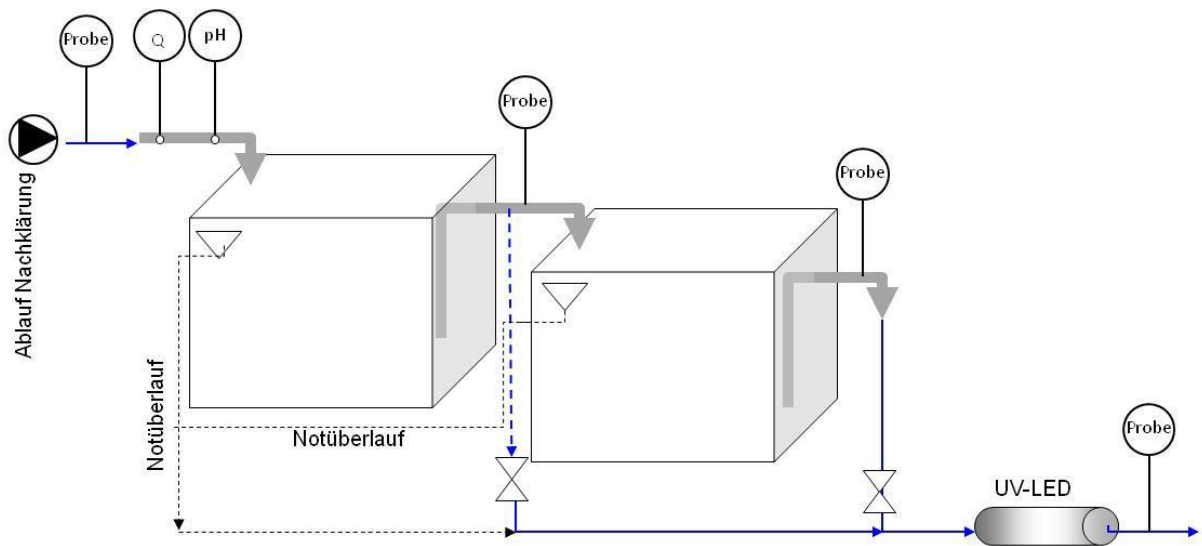


Abbildung 9: Anordnung der Komponenten und Probenahmestellen (TIA GmbH, 2020)

Folgende Parameter hat die TIA GmbH zur Bestimmung der Abwassercharakteristik und der Reinigungsleistung der *BodenpassageVA* an vier Probenahmestellen (siehe Abbildung 9) gemessen:

Im Zulauf, nach Filter 1, nach Filter 2:

- Temperatur
- pH-Wert
- Sauerstoff-Konzentration (O_2)
- Chemische Sauerstoffbedarf (CSB)
- Gesamtphosphor (P_{ges})
- Gesamtstickstoff (N_{ges})
- Ammonium (NH_4^+)
- Nitrit (NO_2^-)
- Nitrat (NO_3^-)
- Koloniebildende Einheiten (KBE)

Im Ablauf, nach UV-System:

- Temperatur
- pH-Wert
- Sauerstoff-Konzentration (O_2)
- Koloniebildende Einheiten (KBE)

Die Messergebnisse zur *BodenpassageVA* sind im Anhang detailliert aufgeführt. Eine Zusammenfassung dieser bietet die Tabelle 8.

Tabelle 8: Mittlere Reduktionsleistung der BodenpassageVA

Parameter	Zulauf	Ablauf	Reduktion
CSB	50 mg/l	< 15 mg/l	> 70 %
P _{ges}	2,7 mg/l	< 0,3 mg/l	> 89 %
N _{ges}	30 mg/l	10 mg/l	67 %
NH ₄ ⁺	10 mg/l	3 mg/l	70 %
NO ₂ ⁻	0,015 mg/l	0,025 mg/l	-67 %*
NO ₃ ⁻	0,7 mg/l	2,1 mg/l	-200 %*
AFS	30 mg/l	< 3 mg/l	> 90 %
KBE	> 25.000 KBE/ 100 ml	20 KBE/ 100 ml	> 99,92 %

* die Nitrit- und Nitratkonzentrationen sind innerhalb des Behandlungsprozesses der *BodenpassageVA* gestiegen, da in der Passage hauptsächlich aerobe Prozesse (hier: Nitrifikation) stattfinden. Die anoxische Denitrifikation konnte aufgrund von zu hohen Sauerstoffkonzentrationen oder zu geringen Kohlenstoff-Quellen keine Reduktion der gelösten Stickoxide bewirken.

Die Messergebnisse im Anhang bestehen aus den zwei Hauptuntersuchungen der *TIA GmbH*. Zum einen wurde die Einfahrtsphase im Frühjahr und der Betrieb bis August 2019 betrachtet. Die Anlage wurde zu der Zeit ohne UV-Einheit und mit maximal 120 l/h betrieben. Ab Oktober 2019 wurde der Durchfluss auf ca. 200 l/h erhöht. Im Januar und Februar 2020 erfolgte dann die letzte Messreihe mit der UV-Einheit und wechselnden Zulaufbedingungen (150-300 l/h). Der eingestellte Flächenbeschickung des Filters lag während des gesamten Versuchszeitraums zwischen 0,07 und 0,30 m³/(m²*h).

Während des Betriebs kam es ca. alle 3-4 Wochen zum Überlaufen der Filtereinheiten. Durch die Kolmation im oberen Teil der Filterschicht (5-10 cm) und der Bildung eines Filterkuchens aus den Belebtschlammflocken der Kläranlage wurde der Filterwiderstand zu groß. Im Freigefälle konnte das Wasser nicht mehr die Filter passieren. Eine manuelle Reinigung der Filter war notwendig. Diese bestand aus dem händischen Abtragen des Filterkuchens und dem darauffolgenden Umgraben der ersten 20 cm des Filtermaterials. Die Reinigungsmaßnahmen während des Betriebs hatten keinen messbaren Effekt auf die Reinigungsleistung der *BodenpassageVA*. Zweimal wurden während des gesamten Betriebs der Versuchsanlage die jeweils oberen 50% Kies der Filter abgetragen und mit Frischwasser gereinigt. Anschließend wurde der Kies wieder in die Filterbehälter gegeben und mit den verbliebenen 50% vermengt. Die Vermischung hat den gereinigten Kies wieder mit Mikroorganismen

angeimpft, so dass sich diese darauf schneller für den mikrobiellen Aufbau ansiedeln konnten. Bei dem Abtragen der oberen Filterschicht wurden gelegentlich anaerobe Zonen im Filtermaterial aufgetan. Anaerobe Verhältnisse im Filtermaterial sind durch ihre schwarzen Verfärbungen und einem fauligen Geruch zu erkennen. Dies deutet auf eine nicht ausreichende Sauerstoffversorgung in manchen Bereichen des Filters hin. Durch die Messung der Sauerstoffkonzentrationen an den jeweiligen Probenahmestellen konnte kein genereller Sauerstoffmangel im Wasser festgestellt werden.

3 Material & Methoden

3.1 Vorgehen

Die Arbeiten und Annahmen in den folgenden Kapiteln basieren auf den Erkenntnissen und Auslegungen des Forschungsprojekts *BodenpassageVA*. Die Methodiken zur Analyse der Reinigungsleistung und des Langzeitverhaltens dieser Anlage werden daher im Folgenden als Grundlage für diese Arbeit dargestellt.

Die Reinigungsleistung der Versuchsanlage wurde in mehreren Versuchsreihen von der TIA GmbH und der TH Ulm mit regelmäßigen Stichproben betrachtet. Dafür wurden die Proben an den beschriebenen Entnahmestellen genommen und vermessen. Weitere Beobachtungen, Änderungen der Einstellungen und Wartungsintervalle der Versuchsanlage *BodenpassageVA* wurden dokumentiert.

3.2 Analytik

Unmittelbar nach der Entnahme der Probe erfolgte die Messung des Sauerstoffgehalts, des pH-Werts und der Temperatur.

Folgende Geräte wurden dafür verwendet:

- Sauerstoffmessgerät: „WTW Multi 3410“ mit Sonde „FDO 925“ (Genauigkeit: 1,5% bei 20°C)
- pH- und Temperatur-Messgerät: „WTW Multi 3310 IDS“ mit Sonde „SenTix 980“ (Genauigkeit: $\pm 0,004$ pH; $\pm 0,1$ T [°C])

Im Labor wurden anschließend die folgenden Wasserinhaltsstoffe (Parameter) mit den Küvettentests und dem Photometer *Nanocolor 500D* von der Firma *MACHERY-NAGEL GmbH & Co. KG* gemessen. Für die Messung blieben die Proben unfiltriert.

Tabelle 9: Küvettentests für Photometermessung

Parameter	Name des Küvettentests <i>(Rundküvettentests NANOCOLOR)</i>	Messbereich
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	<i>CSB 160</i>	15-160 mg/l
Gesamtphosphor (P _{ges})	<i>Ortho- und Gesamt-Phosphat 15</i>	0,30-15,00 mg/l
Gesamtstickstoff (N _{ges})	<i>Gesamt-Stickstoff TN_b 220</i>	5-220 mg/l
Ammonium (NH ₄ ⁺)	<i>Ammonium 50</i>	1-50 mg/l
Nitrit (NO ₂ ⁻)	<i>Nitrit 2</i>	0,02-1,50 mg/l
Nitrat (NO ₃ ⁻)	<i>Nitrat 50</i>	2-100 mg/l

Für die Messung der Koloniebildenden Einheiten (KBE) wurden Petrischalen mit integriertem Injektions- und Ausstrichsystem (PIA) von *GMBU e.V.* verwendet. Die Inkubationszeit der Bakterien auf dem Nährboden der Petrischalen betrug 48 h bei ca. 22°C. Danach folgte die quantitative Abschätzung der Einheiten bei großen Mengen durch die Zählung auf einer definierten Teilfläche (1 cm²) des Nährbodens mit anschließender Hochrechnung auf die Gesamtfläche. Die Ergebnisse werden in KBE/100 ml Wasser angegeben.

3.3 Bewertungskriterien

Für einen Vergleich soll die erreichte Reinigungsleistung der *BodenpassageVA* auf alternative Verfahren übertragen werden und die Grundlage der Auslegung von Alternativen sein. Der Zulauf, mit dem die Versuchsanlage beschickt wurde, wird für einen aussagekräftigeren Vergleich erhöht, um die Anlage in einem größeren technischen Maßstab vergleichen zu können. Dementsprechend werden alle verfahrenstechnischen Größen der *BodenpassageVA* hochskaliert und auf die ausgewählten Verfahren übertragen. Die Rahmenbedingungen für die theoretische Auslegung der weiteren Verfahren sind die Zulaufmenge (Q) und die entsprechenden Retentions-/ Reinigungsleistungen der untersuchten Parameter.

Der Vergleich wird anhand verschiedener Kriterien die ausgelegten Verfahren bewerten. Dafür wird eine Laufzeit von 15 Jahren angenommen, in denen betrieblicher Aufwand und Nutzen dargestellt und somit die Wirtschaftlichkeit, Vor- und Nachteile der Verfahren aufgezeigt werden.

Die Bewertung der Betriebswirtschaftlichkeit der Verfahren erfolgt durch folgende Kriterien:

- Investitions-/ Anschaffungskosten: Kaufpreis (und Leistungsdaten) der Maschinen, Aggregate, Behälter und sonstige Materialien. Diese Punkte werden über die oben festgesetzte Laufzeit zu einem definierten Zinssatz jährlich abgeschrieben.
- Betriebs(mittel)kosten: Energie (Strom), Chemikalien, Hilfsmittel, Ersatzteile
- Personalkosten: Aufbau, Betrieb, Instandhaltung und Wartung

Aus den Punkten werden die jährlichen Kosten der Anlage, die Kosten pro m³ Wasser und der Stromverbrauch pro m³ ermittelt.

Ergänzend zu den wirtschaftlichen Aspekten werden allgemeine Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahrenstypen aufgezeigt, die nicht auf ein finanzielles Maß reduziert werden können, sondern je nach Anforderungsbereich individuell zu bewerten sind.

- Anwendbarkeit/ Aufwand: Verfügbarkeit; technische Komplexität; Notwendigkeit von Fachpersonal; einfache Implementierung beziehungsweise Ergänzen an bestehende Anlagen
- Risikobewertung & Umweltverträglichkeit: Verwendung von umweltschädlichen Stoffen; Gefahr für Mensch, Tier und Umwelt

4 Durchführung

4.1 Auslegung und Aufbau der Filtrationsverfahren

Die Anforderungen der im folgenden Vergleich beschriebenen Verfahrenskombinationen sind die erreichten Reinigungsleistungen von der *BodenpassageVA* mit geklärtem Abwasser. Auf Basis der hochskalierten Versuchsanlage mit einer angestrebten Durchflussrate von 10 m³/h werden die Vergleiche zu anderen Verfahren durchgeführt. Diese Anlage wird im Folgenden als *BodenpassageTA* (Bodenpassage Technische Anlage) betitelt. Die

Reinigungsleistung ist als äquivalent der *BodenpassageVA* zu betrachten. Zum anderen werden ein zweistufiger Sandfilter (*SandfilterTA*) mit Rückspülfunktion und eine Membranfiltration (*MembranfiltrationTA*) geplant, die nach dem Stand der Technik als Alternative zu den Biofiltern der *BodenpassageTA* aufgeführt werden. Die Auslegung und Ermittlung der (Investitions-) Kosten erfolgte mit Unterstützung der *TIA GmbH*. Die ausgelegten Komponenten sind mit Größe, Eigenschaften und Herleitung im Anhang aufgelistet.

BodenpassageTA

Wesentliche Bemessungsparameter:

- Flächenbeschickung
- Beckengröße
- Höhe des Filterbettes
- Filtermaterial
- Belüftung
- Strahlendosis

Der Aufbau ist ähnlich der Versuchsanlage zu betrachten. Zwei Biofilter-Einheiten werden in Reihe im Freigefälle betrieben. Die Filterbetten haben die gleiche Filter- und Einstau-Höhe wie die *BodenpassageVA*. Aus dem erhöhten Durchfluss resultiert jedoch ein deutlich größerer Flächenbedarf für die Filter. Aus diesem Grund bestehen die Filterkörper nicht mehr aus den IBCs, sondern aus einfachen Betonbecken inkl. Ablaufstutzen über dem Behältergrund. Für den Zulauf und die Belüftung sind keine weiteren Anschlüsse in der Behälterwand notwendig, da diese von oben über der Wandung erfolgen. Über einen größeren perforierten Silikonschlauch und ein leistungsstärkeres Gebläse erfolgt die Belüftung der Filter. Aufgrund der gleichbleibenden hydrostatischen Verhältnisse zwischen den Anlagenelementen ist die Verrohrung ebenfalls durch HT-Rohre realisiert. Lediglich der Durchmesser der Rohr-Elemente wird dem Zulauf angepasst. Eine Bypass-Funktion soll in der Anlage eingearbeitet werden, sodass das Filtermaterial eines Filters ausgetauscht werden kann, ohne dass die gesamte Anlage außer Betrieb genommen werden muss. Die regelmäßige Entfernung der zurückgehaltenen Feststoffe und der Austausch des Filtermaterials erfolgen händisch. Beim Austausch des Filtermaterials ist darauf zu achten, dass ein Teil des Filtermaterials, der mit einem Biofilm bewachsen ist, auf die

neue Filterschicht zum „Animpfen“ des Biofilters geschüttet wird. Andernfalls benötigt die Biologie deutlich länger, um sich neu zu entwickeln und der Aspekt der biologischen Reinigung würde nicht im vollen Maße der Möglichkeiten greifen. Ein Austausch des Filtermaterials ist aufgrund der Kolmation durch Feststoffe dennoch unverzichtbar. Hierbei muss auf die Position des Belüftungsschlauchs geachtet werden, so dass dieser weder beschädigt noch in der Position verändert wird, um den Filter gleichmäßig belüften zu können.

Nach den zwei Biofiltern entkeimt eine dem Zulauf größentechnisch angepasste UV-LED-Einheit der *TH Ulm* das gefilterte Wasser.

