

**Entwicklung und Erprobung eines neuartigen  
Bioreaktors zur Abluftreinigung mittels lateral  
angeströmter mikrobiologisch aktiver  
Oberflächen**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 37210 von der Deutschen  
Bundesstiftung Umwelt

von

REINLUFT Umwelttechnik Ingenieurgesellschaft mbH  
Stuttgart

Universität Stuttgart  
Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Stuttgart, April 2024

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Aufbau der Versuchsanlagen</b> .....	<b>4</b>
3.1	Labortechnische Anlage.....	4
3.2	Halbtechnische Anlage .....	6
<b>4</b>	<b>Strömungsmessung und Verweilzeitbestimmung</b> .....	<b>8</b>
4.1	Labortechnische Anlage.....	8
4.1.1	Verweilzeitbestimmung mittels Tracergas .....	8
4.1.2	Druckverluste .....	10
4.2	Halbtechnische Anlage .....	10
4.2.1	Verweilzeitbestimmung mittels Tracergas .....	10
4.2.2	Druckverluste .....	13
<b>5</b>	<b>Sorptionsversuche</b> .....	<b>13</b>
5.1	Labortechnische Anlage.....	13
5.1.1	Absorptionsversuche.....	13
5.2	Halbtechnische Anlage .....	14
5.2.1	Absorptionsversuche.....	14
5.2.2	Desorptionsversuche.....	19
<b>6</b>	<b>Anlagenbetrieb mit Mikroorganismen</b> .....	<b>21</b>
6.1	Labortechnische Versuchsanlage .....	21
6.1.1	Allgemeine Betriebsweise .....	21
6.1.2	Animpfen der Textilmatten.....	21
6.1.3	Biologischer Abbau verschiedener organischer Lösemittel.....	22
6.1.4	Vergleich der drei Lösemittel .....	24
6.1.5	Dokumentation Bewuchs.....	25
6.2	Halbtechnische Versuchsanlage .....	25
6.2.1	Allgemeine Betriebsweise .....	25
6.2.2	Animpfen der Kokosfasermatten .....	26
6.2.3	Biologischer Abbau verschiedener organischer Lösungsmittel .....	27
6.2.4	Vergleich der Versuchsphasen und Ergebnisinterpretation .....	32
6.2.5	Dokumentation Bewuchs.....	33
<b>7</b>	<b>Keimbelastung</b> .....	<b>34</b>
7.1	Labortechnische Anlage.....	34
7.2	Halbtechnische Anlage .....	36
<b>8</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis (einschließlich der durchgeführten Abschlussarbeiten)</b> .....	<b>39</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fließbild Aufbau labortechnische Anlage .....	4
Abbildung 2: Fließbild Versuchsreaktor labortechnische Anlage.....	5
Abbildung 3: Labortechnische Versuchsanlage .....	5
Abbildung 4: Halbtechnische Versuchsanlage .....	6
Abbildung 5: Zeichnung der Versuchsanlage .....	6
Abbildung 6: Trägermaterial Kokosfasermatten aufgehängt auf Träger- und Befeuchtungsrohren .....	7
Abbildung 7: Beispielhaft die Impulsantwort für einen Luftvolumenstrom von 30 m <sup>3</sup> /h .....	8
Abbildung 8: Nebelversuch zur Erfassung des Strömungsverhaltens in einzelnen Strömungskanälen .....	9
Abbildung 9: Messpunkte im Versuchsreaktor .....	11
Abbildung 10: Vergleich der theoretischen und der gemessenen gemittelten Verweilzeit bei trockener und nasser Fahrweise zwischen der Ebene A und C .....	12
Abbildung 11: Sorptionsverlauf in Abhängigkeit von verschiedenen Verweilzeiten im Reaktor	14
Abbildung 12: Absorptionsversuch Rohgaskonzentration $c_{\text{Rohgas}}=500 \text{ mg/m}^3$ , Luftvolumenstrom $\dot{V}_L = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	15
Abbildung 13: Absorptionsversuch Rohgaskonzentration $c_{\text{Rohgas}} =1000 \text{ mg/m}^3$ , Luftvolumenstrom $\dot{V}_L = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	16
Abbildung 14: Desorptionsversuch Startkonzentration Rohgas=480 mg/m <sup>3</sup> , Luftvolumenstrom $\dot{V}_L=1000 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	19
Abbildung 15: Desorptionsversuch Startkonzentration Rohgas=950 mg/m <sup>3</sup> , Luftvolumenstrom $\dot{V}_L = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	20
Abbildung 16: Wirkungsgradverlauf vom 25.01.2023 bis 13.04.2023.....	22
Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf des Acetonabbaus in den ersten 14 Tagen nach Umstellung des Lösemittels.....	23
Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf des Ethylacetatabbaus in den ersten 14 Tagen nach Umstellung des Lösemittels .....	24
Abbildung 19: Bewuchs 12.04.23 .....	25
Abbildung 20: Verwendetes Bewässerungsprogramm .....	26
Abbildung 21: Roh- und Reingaskonzentrationen für eine Belastung mit Ethanol von 260 mg/m <sup>3</sup> und einem Volumenstrom von 1000 m <sup>3</sup> /h.....	27
Abbildung 22: Roh- und Reingaskonzentrationen für eine Belastung mit Ethanol von 370 mg/m <sup>3</sup> und einem Volumenstrom von 1000 m <sup>3</sup> /h.....	28
Abbildung 23: Vergleich der CO <sub>2</sub> -Konzentrationen von Roh- und Reingas .....	29
Abbildung 24: Roh- und Reingaskonzentrationen für eine Belastung mit 2-Butanon von 290 mg/m <sup>3</sup> und einem Volumenstrom von 1000 m <sup>3</sup> /h.....	30
Abbildung 25: Roh- und Reingaskonzentrationen für eine Belastung mit einem Lösemittelgemisch auf 2-Butanon-Basis von 130 mgC/m <sup>3</sup> und einem Volumenstrom von 430 m <sup>3</sup> /h.....	31
Abbildung 26: Unbesiedeltes Trägermaterial zu Beginn der Versuche .....	33
Abbildung 27: Bewuchs auf den Kokosfasermatten.....	34
Abbildung 28: Agarplatten labortechnische Anlage nach 5-tägiger Inkubationszeit.....	35
Abbildung 29: Agarplatten halbtechnische Anlage nach 5-tägiger Inkubationszeit.....	36