SandfilterTA

Wesentliche Bemessungsparameter:

- Flächenbeschickung
- Beckengröße
- Filtermaterial
- Rückspülpumpe & Belüftung
- Strahlendosis

Die *SandfilterTA* ist vom Aufbau ähnlich dem der *BodenpassageTA*. Das Verfahren basiert auf zwei in Reihe geschalteten Sandfiltern, die von oben nach unten vertikal durchströmt werden. Mittels einer Rückspülpumpe und eines Gebläses sollen die Filter regelmäßig rückgespült werden können. Dafür ist ein gleichmäßiger Wasserablauf in den Betonbecken erforderlich, um ebenfalls ein gleichmäßiges Rückspülen der Filterschicht bei Umkehrung der Fließrichtung zu ermöglichen. Für die Umkehrung der Fließrichtung zur Rückspülung sind zusätzliche Ventile, eine leistungsstarke Pumpe, die für eine ausreichende Verwirbelung der Filterschicht zur Rückspülung genutzt werden kann, sowie ein Rohrleitungssystem, das erhöhten Drücken Stand hält, nötig. Das Rückspülwasser wird gesondert gesammelt und zum Beispiel durch Sedimentation weiter aufbereitet. Eine Aufbereitung der filtrierbaren Stoffe im Spülwasser ist nicht in dieser Auslegung mit inbegriffen. Die Rückspülfunktion erfolgt in beiden Filterstufen gleichzeitig. Für diese Zeit hat die Filtration Betriebspause.

Die Anlage soll über eine Bypass-Funktion verfügen, sodass das Filtermaterial eines Filters ausgetauscht werden kann, ohne dass die gesamte Anlage außer Betrieb

genommen werden muss. Da die Filter in Reihe geschaltet sind, hält der erste Filter den Großteil der Feststoffe zurück und setzt sich demnach schneller zu. Dadurch ist eine häufigere Wechselfrequenz des Filtermaterial im ersten Filter zu erwarten.

Nach den zwei Biofiltern entkeimt eine dem Zulauf größentechnisch angepasste UV-LED-Einheit der *TH Ulm* das gefilterte Wasser.

MembranfiltrationTA

Wesentliche Bemessungsparameter:

- Fläche der Membran
- Porenweite
- Druck
- Spülzyklus
- Reinigungsmittel

Die *MembranfiltrationTA* basiert auf einem trocken aufgestellten Membranmodul. Die verwendeten Membranen sind als Rohrmodule ausgelegt und werden im Cross-Flow-Verfahren betrieben. Dadurch ist ein längerer Betrieb ohne Unterbrechungen möglich, allerdings sind die Energiekosten größer. Die Art der Filtration entspricht mit einer Porenweite von ca. 0,05 µm der Ultrafiltration (UF), damit die restlichen Belebtschlammflocken, einzelne Bakterien und auch Viren zurückgehalten werden. Eine Pumpe beschickt die Membrane mit mindestens 5 bar. Der relativ hohe Feststoffgehalt von 30 mg/l in den Versuchen der *BodenpassageVA* sorgt dafür, dass die Membranen regelmäßig aufgrund von Scaling und Fouling mit chemischen Reinigungsmitteln gespült und auch gegebenenfalls ausgetauscht werden müssten. Für den Reinigungsprozess ist neben dem Einsatz von Chemikalien ein separater Spülkreislauf für Klarwasser notwendig. Aufgrund der hohen Prozessdrücke müssen alle Anlagenteile (ausgenommen von den Membranen) aus Edelstahl sein.

Durch die geringe Porenweite der Ultrafiltration ist eine nachgeschaltete Desinfektion durch die UV-LED-Einheit nicht notwendig. Alle Keime, Viren und Kolloide, die größer als 0,05 µm sind, werden durch das Verfahren zurückgehalten.

4.2 Auslegung und Aufbau der Entkeimungsverfahren

Die entwickelte UV-LED-Einheit der TH Ulm wird im Folgenden mit alternativen Verfahren verglichen. Der Vergleich bezieht sich dabei auf die betriebswirtschaftlichen Aspekte sowie auf die Vor- und Nachteile der Verfahren. Das Ziel, für das alle Verfahren ausgelegt werden, ist die Entkeimung von einer definierten Menge Wasser. Konkret sind das, wie im ersten Vergleich, 10 m³/h vorgereinigtes Abbeziehungsweise Oberflächenwasser, deren KBE-Gehalt um mindestens 3 log-Stufen (Zehnerpotenzen) verringert werden soll.

Neben der UV-LED-Einheit wird eine konventionelle UV-Entkeimung mit Niederdruckdampfstrahlern, eine Ozonungsanlage und eine Chlorungsanlage betrachtet. Diese Verfahren bieten sich an, um sie einer bestehenden Anlage nachzuschalten. Das verwendete Wasser sollte durch eine entsprechende Vorbehandlung möglichst feststofffrei sein (zum Beispiel Filtration). Die folgenden beschriebenen Auslegungen der Verfahren basieren auf den technischen Grundlagen dieser Arbeit und wurden detailliert in der Excel-Tabelle im Anhang (detaillierter und mit Quelle aufgeführt).

UV-LED:

Wesentliche Bemessungsparameter:

- Leistung
- Reaktionsbehälter
- Strahlendosis
- Laufzeit LEDs

Die UV-LED-Einheit basiert auf dem Prototyp der TH Ulm, der für die Entkeimung in der *BodenpassageVA* eigens entwickelt wurde. Für den höher ausgelegten Durchfluss werden die Bestrahlungsfläche, die LED-Anzahl und die Leistungsaufnahme der Anlage hochskaliert. Dadurch soll die Strahlungsdosis der UV-LEDs im technischen Maßstab die gleiche Entkeimungsleistung des Prototyps bringen. Analog zur UV-Einheit der *BodenpassageVA* ist die Einheit der technischen Anlage ebenfalls als Rinne ausgelegt und hat dadurch einen höheren Platzbedarf. Von oben wird die Rinne mit dem Wasser bestrahlt. Das reflektierende Material der Kunststoffrinne erhöht den Wirkungsgrad der UV-LEDs. Da die Retentionsleistung der UV-Einheit unter anderem

von der Transmission des Wassers und der Aufenthaltszeit abhängig ist, sollte das Verhältnis von Zulauf und Fläche in der UV-Einheit nicht zu groß werden. Daraus resultierend, würde sich ein höherer Flüssigkeitsstand und eine höhere Fließgeschwindigkeit in der Rinne negativ auf die Entkeimungsrate auswirken.

UV-Strahler

Wesentliche Bemessungsparameter:

- Leistung
- Reaktionsbehälter
- Strahlendosis
- Laufzeit Niederdruckstrahler

Die UV-Strahler-Einheit besteht aus mehreren Quecksilberniederdruckstrahler, die jeweils eine UV-Licht-Wellenlänge von 254 nm emittieren. Da das Hauptaugenmerk der Anwendung auf der Inaktivierung von Pathogenen liegt, fiel die Wahl nicht auf die ineffizienteren Mitteldruckstrahler. Die zylinderförmigen Strahler sind in einem Durchflussreaktor parallel zur Fließrichtung eingelassen. Das zu entkeimende Wasser umströmt die länglichen UV-Strahler über die komplette Manteloberfläche (360°). Das erhöht die Effizienz der Bestrahlung. Die UV-Strahler sind insgesamt günstiger als die UV-LEDs

Ozonung:

Wesentliche Bemessungsparameter:

- Leistung
- Reaktionsbehälter
- Ozondosis
- Ozonvernichtung

Für eine ausreichende Entkeimung durch die Ozonung wird eine Dosiermenge von 5 g Ozon/ m³ Abwasser angestrebt. Bei einem stündlichen Zulauf von 10 m³/h entspricht dies einer Ozongenerierung von 50 g/h. Der Reaktionsbehälter sowie alle Durchleitungen müssen gasdicht und aus Edelstahl sein. Die Reaktionszeit des Ozons mit dem Abwasser beträgt ca. 5 Minuten. Dafür muss der Reaktionsbehälter

mindestens 900 l fassen. Ein Kompressor liefert ca. 76 l Luft/min, die für die Ozonproduktion notwendig sind. Zum Kühlen des Prozesses werden ca. 70 Liter Wasser benötigt. Das Ozon wird in den Reaktionsbehälter geleitet. Mögliche Restkonzentrationen werden von dort über eine Ozonvernichtung thermisch beziehungsweise katalytisch entfernt.

Chlorung:

Wesentliche Bemessungsparameter:

- Leistung
- Reaktionsbehälter
- Chloriddioxidosis
- Chemieverbrauch

Die Chlorung erfolgt mit der Zugabe von Chlordioxid (ClO₂). Durch dieses Verfahren bilden sich zum einen weniger unerwünschte Nebenprodukte, zum anderen ist das Chlordioxid wesentlich reaktiver als Chlorgas oder die Hypochlorit-Verbindungen. Für die Entkeimung sind 10 g Chlordioxid/ m³ Abwasser erforderlich. Dies entspricht einem Chlordioxidbedarf von 100 g/h. Chlordioxid kann fertig als Chemikalie erworben werden oder vor Ort aus Natriumchlorit (NaClO₂) und Salzsäure (HCl) hergestellt werden. Als Nebenprodukte entstehen bei der Reaktion Natriumchlorid (Kochsalz) und Wasser.



Für ein Kilogramm ClO₂ werden rund 1,6 kg Natriumchlorit und 0,5 kg Salzsäure benötigt. Die Chemikalien werden in verdünnter Form dosiert. Ein automatisches Dosier-, Mess- und Regelsystem ist notwendig, damit keine Überdosierungen stattfinden. Dies könnte je nach Verwendung des Wassers zu gesundheitlichen Problemen und unerwünschten Umwelteinwirkungen führen. Für eine vollständige Oxidation wird eine Reaktionszeit von ca. 5 Minuten angenommen. Daraus resultiert ein Volumen von ca. 900 l für den gasdichten Reaktionsbehälter.

Kombination der Filtrations- und Entkeimungsverfahren

Im folgenden Vergleich sollen die vorgestellten Entkeimungsverfahren als Ersatz für die UV-LED-Einheit, die auf der *BodenpassageVA* basiert, mit den Verfahren zur Feststoffreduktion kombiniert werden. Um eine Vergleichbarkeit zu erreichen, haben die Kombinationen das Ziel, die AFS-Werte von 30 mg/l auf weniger als 1 mg/l zu reduzieren. Dies erfolgt durch den ersten Teil der jeweiligen Kombinationen (Filter und Membranen), in dem die suspendierenden Stoffe zurückgehalten werden. Als zweite Vorgabe muss die Reduzierung der KBE-Werte von über 25.000 KBE/ml auf weniger als 20 KBE/ml eingehalten werden. Das erfolgt zu einem großen Teil ebenfalls über die Feststoffabtrennung des ersten Verfahrensschritts der Kombinationen (Filtration). Durch das jeweils nachgeschaltete Entkeimungsverfahren werden die restlichen Keime und Pathogene inaktiviert und abgetötet. Das Membranverfahren wird nicht mit den Entkeimungsverfahren kombiniert, da es in sich bereits eine vollständige, entkeimende Funktion durch die Membran bietet.

Zusätzliche Reinigungs-/Retentionsleistungen von Verfahrenskombinationen gegenüber weiteren Abwasserinhaltsstoffen, die nicht die notwendigen Anforderungen betreffen, werden als finanziell unabhängige Vorteile mit in die Bewertung der Verfahren aufgenommen.

Tabelle 10: Übersicht durchgeführte Verfahrenskombinationen

Verfahrens- kombinationen		Feststoffabtrennung (erster Teil)		
		<i>BodenpassageTA</i> (Biofilter)	<i>SandfilterTA</i>	<i>Membran- verfahrenTA</i>
Entkeimung (zweiter Teil)	UV-LED	✓	✓	✗
	UV-Strahler	✓	✓	✗
	Ozonung	✓	✓	✗
	Chlorung	✓	✓	✗
	Membran- verfahren	✗	✗	✓

✓ : durchgeführt; ✗ : nicht durchgeführt

4.3 Investitions-, Betriebs- und Personalkosten

Der Aufbau, die Kosten und der betriebstechnische Aufwand werden im Folgenden für die im vorherigen Kapitel aufgeführten Verfahren und Kombinationen aufgeführt. Die Quellen und Herleitungen zu den jeweiligen Informationen sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen. Diese basieren zu einem großen Teil auf den Forschungsergebnissen der *TIA GmbH* und der TH Ulm. Weitere Informationen wurden durch Recherche, sowie durch Datenblätter Knowhow der *TIA GmbH* für die verwendeten Anlagentechniken zusammengetragen.

Für den Vergleich wurden die folgenden Kosten betrachtet und gegenübergestellt:

1. Investitions- beziehungsweise Anschaffungskosten:

Benötigte Aggregate, Pumpen, Behälter, Materialien etc.

Zunächst werden die jeweiligen Komponenten nach den Anforderungen skaliert und definiert. Dadurch werden Größen und Leistungen der Aggregate festgelegt. Alle Preise der Komponenten werden aufsummiert und bilden zusammen die Investitionskosten. Für die jeweilige Anlage wird der jährliche Kapitalaufwand (Kapitalkosten) über einen Zeitraum von 15 Jahren und einen Zinssatz von 3 % berechnet. Dieser Wert ist die jährliche Abschreibung der getätigten Investitionskosten. Dabei ist das Kapital zu marktüblichen Bedingungen als Kredit zu sehen. Der daraus resultierende Kapitalaufwand wird mit folgender Formel berechnet (Reischert, 2011, p. 75):

$$K = \frac{q^n (q - 1)}{q^n - 1} \cdot I \quad \text{und } q = 1 + z$$

K	jährliche Kapitalkosten
n	Abschreibungszeitraum
I	Investitionskosten
Z	Zinssatz

2. Betriebskosten:

Betriebs- und Hilfsstoffe, Energiekosten, Ersatzteile

Die Betriebskosten werden jeweils jährlich angegeben. Der Verbrauch von Betriebsstoffen, zum Beispiel Chemikalien, Kühl- und Spülwasser, werden entsprechend der Größe der Anlagen ausgelegt. Aus der verbrauchten Menge und dem Preis pro Einheit bilden sich die jährlichen Betriebsstoffe. Die

Energiekosten werden für alle elektrischen Aggregate aufgeführt. Entsprechend der elektrischen Eingangsleistung (in Watt) der Pumpen, Belüfter etc., dem zeitlichen Betrieb der Aggregate pro Tag und einem Kilowattstundenpreis von zunächst 20 Cent (Kalkulationswert) werden die jährlichen Energiekosten ermittelt. Für den Einfluss des Strompreises auf die Gesamtkosten wird der Preis für die Kilowattstunde (kWh) in einer Sensitivitätsanalyse variiert. Den höchsten Strompreis (stand März 2020) bezahlen private Haushalte mit rund 33 Cent pro kWh in Deutschland (Breitkopf, 2020). Im Sudan, Äthiopien und Kirgistan bezahlen private Haushalte teilweise weniger als einen Cent pro kWh. Im internationalen Durchschnitt liegt der Preis bei 12,2 Cent pro kWh (Schneider, 2020).

$$K_E = \frac{P}{1000} \cdot k_{kWh} \cdot T \cdot \frac{t_{on}}{24} \quad \text{mit } T = 8760 \frac{\text{Stunden}}{\text{Jahr}}$$

K_E = Energiekosten

P = Leistung in Watt

k_{kWh} = Kosten pro Kilowattstunde

t_{on} = tägliche Betriebszeit in Stunden

Die Berechnung der Ersatzteilkosten setzt eine limitierte Lebensdauer von bestimmten Anlagenteilen voraus. Vor allem mechanische Komponenten müssen gegebenenfalls nach bestimmten Laufzeiten ausgetauscht werden. Daraus resultierende Kosten müssen bei Anlagen mit längeren Laufzeiten mit einkalkuliert werden. Die Ersatzteile werden über den Zeitraum der Laufzeit jährlich abgeschrieben.

Die Betriebsmittelkosten, die Energiekosten und die Ersatzteilkosten werden aufsummiert und bilden zusammen die jährlichen Betriebskosten.

3. Personalkosten

Betrieb, Wartung und Reinigung

Die Personalkosten sind eigentlich als ein Teil der Betriebskosten zu sehen. Da die Handhabung und der Betrieb ein wesentlicher Maßstab für die Entwicklung der *BodenpassageVA* ist, wird dieser Aspekt jedoch separat beleuchtet. Die Personalkosten werden wie die Betriebskosten als jährliche Kosten betrachtet. Bei der Betrachtung der Kosten wird zwischen dem Aufwand des Betriebs und

der Instandhaltung der Anlage unterschieden. Zum Betrieb gehören die Aufgaben der Betriebsführung, der Überwachung und der Probenahme. Die Instandhaltung setzt sich aus der Reinigung und Wartung der Anlagenkomponenten zusammen. Für die verschiedenen Arbeiten sind unterschiedliche Kenntnisse und Voraussetzungen der Arbeiterinnen und Arbeiter erforderlich. Die jeweiligen Personalkosten werden den Anforderungen der Arbeiten durch unterschiedliche Löhne angepasst. Einfache Reinigungsarbeiten (10 €/ h) werden demnach niedriger honoriert als zum Beispiel Wartungsarbeiten an Aggregaten (40 €/ h), die meist von Fachfirmen/ Fachpersonal durchgeführt werden müssen. Je komplexer die Anlage beziehungsweise das angewandte Verfahren, desto höhere Personalkosten werden erwarten.

Nicht mit einbezogen sind bei dem wirtschaftlichen Vergleich die weitere Behandlung der abgefilterten Stoffe (z. B. durch eine nachgeschaltete Schlammentwässerung), der Aufbau der Anlage sowie die Speicherung des aufbereiteten Wassers nach der Entkeimung.

5 Ergebnisse

5.1 Vergleich Bodenpassage mit alternativen Verfahren

Die Ergebnisse des betriebswirtschaftlichen und des technischen Vergleichs werden in diesem Kapitel dargestellt. Als erstes erfolgt die Darstellung des Vergleichs der *BodenpassageTA* (inkl. LED-UV), des *SandfilterTA* (inkl. LED-UV) und dem *MembranverfahrenTA*. Anschließend werden die alternativen Entkeimungsverfahren (UV-Strahler, Chlorung und Ozonung) hinzugezogen und mit den betrachteten technischen Anlagen (TA) kombiniert. Alle im Folgenden dargestellten Kosten sind ohne Nachkommastellen gerundet worden. Daher kommt es bei der Aufsummierung der Kosten zu geringen Abweichungen.

5.1.1 Vergleich der *BodenpassageTA*, *SandfilterTA* und *MembranfilterTA*

Um die Wirtschaftlichkeit der *BodenpassageTA* zu bewerten, muss die Wirtschaftlichkeit von anderen Verfahren mit einer vergleichbaren Reinigungsleistung betrachtet werden.

Die Investitionskosten der *BodenpassageTA*, der *SandfilterTA* und der *MembranfilterTA* sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Details der Investitionskosten können im Anhang eingesehen werden. Beim Vergleich zeigt sich, dass die für 10 m³/h ausgelegte Membranfilteranlage die höchsten Investitionskosten aufweist. Dies ist vor allem auf die insgesamt noch relativ teure Membrantechnologie zurückzuführen. Die *BodenpassageTA* erreicht die niedrigsten Investitionskosten aller drei verglichenen Verfahren.

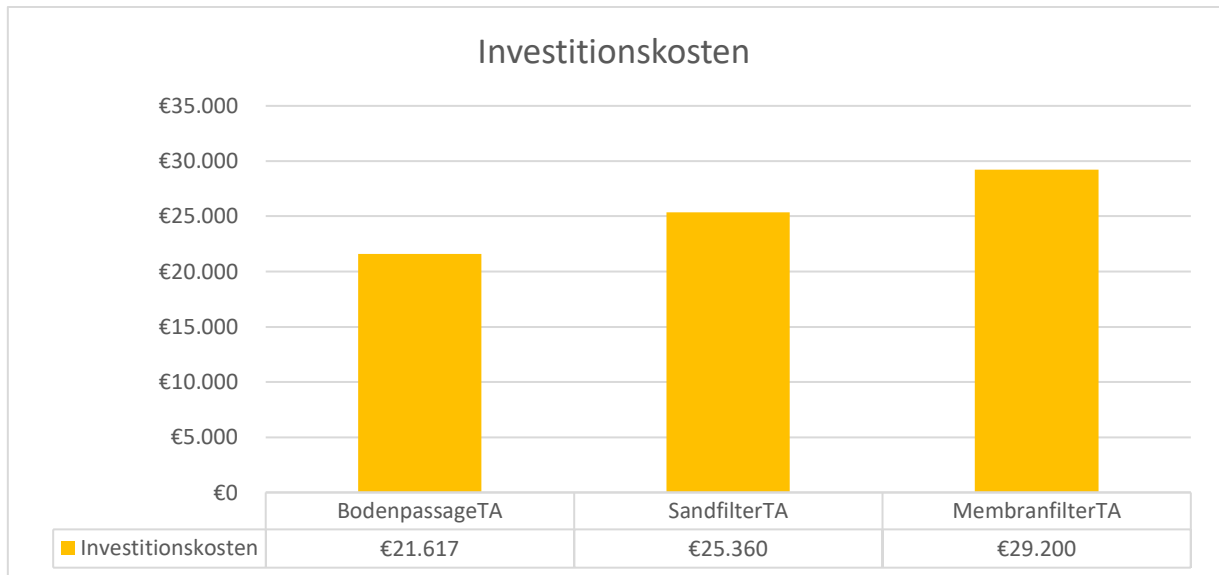


Abbildung 10: Investitionskosten der Technischen Anlagen

Die Abbildung 11 mit den jährlichen Kosten zeigt eine ähnliche Tendenz wie Abbildung 10 und inkludiert zudem die obenstehenden Investitionskosten. Über den zuvor definierten Zeitraum von 15 Jahren und einem jährlichen Zinssatz von 3 % werden die Anschaffungskosten der Anlagen mit jährlichen Abschreibungskosten getilgt.

Es zeigt sich, dass die *MembranfilterTA* mit Abstand die höchsten jährlichen Kosten hat. Die Abschreibungskosten bilden bei der *BodenpassageTA* den kleinsten Kostenfaktor, dicht gefolgt von den jährlichen Personalkosten. Bei der *SandfilterTA* ist die Reihenfolge von Abschreibungs- und Personalkosten umgekehrt mit jeweils höheren Werten. Den größten Kostenfaktor bilden bei allen Verfahren die jährlichen Betriebskosten. Diese sind aufgeschlüsselt nach Energiekosten, Betriebsmittelkosten und Ersatzteilkosten in Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 zusammen mit den Abschreibungs- und Personalkosten dargestellt. Die Betriebskosten der *MembranfilterTA* machen rund 62 % der gesamten Kosten aus. Das liegt vor allen Dingen an dem hohen Energieverbrauch der Anlage, der 53 % der jährlichen Kosten

einnimmt (Abbildung 14). Dahinter folgen die Personalkosten (Betrieb und Instandhaltung mit zusammen ca. 24 %).

Der größte Kostenfaktor der *BodenpassageTA* (Abbildung 12) sind die Betriebskosten (49 %). Bei der Betrachtung der aufgeschlüsselten Faktoren liegt die Verteilung der Kosten hauptsächlich bei den Ersatzteilkosten und den Energiekosten. Diese machen jeweils ca. ein Viertel der Gesamtkosten aus.

Beim *SandfilterTA* verschieben sich die Kosten im Vergleich zur *BodenpassageTA* mehr zu den Energie- und Personalkosten im Betrieb. Dagegen nehmen die Kosten zur Instandhaltung und für die verwendeten Betriebsmittel ab.

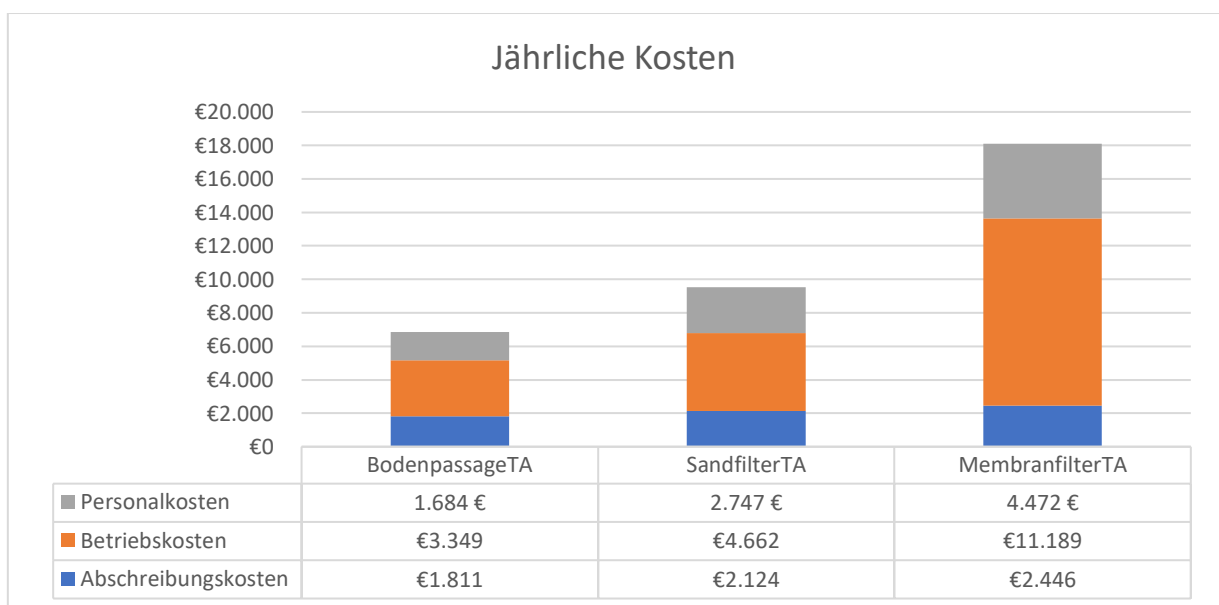


Abbildung 11: Jährliche Kosten der Technischen Anlagen inkl. Abschreibung der Investitionskosten

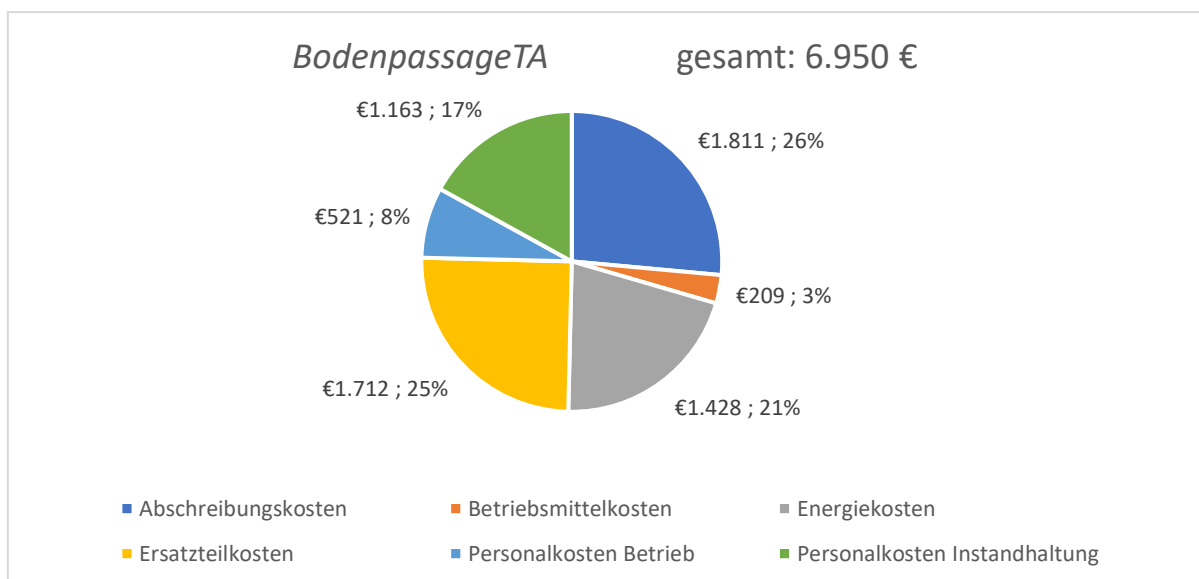


Abbildung 12: Aufschlüsselung aller jährlichen Kostenfaktoren der BodenpassageTA

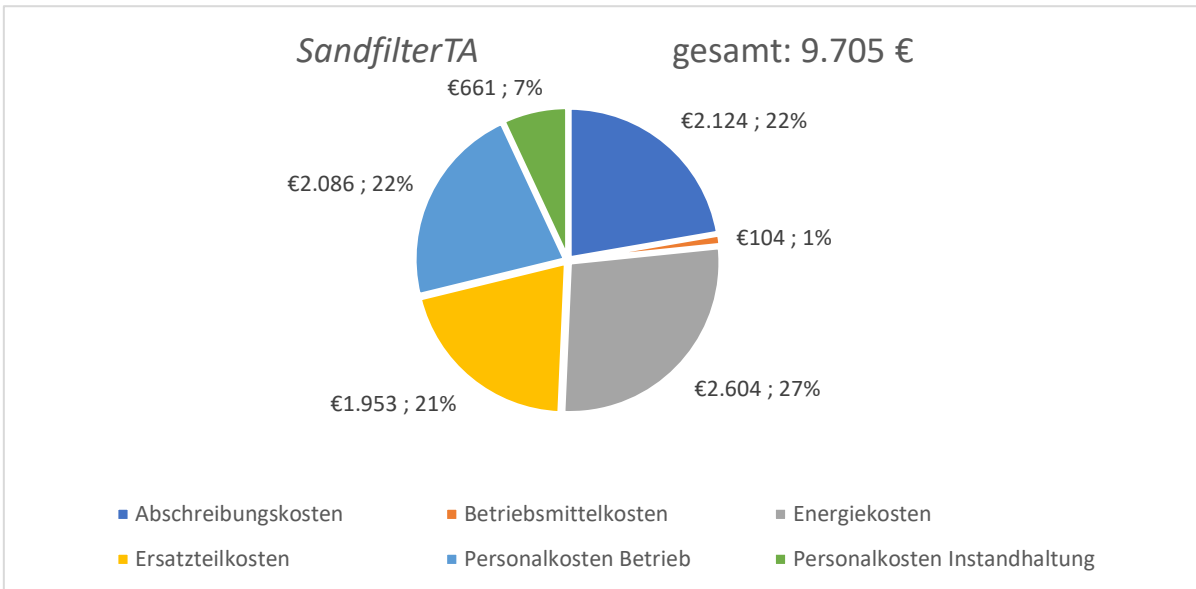


Abbildung 13: Aufschlüsselung aller jährlichen Kostenfaktoren der SandfilterTA

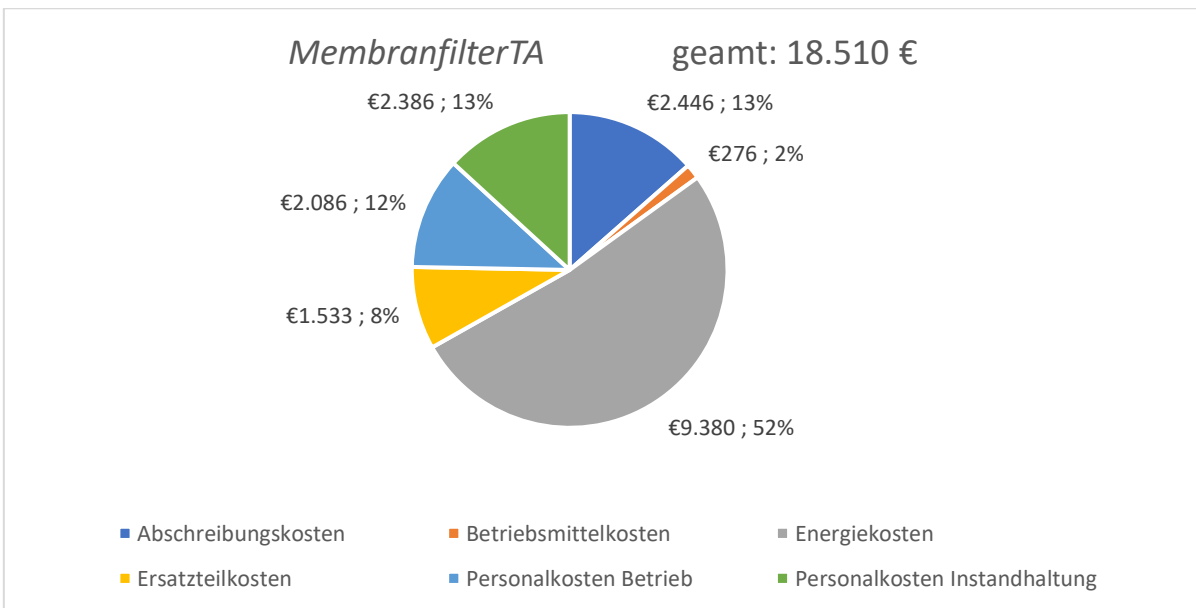


Abbildung 14: Aufschlüsselung aller jährlichen Kostenfaktoren der MembranfilterTA

Ausgehend von einer Laufzeit von mittleren Laufzeit von ca. 8.400 Stunden pro Jahr (die restlichen 360 Stunden werden als Stillstandzeiten für Reinigungs- und Wartungszwecke angenommen) und den entstehenden jährlichen Kosten wird der Preis für einen Kubikmeter aufbereitetes Wasser ermittelt. Bei einem Durchfluss von 10 m³/h werden jährlich 84.000 m³ Wasser behandelt. Bei den Sandfiltern wird aufgrund der Rückspülfunktion nur 7670 h effektive Betriebszeit angenommen, daraus resultieren 76.700 m³ behandeltes Wasser pro Jahr. Der jährliche Kostenaufwand wird durch den Gesamtdurchfluss dividiert, so dass ein Kosten-Nutzwert generiert wird. In der Abbildung 15 ist zu erkennen, dass die Kosten für einen Kubikmeter Wasser bei der *BodenpassageTA* mit 8 Cent am niedrigsten sind. Danach folgt die *SandfilterTA*

mit 11 Cent und zuletzt die *MembranfilterTA* mit 22 Cent pro Kubikmeter. Diese Kosten basieren auf einem Strompreis von 20 Cent pro kWh. In Abbildung 15 ist der Energieverbrauch der Anlagen pro Kubikmeter Wasser dargestellt. Die Verbräuche der verwendeten Aggregate werden addiert und durch den Gesamtdurchfluss dividiert. Daraus resultiert der Aufwand-Nutzwert von verbrauchten Kilowattstunden pro Kubikmeter aufbereitetes Wasser. Der Energieverbrauch ist in dem Kostenaufwand mit enthalten. Der Stromverbrauch pro m³ Wasser der *MembranfilterTA* ist mehr als fünf Mal größer als von der *BodenpassageTA* und der *SandfilterTA*.