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verweilzeit labortechnische Anlage ohne Textilien, mit trockenen Textilien und mit feuchten Textilien (Quelle: Stahlhacke, Abschlussarbeit, 2019) .....	9
Tabelle 2: Druckverluste labortechnische Anlage ohne Textilien, mit trockenen Textilien und mit nassen Textilien.....	10
Tabelle 3: Vergleich Absorptionsversuche bei einer Rohgaskonzentration von 500 mg Ethanol/m <sup>3</sup> und 1000 mg Ethanol/m <sup>3</sup> .....	18
Tabelle 4: Tabellarischer Vergleich Roh- und Reingas Lösemittelgemisch .....	<b>Fehler!</b>
<b>Textmarke nicht definiert.</b>	
Tabelle 5: Tabellarischer Vergleich verschiedener Versuchsphasen und Lösemittel ..	32

# 1 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Bioreaktors zur Abluftreinigung mittels lateral angeströmter mikrobiologisch aktiver Oberflächen“ der Firma Reinluft Umwelttechnik umfasst die Planung, den Aufbau und die Erprobung einer neuartigen biologischen Abluftreinigungsanlage im halbtechnischen Maßstab in Kooperation mit der Universität Stuttgart. Zeitgleich wurde an der Hochschule RheinMain eine labortechnische Anlage erprobt. Das Projekt wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt mit dem Aktenzeichen AZ 37210 gefördert.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden etliche studentische Abschlussarbeiten angefertigt. Ergebnisse, Tabellen und Abbildungen aus diesen Arbeiten sind entsprechend gekennzeichnet.

Das Funktionsprinzip der Versuchsanlagen beruht darauf, dass der Abluftvolumenstrom am mit Mikroorganismen besiedelten Trägermaterial entlangströmt, anstatt wie bei Biofiltern und Biotricklingfiltern durch das Filtermaterial hindurch. Dadurch sollen Probleme wie z.B. Clogging (Zuwachsen mit Biomasse) und hohe Druckverluste vermieden werden. Als Trägermaterial werden an der halbtechnischen Versuchsanlage Kokosfasermatten verwendet. Die labortechnische Anlage an der Hochschule RheinMain wird zunächst mit Textilmatten aus Polypropylen und später mit Hanffasermatten erprobt. Sowohl die Kokosfaser-, als auch die Hanffasermatten haben den ökologischen Vorteil, dass diese nach einem Filtermaterialwechsel biologisch abgebaut werden können und die Rohstoffe sind nachwachsend.

Zu Beginn der Erprobung der Anlage werden jeweils wichtige anlagencharakteristische Parameter wie die Verweilzeit mittels Tracergastests und die Strömungsverteilung in den Versuchsanlagen ermittelt. Es sind kaum Druckverluste aufgetreten. In Sorptionsversuchen kann eine gute absorbierende und desorbierende Wirkung der Kokosfaser- und Polypropylenmatten für das Lösemittel Ethanol nachgewiesen werden.

Zur Ansiedlung von Mikroorganismen auf den Trägermaterialien wird Rücklaufschlamm aus der Kläranlage zugegeben. Der Bewuchs besteht aus einer dünnen Schicht aus Mikroorganismen auf der Oberfläche der Trägermaterialien. Die Abbauleistung wird bei variierender Rohgaskonzentration und Abluftvolumenströmen für verschiedene Lösemittel ermittelt. Zur Erzeugung einer synthetischen Abluft werden die Lösemittel Ethanol, Aceton, 2-Butanon, Ethylacetat und ein Lösemittelgemisch auf Basis von 2-Butanon verwendet. An beiden Versuchsanlagen können vielversprechende Abbauleistungen gemessen werden.

Aufgrund der guten Ergebnisse wird eine Fortführung der Versuche mit der halbtechnischen Anlage unter realen industriellen Betriebsbedingungen angestrebt. Erste Anfragen potentieller Anwender wurden sehr positiv aufgenommen.

## 2 Einleitung

Biologische Abluftreinigungsverfahren haben sich in den letzten Jahren endgültig als Stand der Technik in der Abluftreinigung etabliert. Heute differenziert man zwischen Biofiltern, Biowäschern und Biotricklingfiltern. Letztere verwenden im Gegensatz zu Biofiltern ein inertes Trägermaterial als Aufwuchsfläche für Mikroorganismen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Biotricklingfilter mit inertem Trägermaterial zum Teil deutlich höhere Leistungsfähigkeiten erreicht haben als konventionelle Biofilter. Ihr Einsatz in der Praxis scheiterte aber bisher an dem höheren apparativen Aufwand im Betrieb und an der Neigung der Systeme durch unkontrolliertes Biomassenwachstum zu Verstopfen (Clogging). Durch letzteres kann ein geordneter Dauerbetrieb im Industriesektor nicht gewährleistet werden. Auch ein vom Antragsteller bereits vor Jahren durchgeführtes Forschungsvorhaben mit textilen Trägermaterialien (AZ 7778) brachte diesbezüglich keine Lösung. Mit dem hier vorgestellten System wird ein völlig neuer Ansatz verfolgt, diese Problemstellungen effektiv und kostengünstig zu beseitigen.