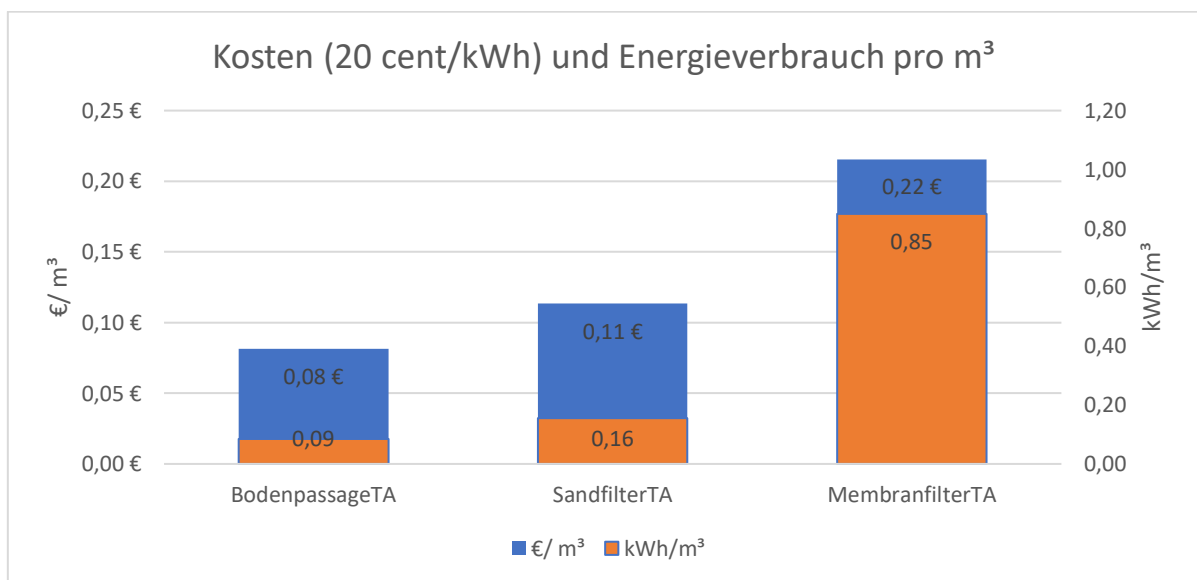


Abbildung 15: Kosten und Energieverbrauch pro m³ behandeltem Wasser

Der Einfluss des Strompreises, der je nach Land und Gesamtmenge unterschiedlich hoch ist, wird in Abbildung 16 für die ausgelegten Technischen Anlagen dargestellt. Je steiler der Verlauf der Kennlinien, desto größer ist der Einfluss der Stromkosten auf die Kosten pro m³ behandeltem Abwasser. Die Abbildung 16 macht deutlich, dass die Kosten der Membranfiltervariante die höchsten Abhängigkeiten durch den Strompreis haben.

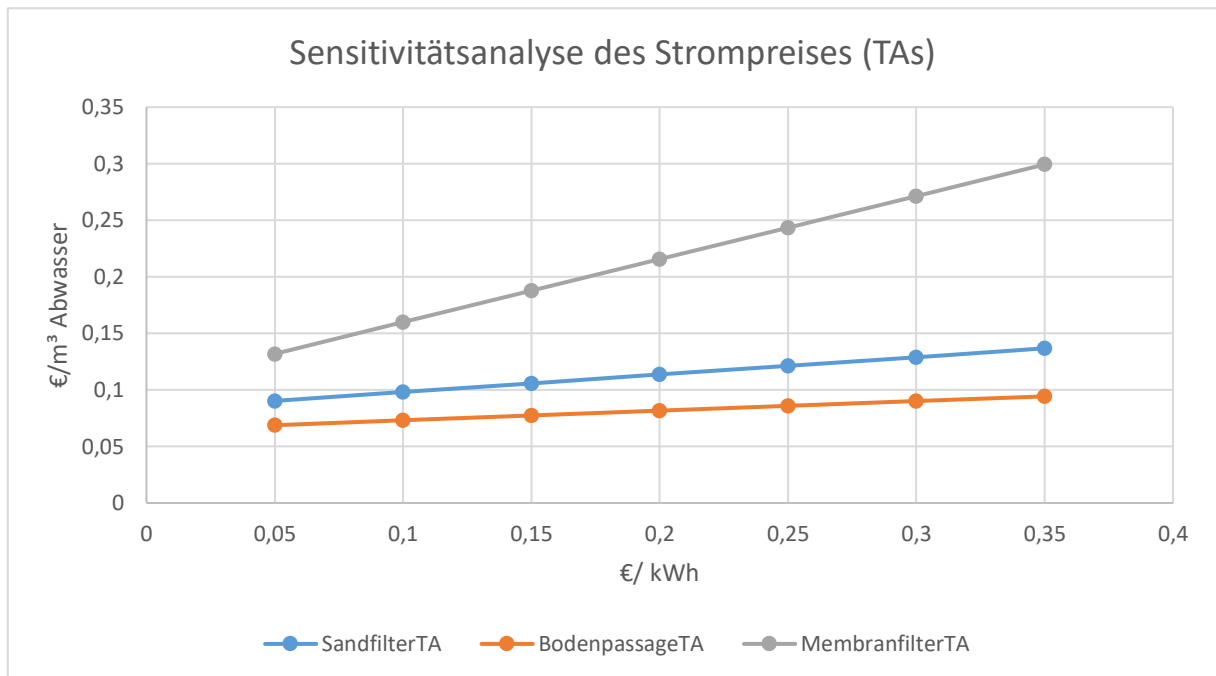


Abbildung 16: Auswirkungen des Strompreises auf die Kosten/m³ (TA)

Einige Faktoren der entwickelten Verfahren können nicht in die betriebswirtschaftliche Betrachtung mit eingezogen werden. Aufgrund ihrer Bedeutung für eine Bewertung werden diese als zusätzliche Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren in der Tabelle 11 aufgeführt. Alle Leistungen, die die vorausgesetzten Anforderungen zur Auslegung der Verfahren übersteigen, werden aufgeführt.

Tabelle 11: Vor- und Nachteile der vorgestellten Verfahren

	Vorteile	Nachteile
BodenpassageTA (+ LED-UV)	<ul style="list-style-type: none"> - einfache Bedienbarkeit - zusätzlicher biologischer Abbau von gelösten Nährstoffen - geringer Betriebsdruck - einfacher Aufbau - naturnahes Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher manueller Reinigungsaufwand - hoher Platzbedarf
SandfilterTA (+LED-UV)	<ul style="list-style-type: none"> - automatisierte Rückspülfunktion - kompakter als <i>BodenpassageTA</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - leistungsstarke Aggregate für Rückspülung erforderlich
MembranfilterTA	<ul style="list-style-type: none"> - filtert Feststoffe und entkeimt das Wasser in einem Verfahrensschritt - sehr kompaktes Verfahren - kommt ohne zusätzliches Becken aus - wirkungsvoll gegen Mikroplastik 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Betriebsdruck - Einsatz von chemischen Reinigungsmitteln - technisch aufwendig

5.1.2 Vergleich der UV-LED, UV-Strahler, Ozonung und Chlorung

In dem zweiten Vergleich wird die verwendete LED-UV-Entkeimung mit den bewährten Verfahren der UV-Entkeimung mit Niederdruckstrahler, der Ozonung und der Chlorung verglichen. Das Ziel der Verfahren für den Vergleich ist die Reduzierung der Keime um mindestens 3 Zehnerpotenzen von 10 m³ Wasser pro Stunde.

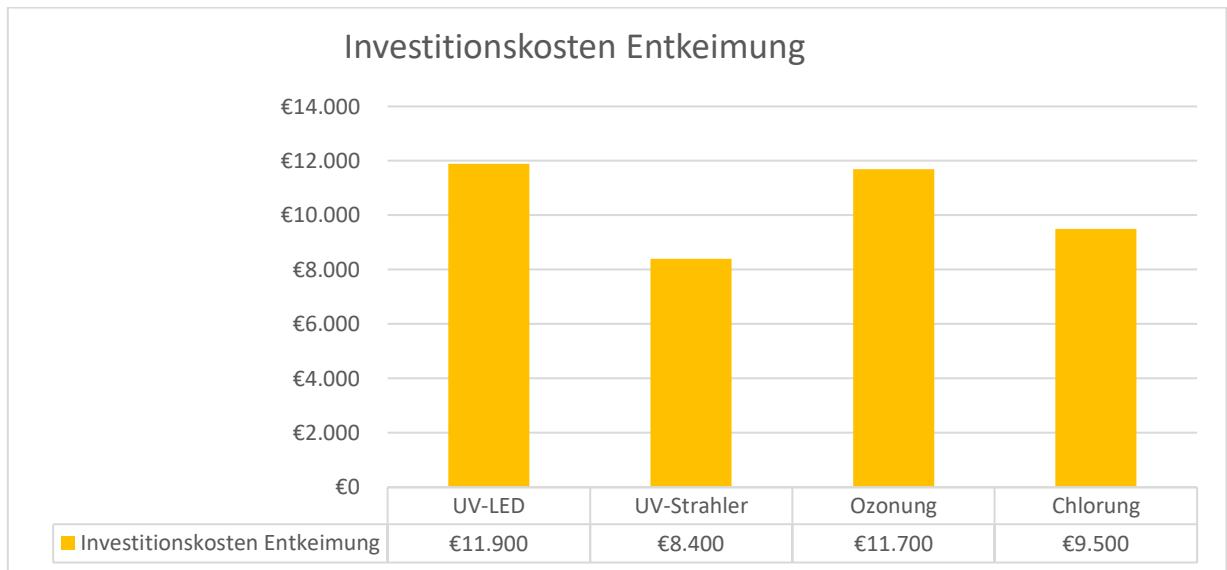


Abbildung 17: Investitionskosten der Entkeimungsverfahren

Analog zum ersten Vergleich werden zunächst die Investitionskosten der Entkeimungsverfahren in Abbildung 17 aufgeführt. Hier ist der Vorteil auf der Seite des konventionellen UV-Niederdruckstrahlers, gefolgt von der Chlorung und der Ozonung. Die UV-LED-Technik erfordert die höchsten Anschaffungskosten.

Die Betrachtung der jährlichen Kosten (Abbildung 18) zeigt, dass die Kosten des UV-LED-Entkeimungsverfahrens und des UV-Strahler-Verfahrens sehr ähnlich sind. Bei der Betrachtung der Betriebskosten (genaue Aufschlüsselung im Anhang) wird deutlich, dass sich die höheren Ersatzteilkosten des UV-LED-Verfahrens mit den höheren Energiekosten ausgleichen. Der Personalaufwand ist bei den komplexeren Verfahren und aus Gründen der Arbeitssicherheit deutlich höher als bei den UV-Verfahren. Die sehr hohen Betriebskosten der Chlorung sind auf den hohen Chemikalienverbrauch zur Chlordioxidherstellung zurückzuführen. Diese machen 67% der jährlichen Kosten aus.

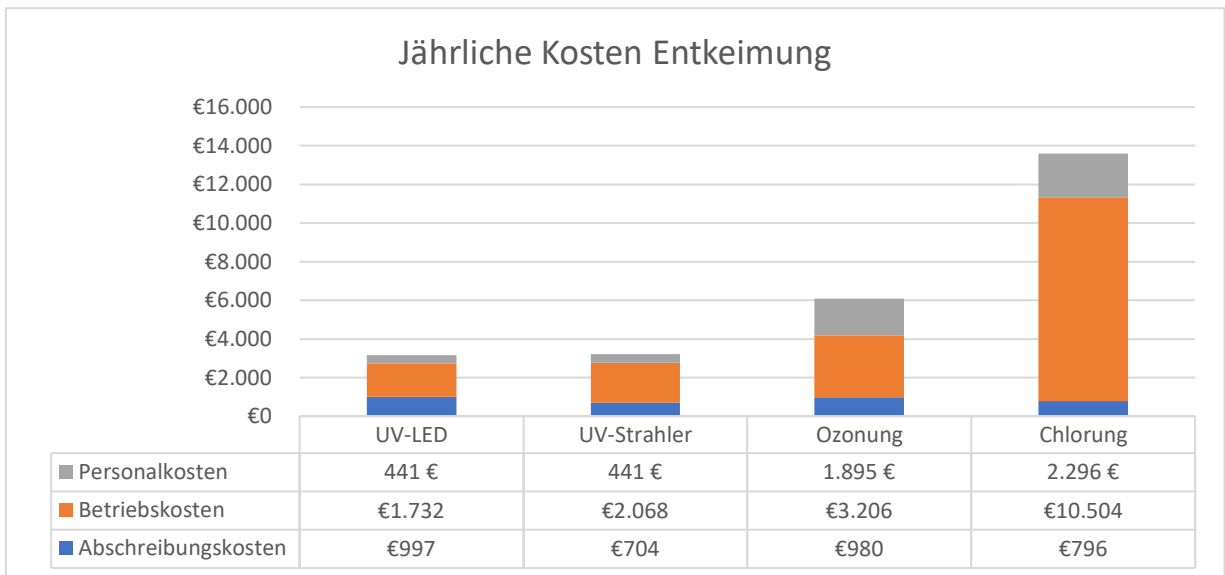


Abbildung 18: Jährliche Kosten der Entkeimungsverfahren inkl. Abschreibung der Investitionskosten

Für die alternativen Entkeimungsverfahren wird wie im ersten Vergleich der Kosten- und Aufwand-Nutzwert berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 dargestellt. Mit jeweils 4 Cent pro Kubikmeter Wasser haben die beiden UV-Verfahren den geringsten finanziellen Aufwand. Der elektrische Verbrauch der LEDs ist jedoch im Vergleich zu den Niederdruckstrahlern geringer. Das Ozonung- und vor allem das Chlorungsverfahren haben deutlich höhere spezifische Kosten, was wiederum auf die höheren Betriebs- und Personalkosten zurückzuführen ist.

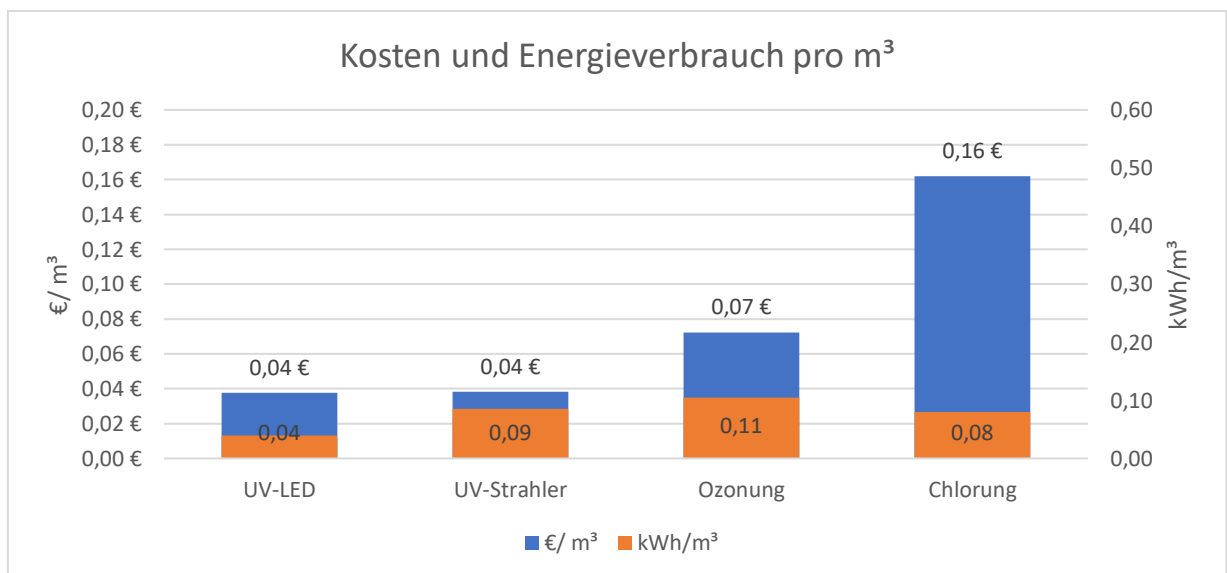


Abbildung 19: Kosten und Energieverbrauch pro m³ behandeltem Wasser (Entkeimung)

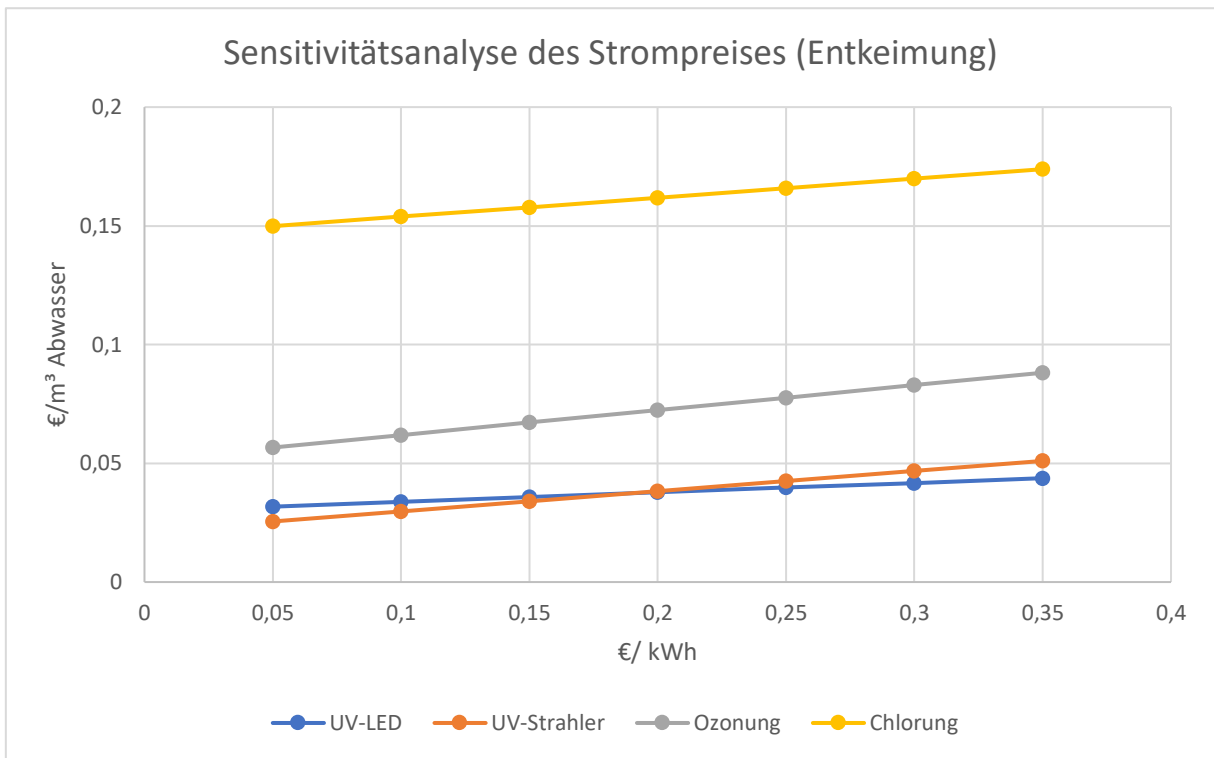


Abbildung 20: Auswirkungen des Strompreises auf die Kosten/m³ (Entkeimung)

Die Kennlinien in Abbildung 20 verlaufen alle mit einer ähnlichen Steigung. Dies verdeutlicht das gleiche Niveau der Stromkosten pro m³ (vergleiche Abbildung 19) und den Einfluss bei verschiedenen Preisen pro kWh auf die Gesamtkosten. Die Steigung des UV-Strahlers ist geringfügig größer als die der UV-LEDs. Dadurch übersteigt der Preis pro m³ Abwasser des UV-Strahler-Verfahrens den des UV-LED-Verfahrens bei einem Strompreis von ca. 18 Cent. Ab 18 Cent pro verbrauchte Kilowattstunde wird das UV-LED-Verfahren am wirtschaftlichsten.

Die Tabelle 12 führt die Vor- und Nachteile der Erfahrungen sowie der Recherche der verschiedenen Entkeimungsverfahren dar. Die Auswahl der aufgelisteten Punkte basiert auf denselben Kriterien wie bei Tabelle 11 im ersten Vergleich.

Tabelle 12: Vor- und Nachteile der alternativen Entkeimungsverfahren

	Vorteile	Nachteile
LED-UV	<ul style="list-style-type: none"> - gleiche Lebensdauer wie Niederdruckstrahler - weiter steigende Effizienz der LEDs - geringe Versorgungsspannung (12 V möglich) - geringe Oxidationswirkung - monochromes Licht für gezielte Entkeimung 	<ul style="list-style-type: none"> - geringere Strahlungsleistung als Niederdruckstrahler - hohe Anzahl von LEDs notwendig - Wasser sollte für Entkeimung feststofffrei sein - teurer als Niederdruckstrahler
Niederdruckstrahler-UV	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Strahlungsleistung - Wellenlänge liegt näher am Adsorptionsmaximum - geringe Oxidationswirkung - monochromes Licht für gezielte Entkeimung 	<ul style="list-style-type: none"> - meist in einem Rohrreaktor verbaut - Versorgungsspannung (230/ 400 V) - kann Quecksilber enthalten - Wasser sollte für Entkeimung feststofffrei sein
Ozonung	<ul style="list-style-type: none"> - oxidiert sehr gut anthropogene Spuren- und Schadstoffe wie Medikamente und Kohlenwasserstoffverbindungen - Wasser muss zur Entkeimung nicht feststofffrei sein 	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhte Anforderung an Arbeitssicherheit - komplexere Betriebsführung - hohe Betriebsspannung erforderlich - überschüssiges Ozon muss entfernt werden - mäßige Bildung von DNP
Chlorung	<ul style="list-style-type: none"> - bewährtes Verfahren zur Entkeimung - beugt einer Wiederverkeimung vor - oxidiert anthropogene Spuren- und Schadstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhte Anforderungen an Arbeitssicherheit - Einsatz von Chemikalien - Bildung von DNP - Spuren von Restchlor im Wasser

5.1.3 Kombiniertes Vergleich der technischen Anlagen

Die Kombination der Technischen Anlagen mit alternativen Verfahren dient der abschließenden Gegenüberstellung aller beschriebener Verfahren. Dafür werden die *BodenpassageTA* und die *SandfilterTA* von der Kombination mit der UV-LED aus dem ersten Vergleich separiert betrachtet und mit den anderen drei Entkeimungsverfahren kombiniert. Sowohl die *BodenpassageTA* als auch die *SandfilterTA* stehen somit im Folgenden nur für ihre Feststoffretention. Dagegen bildet die *MembranfilterTA* einen Sonderfall, da aufgrund der enthaltenen Entkeimungswirkung keine andere

Kombination notwendig und sinnvoll wäre. Die Kosten pro behandeltem m³ Wasser, die aus den Neukombinationen resultieren werden in der Tabelle 13 und in Tabelle 14 aufgeführt. Demnach bilden die *BodenpassageTA* und *SandfilterTA* mit den jeweiligen UV-Verfahren sowie die *BodenpassageTA* mit der Ozonung die günstigsten Kombinationen.

Tabelle 13: Verfahrenskombination Kosten/ m³

€/ m ³	UV-LED	UV-Strahler	Ozonung	Chlorung	Membranfilter
<i>BodenpassageTA</i>	0,08 €	0,08 €	0,12 €	0,21 €	-
<i>SandfilterTA</i>	0,11 €	0,11 €	0,15 €	0,24 €	-
<i>MembranfilterTA</i>	-	-	-	-	0,22 €

Tabelle 14:Verfahrenskombination Kosten/ Jahr

€/ Jahr	UV-LED	UV-Strahler	Ozonung	Chlorung	Membranfilter
<i>BodenpassageTA</i>	6.844 €	6.887 €	9.755 €	17.270 €	-
<i>SandfilterTA</i>	9.533 €	9.576 €	12.444 €	19.959 €	-
<i>MembranfilterTA</i>	-	-	-	-	18.108 €

5.2 Optimierungs- und Einsatzmöglichkeiten der *BodenpassageTA*

5.2.1 Optimierung der *BodenpassageTA*

Der abschließende Vergleich der möglichen Verfahrenskombinationen zeigt auf, dass die Kombination der *BodenpassageTA* mit den UV-Entkeimungen wirtschaftlich am vorteilhaftesten ist. Dennoch haben die nicht-wirtschaftlichen Vor- und Nachteile gezeigt, dass die anderen Verfahren Eigenschaften haben, die für den Vergleich nicht hinreichend waren, jedoch andere Mehrwerte für bestimmte Anforderungen aufweisen. Der Verzicht auf den Einsatz von Betriebschemikalien wie bei der Chlorung ist bei einer simplen Anlagenführung, die nicht durch Fachpersonal durchgeführt werden muss, erstrebenswert.

Daraus stellt sich dennoch die Frage nach weiteren Optimierungsmöglichkeiten der *BodenpassageTA*. Die Anlage könnte durch jede Art von Verfahrensstufe erweitert werden, jedoch soll die Komplexität und die ursprüngliche Dimensionierung möglichst unverändert bleiben, um eine einfache Betriebsweise weiterhin zu gewährleisten.

Dabei muss jedoch weiterhin das regelmäßige Zusetzen der Filter beobachtet werden. Mit der Verwendung von Wasser mit einem geringeren Feststoffgehalt könnten längere Laufzeiten ohne Wartungsarbeiten erzielt werden. Eine regelmäßige Betriebsführung und Überwachung der Anlage (mind. 2x pro Woche) sollten dennoch eingehalten werden.

Ein Vorteil der Ozonung und Chlorung ist die Reduzierung von zusätzlichen anthropogenen Spurenstoffen. Dies geschieht durch die Oxidation der entsprechenden Wasserinhaltsstoffe, wobei jedoch ungewollte Metabolite zurückbleiben. Durch die Adsorptionsvorgänge in den Kiesfiltern kommt es ebenfalls zu einer Reduktion dieser Stoffe, allerdings nicht in der Größenordnung der Oxidationsverfahren. Ein Ansatz zur Optimierung dieser Reinigungseigenschaft der Bodenpassage wäre die zusätzliche Verwendung von Aktivkohle. Diese würde als granuliert Aktivkohle (GAK) als separate Schicht oder mit dem Kies vermischt in die bestehenden Filter gegeben. Dadurch würden die hohen Adsorptionskräfte und die große Oberfläche der Aktivkohle die Reinigungsleistung zusätzlich verbessern. Allerdings stehen dieser Ergänzung zusätzliche Investitionskosten gegenüber. Die Aktivkohle muss nach längeren Laufzeiten wieder entnommen und regeneriert werden, da die Adsorptionsleistung mit der Zeit abnimmt. Der Mehrwert der Aktivkohle ist daher je nach Eigenschaft des zulaufenden Wassers und den Anforderungen an das behandelte Wasser individuell zu betrachten. Des Weiteren könnte die Oberflächenbeschickung der Bodenpassage von den untersuchten 70-300 Liter pro Quadratmeter und Stunde verringert werden. Daraus würden eine längere Aufenthaltszeit in den Filtern und eine bessere Retentionsleistung der Wasserinhaltsstoffe resultieren. Dieses ist jedoch mit einem erhöhten Flächenbedarf der *BodenpassageTA*, mit einer größeren Anlage und gegebenenfalls mit höheren Investitionskosten verbunden.

Der mikrobielle Abbau der gelösten Frachten würde durch eine Optimierung des verwendeten Belüftungssystems in den Kiesfiltern verbessert werden. Der Luftvolumenstrom könnte erhöht werden, dabei darf der Filtrationsprozess jedoch nicht beeinträchtigt werden. Zudem könnte die Positionierung der perforierten Schläuche, die die Luft in das Filtermedium leiten, verbessert werden, um eine gleichmäßigere Verteilung des Sauerstoffs im Filter zu erreichen.

Es wird erwartet, dass die Strahlungsleistung und die Effizienz der LEDs in den kommenden Jahren zunehmen. Die in den Versuchsanlagen verbauten LEDs hatten

noch einen Wirkungsgrad von ca. 1%. Aktuell gibt es bereits UV-LEDs mit einem Wirkungsgrad von bis zu 8%. Es ist zu erwarten, dass dieser Wert in den kommenden Jahren weiter ansteigt, die Entkeimungsleistung steigt und der Energieverbrauch weiter sinkt. Der derzeitige Preis ist aufgrund der hohen Nachfrage für entkeimende UV-Strahlen durch die vorherrschende Covid-19 Pandemie entsprechend hoch. Sobald sich die Nachfrage legt beziehungsweise die Produktion die Nachfrage abdecken kann, ist mit einer Vergünstigung der Technologie zu rechnen (Heßling, 2021).

5.2.2 Einsatzmöglichkeit der *BodenpassageTA*

Die Einsatzmöglichkeiten der *BodenpassageTA* sind abhängig von ihrer Reinigungsleistung und der gesetzten Anforderungen der Wasserqualität, die für bestimmte Einsatzmöglichkeiten der Wiederverwendung eingehalten werden müssen. Für eine nicht gesundheitsgefährdende Wiederverwendung für den Menschen sind vor allen Dingen die Koloniebildenden Einheiten und die Konzentration an Nährstoffen zu betrachten. Die Gesetze, Normen und Richtlinien enthalten zumeist weitere Grenzwerte für Wasserinhaltsstoffe, diese wurden im ursprünglichen Rahmen zur Untersuchung der *BodenpassageVA* jedoch (noch) nicht untersucht. Der Rückhalt von Medikamenten, Mikroplastik und weiteren anthropogenen Spurenstoffe blieben bei den Untersuchungen bislang unberücksichtigt.




Für eine Einschätzung der Ergebnisse und einen Ausblick für mögliche Anwendungen sind in Tabelle 15 die Ergebnisse der *BodenpassageVA* und die Grenzwerte für diverse Anwendungsmöglichkeiten von aufbereitetem Abwasser aufgeführt. Die Grenzwerte beziehen sich hierbei auf europäische und deutsche Richtlinien. Die grün markierten Zellen zeigen, dass die Werte der *BodenpassageVA* den gesetzlichen Anforderungen der jeweiligen Anwendung genügen. Die roten Zellen symbolisieren die Überschreitung der Grenzwerte. Abschließend wird die Eignung der *BodenpassageVA* für die Anwendungsbereiche ebenfalls mit rot und grün dargestellt. Am häufigsten ist der Ammonium-Wert für die Anwendungen zu hoch (4 Mal). Dahinter folgen die Koloniebildenden Einheiten (3 Mal) und der CSB-Wert (2 Mal).

Nach den betrachteten Grenzwerten der Tabelle 15 sind die folgenden Verwendungszwecke erlaubt: Garten- und Parkbewässerung, landwirtschaftliche Bewässerung der Güteklasse B und die Nutzung als Badewasser mit ausgezeichnete

Qualität. Durch die beschriebene Optimierung der Belüftung in den Biofiltern und der UV-LEDs würden weitere Anwendungsmöglichkeiten erschlossen werden.

Tabelle 15: Grenzwerte für Anwendungen zur Wasserwiederverwendung

Grenzwerte

nicht angegeben:  erfüllt:  nicht erfüllt: 

Parameter	Keime (E. Coli)	BSB5	CSB	O ₂	AFS	NH ₄ ⁺	P _{ges}	N _{ges}	Eignung des Wassers	Quelle
Einheit	KBE/ 100 ml	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		
Ergebnis <i>BodenpassageVA</i>	20	< 15	15	5	3	3	0,3	10		
Anwendung:										
indirekte Grundwasseranreicherung	10.000	-	100	> 8	-	0,2	-	25		1)
direkte Grundwasseranreicherung	0	-	5	-	-	0,5	-	25		1)
Kühlwasser	-	-	70	> 3	10	1,5	0,2	10		2)
Garten- und Parkbewässerung	-	20	100	> 0,5	10	10	5	20		2)
Anforderung kommunales Abwasser Einleitung Größenklasse 5	-	15	75	-	-	10	2	13		3)
Trinkwasser	0	-	5	-	-	0,5	-	-		1)
Bewässerung Güteklasse A	10	10	-	-	10	-	-	-		4)
Bewässerung Güteklasse B	100	15	-	-	-	-	-	-		4)
Badegewässerqualität Ausgezeichnete Qualität	250	-	-	-	-	-	-	-		5)

- 1) (Bixio, et al., 2006)
- 2) (Salgot, et al., 2006)
- 3) (AbwV, 2020)
- 4) (EU, 2020)
- 5) (EU, 2006)

Der Vergleich mit den mitteleuropäischen Normen soll die erreichte Wasserqualität einstufen und eine Einschätzung des daraus resultierenden Risikos für Gesundheit und Umwelt geben. Die TIA GmbH plant die *BodenpassageTA* in Schwellen- und Entwicklungsländern einzusetzen. Eindeutige Grenzwerte sind dort für die jeweiligen Anwendungszwecke nicht zwangsläufig gegeben. Daher ist ein exakter Nutzen der Anlage in diesen Ländern nicht eindeutig vorherzusagen. Dennoch wird durch den Einsatz der zusätzlichen Wasseraufbereitung die Wasserqualität deutlich verbessert,

sodass eine Gefährdung für Menschen, Tiere und Umwelt durch das Wasser für Bewässerungszwecke zuverlässig reduziert werden kann.

Des Weiteren ist die Reinigungsleistung auch stark von dem verwendeten Wasser und dessen Ausgangskonzentrationen abhängig. Bislang wurde nur das Ablaufwasser einer Kommunalen Abwasseraufbereitungsanlage durch die BodenpassageVA behandelt. Weitere Untersuchungen und Messungen mit der Beschickung durch Oberflächenwasser könnten weitere Aufschlüsse der Anwendungszwecke geben.

6 Fazit

Durch den Langzeitversuch und den Vergleich mit den alternativen Verfahren wurde gezeigt, dass sowohl der Betrieb als auch die verwendete Technik der *BodenpassageTA* für einen Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern geeignet sind. Allerdings muss die Anwendung bislang hauptsächlich auf die städtische und landwirtschaftliche Bewässerung beschränkt werden. Für die Trinkwasseraufbereitung reicht weder die verwendete Technik noch die durchgeführten Messungen, um sicheres Trinkwasser nach europäischen Standards zu generieren. Die Beschaffung der benötigten Teile und Materialien ist aufgrund der Einfachheit dieser Komponenten leicht zu realisieren. Für die Bedienbarkeit der *BodenpassageTA* muss kein ausgeprägtes Knowhow vorausgesetzt werden. Durch die Langzeitversuche konnten erste Aussagen zur Verfahrensstabilität des Verfahrens erbracht werden. Die Möglichkeiten der Optimierungen sollten darauf basierend in einem größeren Maßstab weiter validiert werden.

Für einen gezielten Einsatz müssen weitere Parameter und Wasserinhaltsstoffe des behandelten Abwassers betrachtet werden. Für viele Anwendungen kann daher noch keine Eignung des Wassers aus der *BodenpassageTA* bestätigt werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden weitere Untersuchungen zur Oxidation von Arzneimitteln durch die UV-LEDs seitens der TH Ulm aufgrund der Covid-19 Pandemie bis auf weiteres nicht mehr durchgeführt (Heßling, 2021). Die gemessenen Werte sollten zudem durch ein unabhängiges Labor bestätigt werden. Dennoch zeigen die gemessenen Resultate, dass mit der betriebswirtschaftlich günstigen und sparsamen *BodenpassageTA* die weitere Aufbereitung des Wassers für viele Wiederverwendungszwecke sinnvoll ist. Besonders in den wasserarmen Regionen der

Welt ist mit einem großen Bedarf an einem simplen Aufbereitungsverfahren zu rechnen. Dort könnte das Verfahren nach den erzielten Reinigungsleistung jetzt schon für sichere Bewässerungszwecke genutzt werden. Weitere Anwendungen, die der Hygiene und Ernährung der Menschen dienen, können noch nicht mit abschließender Sicherheit gewährleistet werden. Die steigenden Anforderungen und benötigten Mengen von Brauchwasser mit hohen Qualitätsmerkmalen verlangen immer mehr nach zuverlässigen Anlagenkonzepten. Die stetige Weiterentwicklung der LEDs macht den Einsatz der *BodenpassageTA* in Zukunft durch längere Laufzeiten und einen verringerten Stromverbrauch zusätzlich interessant. Dadurch werden die ohnehin vorteilhaften betriebswirtschaftlichen Faktoren und die Entkeimungsleistung weiter verstärkt.

Literaturverzeichnis

AbwV, 2020. *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer*, Berlin: Bundestag.

ATV, 1995. *ATV-A 203 Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung*. Hennef: Abwassertechnischen Vereinigung e.V..

ATV, 1998. *ATV-M 205 Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser*. Hennef: Abwassertechnische Vereinigung e.V..

Bixio, D. et al., 2006. *Wastewater reuse in Europe*, s.l.: Desalination 187.

Blumberg, M., Hübner, G. & Küppers, H., 1994. *Versickerung von mechanisch-biologisch gereinigten Abwässern - Eine Alternative für den ländlichen Raum*, Neu Eichenberg: Ingenieurbüro Blumberg.

Breitkopf, A., 2020. *Strompreise privater Haushalte in ausgewählten Ländern weltweit im Jahr 2020*. [Online]

Available at: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13020/umfrage/strompreise-in-ausgewaehlten-laendern/>

[Zugriff am 17 April 2021].

Brunner, P., 2002. *Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem*, Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

Brunsch, A. et al., 2020. Retentionsbodenfilter zur Entfernung von Mikroschadstoffen aus Mischwasserabschlägen und Kläranlagenablauf. *KA- Korrespondenz Abwasser, Abfall* , pp. 780-788.

Collivigbarelli, M. C. & al., e., 2017. Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants. *Sustainability*, Dezember, pp. 2-15.

Crook, J., 2009. Water Reclamation. In: Meyers, Hrsg. *Encyclopedia of physical science and technology*. San Diego: Academic press, pp. 559-589.

DIN 16323, 2014. *DIN EN 16323: Wörterbuch für Begriffe der Abwassertechnik*, Berlin: Beuth Verlag.

DWA , 2006. *DWA-A 262 Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..

- DWA, 2009. *Abwasserbehandlung*. 3 Hrsg. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..
- DWA, 2013. *DWA-M 205 Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..
- EU, 1991. *Richtlinie des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (91/271/EWG)*, Brüssel: EU.
- EU, 2006. *Richtlinie 2006/7/EG über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung*. Brüssel, EU.
- EU, 2020. *Verordnung 2020/741 über die Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung*. Brüssel, EU.
- Förstner, U. & Köster, S., 2018. *Umweltschutztechnik*. 9. Hrsg. Berlin: Springer-Verlag.
- Haaken, D., 2014. *Innovative Desinfektionsverfahren zur Brauchwassergewinnung in der dezentralen Abwasserbehandlung - Elektrolyse und UV/Elektrolyse-Hybridtechnik*, Dresden: Technische Universität Dresden.
- Heßling, M., 2021. *Informationen zum Stand der UV-LED-Entkeimung* [Interview] (1 April 2021).
- Heßling, M. & Sift, M., 2014. Wasser-Desinfektion mit UV-LEDs - Kleine Systeme mit großer Zukunft. *GIT Labor-Fachzeitschrift*, Issue 6, pp. 36-38.
- Hippelein, D., 2021. *Anfrage wegen Vergleichbarkeit der Einheiten KbE - MPN* [Interview] (14 April 2021).
- hydrophil wassertechnik gmbh, 2021. *Was ist Chlordioxid?*. [Online] Available at: <https://www.hydrophil-wassertechnik.de/produkte/chlordioxidanlagen/> [Zugriff am 12 März 2021].
- Illian, J., 2010. *Biofiltration und elektrochemische Behandlung zur Brauchwassererzeugung aus Kleinkläranlagenabläufen*, Cottbus: Technische Universität Cottbus.
- Jekel, M. et al., 2006. *Weitergehende Entfernung organischer Stoffe aus kommunalen Abwässern und deren Eignung zur Grundwasseranreicherung - Abschlussbericht*, Berlin: Technische Universität Berlin.
- Kunz, P. M., 1995. *Behandlung von Abwasser*. Würzburg: Vogel Verlag.

Müller, K. et al., 2009. Desinfektion von biologisch gereinigten Abwasser. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*.

R-Biopharm AG, 2016. *Keimzahlbestimmung: So gelingt die mikrobiologische Analyse*. [Online]

Available at: <https://food.r-biopharm.com/de/news/keimzahlbestimmung-gelingt-die-mikrobiologische-analyse/>

[Zugriff am 13 März 2021].

Reischert, S., 2011. *Betrachtung einer Kombination aus Rieselstrom-Bioreaktor-Verfahren und Membranfiltration zur weitergehenden Abwasserbehandlung*, Mittweida: Hochschule Mittweida.

Salgot, M. et al., 2006. *Wastewater reuse and risks: definition of key objectives*, s.l.: Desalination 187.

Schneider, K., 2020. *Deutsche zahlen weltweit den höchsten Strompreis*. [Online]

Available at: <https://wohnglueck.de/artikel/deutschland-hoechste-strompreise-45980>

[Zugriff am 17 April 2021].

Schulte-Ebbert, U., 2004. *Wasseraufbereitung – Grundlagen und Verfahren*. München: Oldenbourg Industrieverlag.

TH Ulm, 2019. *Betriebsanleitung: UV-Desinfektionseinheit mit Rinne*. Ulm: Technische Hochschule Ulm.

TIA GmbH, 2020. *Bericht zur Bodenpassage*, Breitenfelde: TIA GmbH.

TIA GmbH, 2020. *Wiederverwendung "ReUse" von gereinigtem Abwasser*. [Online]

Available at: <https://tia-abwasser.de/2020/09/30/wiederverwendung-reuse-von-gereinigtem-abwasser/>

[Zugriff am 27 März 2021].

Tiraferri, A., 2014. *LCSC - Membrane-based water treatment to increase water supply*.

[Online]

Available at: <http://www.colloid.ch/index.php?name=membranes>

[Zugriff am 17 April 2021].

Umweltbundesamt, 2020. *Neue EU-Verordnung zu Wasserwiederverwendung*.

[Online]

Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasser->

[bewirtschaften/wasserwiederverwendung/neue-eu-verordnung-zu-wasserwiederverwendung#undefined](#)

[Zugriff am 26 Februar 2021].

UNESCO, 2021. *UN-Weltwasserbericht 2021: Der Wert von Wasser*. [Online] Available at: <https://www.unesco.de/kultur-und-natur/wasser-und-ozeane/un-weltwasserbericht-2021>

[Zugriff am 27 März 2021].

VDMA, 2010. *VDMA 24651 - Verfahren zur Wasserverwendung Auswahlkriterien, Einsatzbereiche*. Berlin, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V..

Verbraucherschutz, B. d. J. u., 2020. *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV)*. [Online] Available at: https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2001/BJNR095910001.html

[Zugriff am 3 März 2021].

WavE, 2016. *Zukunftsfähige Technologien und Konzepte zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Wasserwiederverwendung und Entsalzung*, Frankfurt a. M.: DECHEMA e.V..

Wüpper, J., 2017. *Optimierung der biologischen Abwasserbehandlung eines Offshore Windparks einschließlich Desinfektionsstufe und Erweiterung zur Phosphorelimination*, Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg).

wvgw, 2015. *W 225 Arbeitsblatt - Ozon in der Trinkwasseraufbereitung*. 2. Hrsg. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.

Ziegler, D. H., 2001. *Untersuchungen zur nachhaltigen Wirkung der Uferfiltration im Wasserkreislauf Berlins*, Berlin: Technische Universität.

Zühlke, K., 2014. *Membranverfahren*. [Online] Available at: <http://trinkwasserspezi.de/html/membranverfahren.html>

[Zugriff am 7 März 2021].

Eidesstattliche Erklärung

Verfasst von: Mannes, Sebastian Jürgen Alexander

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem o.a. formulierten Thema ohne fremde Hilfe und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommen Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, den 20.04.2021

Ort, Datum

Unterschrift

Anhang

Abwasser	<p>„Wasser, bestehend aus jeglicher Kombination von abgeleitetem Wasser aus Haushalten, Industrie- und Gewerbebetrieben, Oberflächenabfluss und unbeaufsichtigtem Fremdwasserzufluss“ Quelle: DIN EN 1085</p> <p>„Abwasser ist das durch Gebrauch verunreinigte Wasser, welches unbehandelt zu keinem Verwendungszweck mehr genutzt werden kann.“ (VDMA, 2010)</p>
Abwasseranfall	Zeitlich bezogene Abwassermenge eines Einwohners, einer Gemeinde oder eines Betriebes, in Volumeneinheit je Zeiteinheit (zum Beispiel l/s, m ³ /h) angegeben
Abwasserart	<p>Abwasser wird entsprechend seiner Herkunft unterschieden in:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Häusliches Schmutzwasser - Industrielles und gewerbliches Abwasser - Kühlwasser <p>Hinsichtlich der Einteilung in Teilströme (Sanitärkonzepte) unterscheidet man in:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grauwasser - Gelbwasser - Braunwasser - Schwarzwasser
Abwasserbehandlung	Gezielte Veränderung der Abwasserbeschaffenheit durch zum Beispiel Reinigung, Kühlung, Neutralisation
Abwasserentsorgung/ -wiederverwendung	<p>Im allgemeinen Sinne die Rückführung des Abwassers in den natürlichen Wasserkreislauf; Verfahrensmöglichkeiten:</p> <p>Einleitung in einen Vorfluter (oberirdische Gewässer wie Bach, Fluss oder See)</p> <p>Einleitung in ein kommunales Entwässerungssystem</p> <p>Landwirtschaftliche Abwasserverwertung</p> <p>Versickern oder Versenkung</p> <p>Eindampfen oder Verbrennen</p> <p>Brauchwasser</p>

Adsorption	Anlagerung von Gasen oder gelösten Stoffen an der Oberfläche fester Stoffe (Adsorbens, Adsorptionsmittel). Durch Adsorption lassen sich Schadstoffe aus Abgasen oder Flüssigkeiten entfernen.
aerob	Sauerstoffbedürftig oder -haltig (bezogen auf Organismen, chemische Reaktionen)
Aerober Abbau	Abbau durch Mikroorganismen unter Verbrauch von Sauerstoff. Dieser ist für Atmung der Bakterien und die chemische Reaktion notwendig. In kommunalen und industriellen Kläranlagen sorgen Belüftungsaggregate für den Sauerstoffeintrag.
anaerob	Fehlen von molekularem Sauerstoff
Anaerober Abbau	Abbau von Stoffen unter anaeroben Bedingungen (weder gelöster noch gebundener Sauerstoff vorhanden). Zum Beispiel die Faulung zur Stabilisierung des Klärschlammes.
anoxisch	Kein elementarer, aber dafür chemisch gebundener Sauerstoff (zum Beispiel Nitrit, Nitrat oder Sulfat) vorhanden
anthropogen	durch menschliche Einwirkung hervorgerufen
Anthropogene Spurenstoffe	durch den Menschen verursachte Stoffe in der Umwelt; Sammelbegriff für Medikamente, Mikroplastik, Pflanzenschutzmittel, Biozide, PAKs etc.
Belebtschlamm	Aus ein- und mehrzelligen Kleinlebewesen (Bakterien, Pilze, etc.) bestehender Schlamm im Belebungsbecken einer Kläranlage. Diese „Biomasse“ baut die im Abwasser vorhandenen organischen Substanzen für ihren Stoffwechsel ab.
Belüftung	Gasaustausch zwischen Wasser und Luft zum Einbringen von Sauerstoff
Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB)	Ein Maß für die Summe aller biologisch abbaubareren organischen Stoffe im Wasser. Der BSB gibt an wie viel gelöster Sauerstoff in einer bestimmten Zeit für den biologischen Abbau der organischen Abwasserinhaltsstoffe benötigt wird; meist wird er für den Zeitraum von fünf Tagen ermittelt und deshalb BSB ₅ genannt.

Biofilm	„Gefahr der mikrobiellen induzierten Korrosion, Quelle für Keime und damit für mögliche Endotoxin-Bildung, Quelle für hygienisch und/oder gesundheitlich bedenkliche Keime. Indikationen auf einen Biofilm sind: Zunehmende Anzahl koloniebildender Einheiten und/oder Pilze (zum Beispiel Bestimmung mittels Eintauchnährböden; schleimiger Belag auf der Oberfläche, Fäulnisgeruch).“ (VDMA, 2010)
Biologische Abwasserreinigung	Abbau von organischen Inhaltsstoffe durch Mikroorganismen in Verbindung mit gelöstem Sauerstoff (aerob) oder Sauerstoffabschluss (anaerob)
Brauch/-Betriebswasser	„Je nach technischem Verwendungszweck unterscheiden aufbereitetes Rohwasser; kein Trinkwasser.“ (VDMA, 2010)
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	Ein Maß für die Summe aller organischen Stoffe im Wasser, einschließlich der schwer abbaubaren. Der CSB gibt an, wieviel Sauerstoff zur vollständigen Oxidation der organischen Stoffe durch Chemikalien benötigt wird.
Denitrifikation	Reduktion von Nitrat oder Nitrit durch bestimmte Mikroorganismen (Denitrifikanten) unter anoxischen Verhältnissen zu freiem Stickstoff
Filtration	Entfernung von Stoffen aus dem Wasser bei der Passage durch körnige oder poröse Materialien
Flotation	Aufschwimmen von Schwebstoffen in Flüssigkeiten mittels anhaftender Gasbläschen
Häusliches Schmutzwasser	„Im Prinzip ist häusliches Abwasser Grau- und Schmutzwasser, denn aus allen in Küchen-, Waschmaschinen-, Wasch- Toilettenräumen und aus gleichartigen Benutzungsräumen anfallende Abwässer sind nach DIN EN 1085 häusliches Schmutzwasser.“ (VDMA, 2010)
Kohlenwasserstoff (KW)	Organische Verbindungen, bestehend aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Zum Teil biologisch schwer oder nicht abbaubar oder gesundheits- beziehungsweise umweltgefährdend.

Kommunales Abwasser	Schmutzwasser aus Haushalten, Industrie- und Gewerbetrieben
Kreislaufwasser	„Wasser, welches nach Nutzung gesammelt und je nach Belastung und Schmutzfracht so aufbereitet wird, dass es einer erneuten oder weiteren Nutzung zugeführt werden kann. Durch den Einsatz von Kreislaufwasser verringern sich der Rohwasserbedarf und die Abwassermenge.“ (VDMA, 2010)
Kühlwasser	„Brauchwasser, welches ausschließlich zu Kühlzwecken eingesetzt wird.“ (VDMA, 2010)
Mechanische (physikalische) Abwasserreinigung	Trennung von Schmutzstoffen aus dem Abwasser mit Hilfe von Rechen, Sandfang, Absetzbecken und Filtern. Mit Hilfe der Mechanischen Abwasserreinigung können diverse Schmutzstoffe aus dem Wasser entfernt werden
Membranfiltration/-verfahren	Die Membranfiltration ist ein Trennverfahren, das es erlaubt, Teilchen bis in die Größenordnung der Kolloide beziehungsweise bis hin zu gelösten Wasserinhaltsstoffen voneinander zu trennen. Dazu gehören die Mikrofiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose.
Metabolit	Zwischenprodukt in einem chemischen Stoffwechselprozess
Nachklärbecken/ Nachklärung	Absetzbecken zum Abtrennen von Belebtschlamm aus dem Abfluss aus Belebungsbecken
Nährstoff	Gesamtheit für die Ernährung von Organismen notwendigen organischen und anorganischen Stoffe, zum Beispiel C, N, P
Nitrifikation	Oxidation von Ammonium durch Mikroorganismen (Nitrifikanten) zu Nitrit und Nitrat
Oberflächenwasser	„Im Gegensatz zum Grundwasser, Wasser aus natürlichen oder künstlichen oberirdischen Gewässern, zum Beispiel Wasser aus Flüssen, Seen oder Talsperren.“ (VDMA, 2010)
Osmose	Diffusion (Wanderung) des Wassers aus Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen durch eine

	halbdurchlässige Wand (semipermeable Membran). Diese ist undurchlässig für die gelösten Stoffe.
Pathogene Keime	Keime „Gesundheitliche Gefährdungen, u.a. Legionellen, coliforme Keime, Pseudomonaden. Die Bestimmung derartiger Keime ist in Abhängigkeit von der Art der Wiederverwendung und bei Verdacht durch geeignete Labors vornehmen zu lassen.“ (VDMA, 2010)
Prozess- /Produktionswasser	„Brauchwasser, welches zu Produktionszwecken eingesetzt wird, zum Beispiel Waschwasser, Wasser zu Mischzwecken o.ä.“ (VDMA, 2010)
Redox-Potential	Ein Parameter zur Beurteilung des Reduktions- oder Oxidationsvermögens eines Abwassers. Bei der aeroben Atmung dient Sauerstoff (O ₂) als Elektronenakzeptor einer Redoxreaktion. Es ist ein Indikator zur Bestimmung des biologischen Selbstreinigungsvermögens beziehungsweise des Sauerstoffgehalts von Gewässern.
Sanitärwasser	„Wasser, das im Sanitärbereich eingesetzt werden kann, jedoch keine Trinkwasserqualität aufweisen muss.“ (VDMA, 2010)
Sedimentation	Abscheidung von Feststoffen aus dem Wasser durch Schwerkraft
Trinkwasser	„Das für den menschlichen Genuss und Gebrauch geeignete Wasser.“ (VDMA, 2010)
Vorfluter	Gewässer, in das Wasser oder Abwasser eingeleitet wird

Protokoll Messreihe 1.2 (20.01.2020 - 10.02.2020)

Zulauf

Versuchstag (Q)	Temperatur	pH	O2	CSB	P ges	NH4	NO2	NO3	N ges	KBE/ 100ml
1 (150 l/h)	11,6	7,25	4,3	121	4,56	17	0,07	1,3	30	22986
2 (200 l/h)	11	7,25	4,5	47	2,13	11,4	0,018	0,3	7	23779
3 (250 l/h)	11,2	7,19	-	40	2,74	5,3	0,014	0,3	9	25364
4 (300 l/h)	10,9	6,9	3,78	35	1,32	6	0,012	0,4	9	21797

Nach IBC1

Versuchstag (Q)	Temperatur	pH	O2	CSB	P ges	NH4	NO2	NO3	N ges	KBE/ 100ml
1 (150 l/h)	10,3	7,29	4,3	25	1,22	8,9	0,013	2,2	16	12286
2 (200 l/h)	10,1	7,38	4,7	17	1,03	7,9	0,004	1,4	11	12475
3 (250 l/h)	10,9	7,18	-	16	0,85	3	0,006	0,7	6	12286
4 (300 l/h)	10,9	7,15	1,32	19	1,02	1,9	0,009	0,7	5	1667

Nach IBC 2

Versuchstag (Q)	Temperatur	pH	O2	CSB	P ges	NH4	NO2	NO3	N ges	KBE/100 ml
1 (150 l/h)	10,5	7,39	3,2	16	0,3	6,3	0,019	2,8	16	2200
2 (200 l/h)	10,2	7,45	7,8	15	0,41	2,8	0,029	3	12	2413
3 (250 l/h)	11	7,25	-	15	0,55	2,8	0,019	1,8	7	1800
4 (300 l/h)	11	7,25	3,1	18	0,4	1	0,006	0,9	5	1067

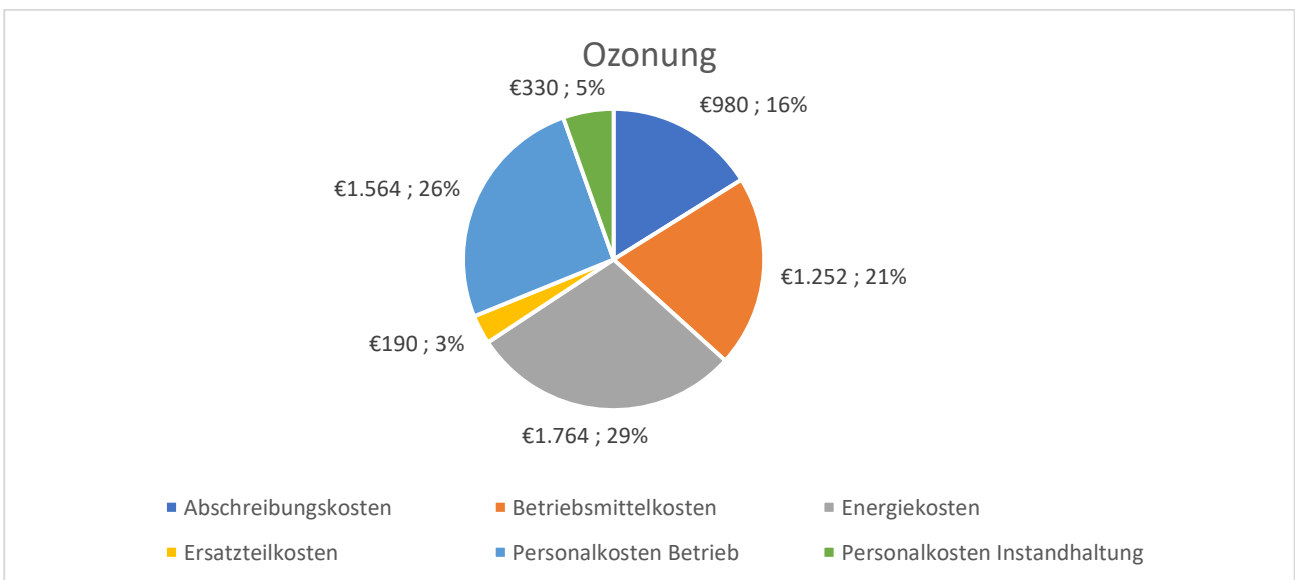
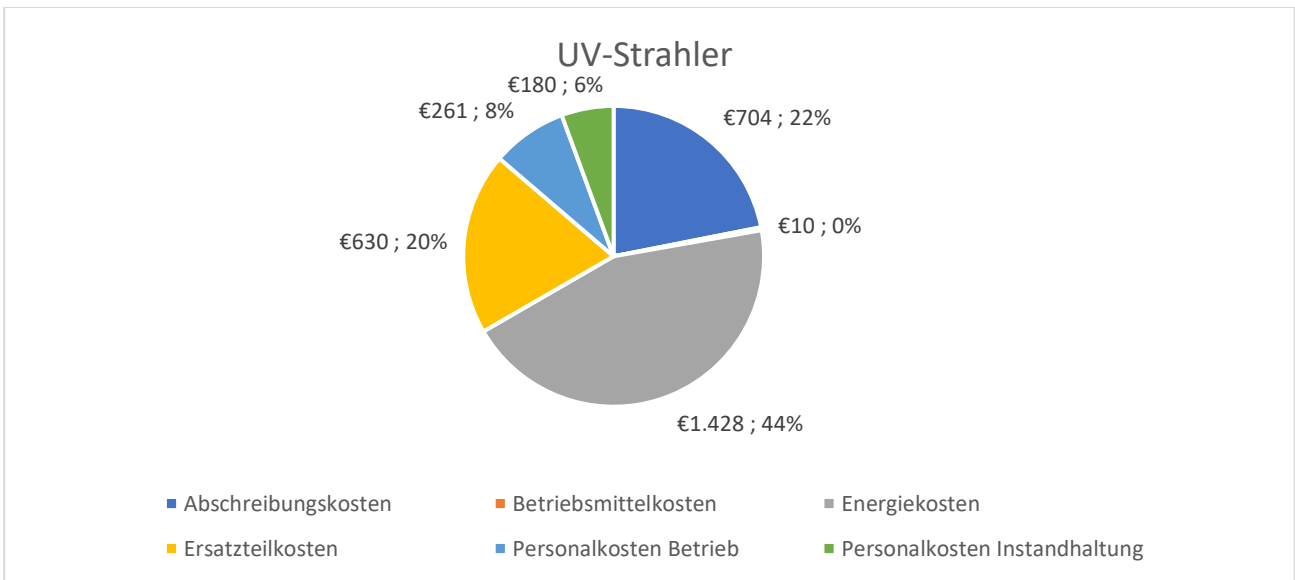
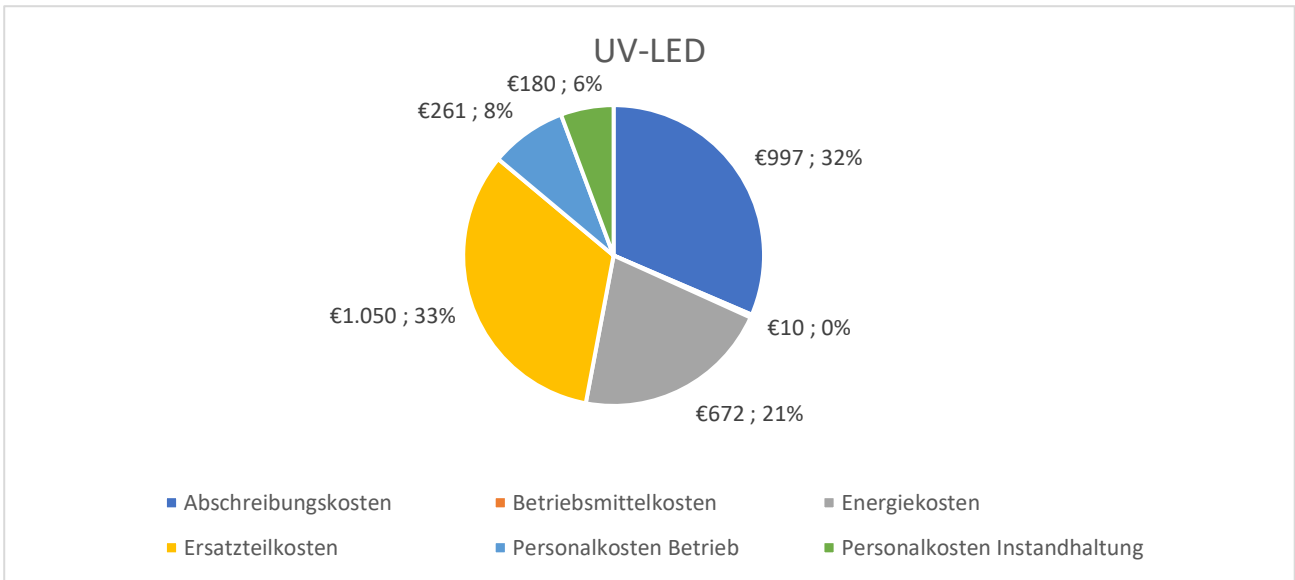
Nach UV

Versuchstag (Q)	Temperatur	pH	O2							KBE/ 100ml
1 (150 l/h)	11,2	7,5	5,9							7
2 (200 l/h)	10,9	7,57	8							7
3 (250 l/h)	11,8	7,36	-							13
4 (300 l/h)	11	7,4	4,1							53

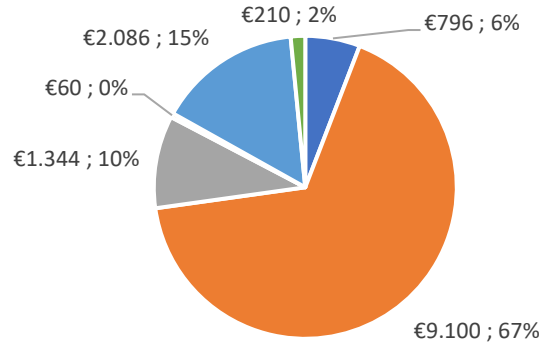
Protokoll: Einfahrtsphase der Bodenpassage

	KW2-07.01.19			KW10-05.03.19			KW14-01.04.19			KW25-21.06.19			KW30-22.07.19			KW34-20.08.19		
	Zulauf	Überlauf IBC1	Ablauf	Zulauf	Überlauf IBC1	Ablauf IBC2	Zulauf	Überlauf IBC1	Ablauf IBC2	Zulauf	Überlauf IBC1	Ablauf IBC2	Zulauf	Überlauf IBC1	Ablauf IBC2	Zulauf	Überlauf IBC1	Ablauf IBC2
Abfiltr. Stoffe (AFS) [mg/L]				78	0	0	50	0	0	60	0	0	70	20	5	65	0	0
Elimination [%]				0%	100%	100%	0%	100%	100%	0	100%	100%	0%	72%	93%	0%	100%	100%
CSB [mg/L]				60	25	18	50	28	20	45	22	18	29	13	5	47	20	15
Elimination [%]				0%	58%	70%	0%	44%	60%	0%	51%	60%	0%	55%	83%	0%	57%	68%
NO3 [mg/L]				1,1	3,1	5,4	1,3	3,5	7,3	0,1	1	1,7	1,1	1,2	2,6	0,5	0,7	1
Elimination [%]				0%	-182%	-391%	0%	-169%	-462%	0%	-900%	-1600%	0%	-9%	-136%	0%	-40%	-100%
NO2 [mg/L]				0,03	0,02	0,14	0,012	0,04	0,105	0,01	0,01	0,066	0,013	0,022	0,01	0,022	0,022	0,012
Elimination [%]				0%	33%	-367%	0%	-233%	-775%	0%	0%	-560%	0%	-69%	23%	0%	0%	45%
NH4 [mg/L]				5,1	2,2	0,8	5,8	3	1,3	0,8	1	0,2	1,1	0,9	0,4	1,6	1,3	0,7
Elimination [%]				0%	57%	84%	0%	48%	78%	0%	-25%	75%	0%	18%	64%	0%	19%	56%
Nges [mg/L]				6,23	5,32	6,34	7,112	6,54	8,705	0,91	2,01	1,96	2,213	2,122	3,01	2,122	2,022	1,712
Elimination [%]				0%	15%	-2%	0%	8%	-22%	0%	-121%	-115%	0%	4%	-36%	0%	5%	19%
Pges [mg/L]				1,4	1,1	0,8	2	1,08	0,66	0,62	0,56	0,42	1,26	0,98	0,77	1,61	1,41	0,8
Elimination [%]				0%	21%	43%	0%	46%	67%	0%	10%	32%	0%	22%	39%	0%	12%	50%
Keimzahl [KBE/mL]	4693	3280	1280	1667	487	107	6667	400	80	6667	820	333	4133	286	220	2333	500	220
Elimination [%]	0	30%	73%	0%	71%	94%	0%	94%	99%	0%	88%	95%	0%	93%	95%	0%	79%	91%
T [°C]				10,6	11,3	11,1	12	12	12	20	20	20	21	21	21	22	22	22
O2 [mg/L]				2,36	2,55	3,43	2,04	4,01	4,7	2,7	2,3	3,1	>2	>2	>2	1,95	2,79	2,16
Q [L/h]	60			70			70			70			100			120		
ΔP [mm ws]					45	0		35	0		20	0		20	5		25	0

SandfilterTA		Durchsatz:	10 m³/h	Rohrgröße:	8,4 cm ->	DN 110		
		76700 m³/year		Fließgeschwindigkeit v:	0,5 m/s			
Investitionskosten								
Bezeichnung	Größe	Einheit	Leistung in Watt	Material/ Eigenschaft	Preis in €	Bemerkungen/ Annahmen/ Hinleitung		Quelle
Materialien:								
Becken	66	m³	-	Beton	8.500 €	2x33 m³	2x11 m²	TIA
Filtermaterial	53	m³	-	Kies 2/8	1.600 €		30 €/m³ Kies	TIA
Pumpe	10	m³/h	400	Tauchpumpe	100 €	1 bar		TIA
Zulauf-Schlauch	20	m	-	DN 38	80 €			TIA
Rohre	20	m	-	DN 110, PVC-U	800 €	PN 16		TIA
Rückspülpumpe	20	m³/h	2500	Pumpepumpe	150 €	5 bar		TIA
Kompressor/Gebläse	200	Nm³/h	3500	-	2.500 €			TIA
Kugelhahn	-	-	-	DN 38	40 €			TIA
Rotameter	-	-	-	DN 38	80 €			TIA
Sonstiges	-	-	-	-	400 €	Kabel, Halter, Zubehör		TIA
2x Schieber	-	-	-	DN 110	150 €	-	-	TIA
Düsen für Düsenboden	60	Stück	-	60 Stück	960 €		16 €/ Stück	TIA
-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV-Einheit	4	m²	400	LED-UV	10.000 €	-	-	TH-Ulm
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
				Summe:	25.360 €			
				Abschreibung pro Jahr:	2.124 €	inkl.		3% Zinsen/year
Laufende Kosten								
Bezeichnung			Leistung in Watt	Betrieb in h pro Tag	Kosten pro Jahr in €	Bemerkungen/ Annahmen/ Hinleitung		Quelle
Betrieb:								
Stromverbrauch Pumpe	-	-	400	24	672 €	0,20 €/kWh		TIA
Stromverbrauch Rückspülpumpe	-	-	2500	2	350 €	0,20 €/kWh		TIA
Stromverbrauch UV-LED	-	-	400	24	672 €	0,20 €/kWh		TIA
Stromverbrauch Kompressor	-	-	3500	2	490 €	0,20 €/kWh		TIA
Bezeichnung	Menge		Kosten pro m³ bzw. kg		Kosten pro Jahr in €	Bemerkungen/ Annahmen/ Hinleitung		Quelle
Chemikalien/Hilfsstoffe:								
Wasser für händische Reinigung	1	m³/week	2	-	104 €	-	-	Hochrechnung VA
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bezeichnung	Intervall		Neupreis		Kosten pro Jahr in €	Bemerkungen/ Annahmen/ Hinleitung		Quelle
Ersatzteile:								
Pumpe	alle	10 Jahre		100 €	10 €			TIA
UV-LEDs	alle	12000 Stunden		2.000 €	1.400 €			TH Ulm
Filtermaterial	alle	3 Jahre		30	533 €			TIA
Rückspülpumpe	alle	10 Jahre		100	10 €			TIA
-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bezeichnung	Arbeitszeit/ Häufigkeit		Stundenlohn		Kosten pro Jahr in €	Bemerkungen/ Annahmen/ Hinleitung		Quelle
Personal Betrieb:								
Probenahme/Betrieb/ Überwachung	2 h/week		20 €	-	2.086 €	Höherer Aufwand mit Überwachung		TIA
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bezeichnung	Arbeitszeit/ Häufigkeit		Stundenlohn		Kosten pro Jahr in €	Bemerkungen/ Annahmen/ Hinleitung		Quelle
Personal Instandhaltung								
Reinigung	1 h/week		10 €	-	521 €	-	-	TIA
Wartung Pumpe	0,5 h/year		40 €	-	20 €	-	-	TIA
Wartung Rückspülpumpe	0,5 h/year		40 €	-	20 €	-	-	TIA
Wartung Belüfter	0,5 h/year		40 €	-	20 €	-	-	TIA
Wartung UV-LEDS	2 h/year		40 €	-	80 €	-	-	TIA
				Laufende Kosten	6.989 €/year			
				Gesamtkosten	9.113 €/year			
				Verbrauch	0,14 kWh/m³			
				Kosten pro m³	0,12 €/m³			
				Personalkosten/year	2.747 €/year			



Chlorung



- Abschreibungskosten
- Betriebsmittelkosten
- Energiekosten
- Ersatzteilkosten
- Personalalkosten Betrieb
- Personalalkosten Instandhaltung

Entwicklung einer Testapparatur zur Ermittlung eines geeigneten Materials für eine Bodenpassage

Um aufwendige und teure Untersuchungen, wie der Ermittlung der Partikelgrößenverteilung und der Messung des Verhaltens der Schüttung bei einer Durchströmung, zu vermeiden, wurde, unter der Vorgabe definierter Parameter, eine Testapparatur zur Ermittlung eines geeigneten Materials für eine Bodenpassage entwickelt.

Es wurden folgende Parameter vorgegeben:

- Einfache Handhabbarkeit, sowie Aufbau der Testapparatur
- Das Schüttgut soll vor Ort vorhanden sein (speziell in Entwicklungs- und Schwellenländern)
- Das Material bzw. der Werkstoff soll ebenfalls vorhanden sein
- Einfache Durchführbarkeit der Versuche

Die Aufgabe besteht darin, ein geeignetes Material/Werkstoff für die Konstruktion zu finden, sowie die dafür notwendige Konstruktion zu ermitteln. Als Werkstoff wird Polypropylen (PP) gewählt. Die Realisierung der Testapparatur erfolgt mit einem Stecksystem aus HT-Rohr.

Tab 1: Die Tabelle zeigt die benötigten Bauteile für das HT-Stecksystem für die Versuchsapparatur. Als Stützgewebe, für die zu untersuchende Schüttung, wurde **handelsübliche Jute** verwendet. Als Schmiermittel wurde **Ulith-Schmiermittel-für-Steckmuffensysteme-aus-Kunststoff** verwendet.

Bezeichnung	Baulänge/Winkel/Reduzierung	DN
HT-PP-Rohr	1000 mm	110 mm
6 x HT-PP-Bogen	45°	110 mm
HT-PP-Reduktion kurz	110 mm auf 50 mm	-
HT-PP-Rohr	500 mm	50 mm
HT-PP-Muffenstopfen	-	50 mm
HT-PP-Y-Stück	-	50 mm



Abb 1: Es ist die Testapparatur aufgebaut. Damit diese sicher stehen kann, wurde eine einfache Holzkonstruktion zusammengeschrubt. Diese Holzkonstruktion wurde mit Schraubzwingen auf zwei Trägern fixiert.

Jede Messung der folgenden Versuche wird in dreifach Bestimmung durchgeführt.

Versuch zur Ermittlung des Hohlraumvolumens der Schüttung:

Zuerst wird über den Auslass der Reduzierung ein Stück Jute gelegt und mit etwas des zu untersuchenden Schüttgutes beschwert. Danach wird das zu untersuchende Material bis zu einer definierten Höhe eingefüllt (im Versuch 600 mm). Der Auslass wird anschließend mit einem Muffenstopfen verschlossen. Dieser muss zusätzlich gründlich mit Klebeband abgeklebt werden, um dem sich aufbauenden Druck Stand zu halten. Danach wird Klarwasser bis zur Höhe der Schüttung eingefüllt. Im Anschluss wird der Muffenstopfen entfernt und das austretende Wasser mit einem Eimer aufgefangen. Der Nachlauf in den Eimer wird nach 10 Minuten beendet. Abschließend das Volumen des Wassers im Eimer mit Hilfe eines Messzylinders bestimmt.

Versuch zur Ermittlung der Verweilzeit:

Der Aufbau ist identisch mit dem des Tropfkörpers des „*Versuchs zur Ermittlung des Hohlraumvolumens der Schüttung*“. Der einzige Unterschied besteht darin, dass der Muffenstopfen zum Verschluss des Austritts nicht benötigt wird. Es wird Klarwasser mit Hilfe einer Pumpe auf die Schüttung gegeben. Es wird dabei eine Flächenbeschickung q_a von 0,1 bis 1,0 $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ untersucht. Mit Beginn der Aufbringung des Klarwassers auf die Schüttung wird die Zeit gemessen, die das Wasser benötigt, um die gesamte Schüttung zu durchfließen. Zudem wird die Wassermenge, welche in dieser gemessenen Zeit durch die Schüttung geflossen ist, in einem Eimer

aufgefangen und das Volumen mittels eines Messzylinders bestimmt. Die Nachlaufzeit beträgt maximal 10 Minuten. Zur Auswertung wird die Verweilzeit τ , welche sich aus dem Quotienten des Hohlraumvolumens über der Volumenstrom (Quotient aus der Wassermenge und die benötigte Zeit für den Austritt am Ausfluss) berechnet, über der Flächenbeschickung q_A aufgetragen.

Versuch zur Ermittlung des Druckverlustes:

Zuerst werden auf den Auslass der Reduzierung zwei 45° Bögen gesteckt. Dann wird, zur sicheren Entleerung der Testapparatur, ein Y-Stück aufgesteckt und mit einem Muffenstopfen verschlossen, welcher ebenfalls mit Klebeband fixiert wird. Danach werden zwei weitere 45° Bögen aufgesteckt, gefolgt von einem 500 mm langen HT-Rohr DN 50, auf welches abschließend zwei weitere 45° HT-Bögen gesteckt werden.

Die Apparatur wird nun mit einer Tauchpumpe solange mit Klarwasser beschickt, bis das Wasser am Auslauf der Apparatur austritt. Anschließend wird über eine Armatur (Kugelhahn) der Zulauf durch Auslitern auf 0,86 l/h eingestellt. Die nun folgenden Versuche werden in einem Intervall zwischen 0,86 und 8,6 l/h Klarwasser durchgeführt. So wird sichergestellt, dass die Testapparatur mit einer Flächenbeschickung q_A zwischen 0,1 und 1 $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ beschickt wird. Dabei wird die Höhe des Überstandes über der Schüttung mit einem Zollstock gemessen. Es wird dabei der Flüssigkeitsstand in mm notiert, wenn das Wasser aus der Testapparatur austritt. Der Versuchsaufbau ist in *Abb. 2* dargestellt.



Abb. 2: Zeigt den Versuchsaufbau mit eingebauten Y-Stück. Zur besseren Erfassung des Überstandes wurde das HT-Rohr mit DN 110 auf etwa 750 mm Länge gekürzt.

Ergebnisse und Empfehlungen:

Die folgende Tabelle fasst die untersuchten Schüttgüter, die Überstauhöhe in mm und das jeweilige Hohlraumvolumen zusammen.

Tab. 2: Die Fläche der Schüttung liegt bei 0,0086 m². Die Höhe der Schüttung liegt bei 600 mm.

Schüttgut	Überstand/ mm	Hohlraumvolumen/ l
Rindenmulch (Messanlage)	ca. 5	2,42
Rheinkies 16/32 (Hass & Hatje)	ca. 48,3	
Buntkies 2/8 (Hornbach)	0	1,84
Kiesel gewaschen 2/8 (Ohle & Lau)	39,7-42,5	2,03
Kiesel gewaschen 8/16 (Ohle & Lau)	56,3-67,7	2,16
Filtersand 0,4/0,8 (Hagebau)	ca. 97,3	1,37
Torfhumus (Hornbach)	ca. 104	1,54

Empfehlungen:

- Es wird generell ein gewaschener Kies mit Körnung zwischen 2 und 8 mm empfohlen
- Der Überstand sollte eine Höhe von 50 mm nicht übersteigen.
- Das Hohlraumvolumen sollte in einem Intervall zwischen 1,8 und 2,0 L, bezogen auf das Bruttovolumen der Testapparatur, liegen.