Es wird versucht den sich in den letzten Jahren häufenden Forderungen der Industrie nach kleineren biologischen Abluftreinigungsanlagen (kleiner, besser, billiger) nachzukommen. Mit diesem Ansatz kann man auch verstärkt in Konkurrenz zu den kleiner gebauten thermischen Abluftreinigungsverfahren treten. Dies hat den großen Vorteil, dass der ökologische Fußabdruck einer biologischen Anlage bei vergleichweisen Rahmenbedingungen in der Regel viel geringer ist.

Zudem kann die neue Technik auf den sonst obligatorischen vorgeschalteten Wäscher verzichten. Dadurch wird wesentlich weniger Wasser benötigt und es entsteht weniger Abwasser. Ein weiterer ökologischer Vorteil ist eine Energieeinsparung durch geringere Druckverluste. Weiterhin ist der „ökologische Fußabdruck“ bei der Herstellung einer deutlich kleineren Anlage entsprechend günstiger. Es wird etwa nur ein Drittel der Stahlmenge erforderlich im Vergleich zu konventionellen Biofiltern. Die Transporte reduzieren sich entsprechend. Insgesamt reduziert sich der „ökologische Fußabdruck“ um mehr als ein Drittel. Zudem kann das neue Trägermaterial deutlich kompakter transportiert werden. Das Trägermaterial wird trocken transportiert und hat allein schon deshalb gegenüber den gängigen Biofiltermaterialien einen erheblichen Gewichtsvorteil. Das bedeutet, dass der Transportaufwand sich nach bisherigen Abschätzungen auf etwa ein Fünftel an Gewicht und Volumen reduziert. Auch der Filtermaterialtausch vereinfacht sich deutlich. Während für eine konventionelle Anlage immer Kräne, Radlader und Bagger benötigt werden, um große Mengen Filtermaterial zu bewegen, können die Stoffbahnen sogar manuell ausgetauscht werden.

Ziel des Forschungsprojektes ist der Aufbau und die Erprobung einer neuartigen biologischen Abluftreinigungsanlage mit tangential angeströmten Textilien als Trägermaterial für die Mikroorganismen. Dazu werden an der Hochschule RheinMain am Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik Untersuchungen im Labormaßstab fortgesetzt. Eine Versuchsanlage im halbtechnischen Maßstab wird zunächst von der Firma Reinluft Umwelttechnik Ing. GmbH konzeptioniert und anschließende am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und

Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart aufgebaut. Ziel ist letztlich die Entwicklung einer biologischen Abluftreinigungstechnik, welche den Platzbedarf deutlich reduziert. Die Größe der Versuchsanlage soll ein belastbares Scale-Up ermöglichen. Basierend auf den umfangreichen Erfahrungen mit konventionellen Biofilter Pilotanlagen wird für die halbtechnische Versuchsanlage eine Kapazität von etwa 500 m<sup>3</sup>/h bis 1.000 m<sup>3</sup>/h vorgesehen. Dies erleichtert auch den direkten Vergleich der Reinigungsleistungen mit konventionellen Pilotanlagen, die in der Regel vergleichbare Kapazitäten aufweisen.

Bevor mit dem Versuchsbetrieb zur biologischen Abluftreinigung mit Mikroorganismen und synthetischer Abluft begonnen wird, ist das Ziel, wichtige strömungsmechanische Parameter der Anlage experimentell zu ermitteln. Dazu gehört die Bestimmung der Verweilzeit und die Ermittlung von Druckverlusten. Außerdem soll das Sorptionsverhalten der verwendeten Trägermaterialien untersucht werden. Als Trägermaterial werden Polypropylen-Matten an der labortechnischen und Kokosfasermatten an der halbtechnischen Anlage verwendet. Der Fokus soll verstärkt auf den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen, wie z.B. Kokosfasern oder Hanf gelegt werden.

Mit den Versuchsanlagen soll untersucht werden, ob für einen späteren Einsatz in der Industrie vielversprechende Eliminationsleistungen erzielt werden können. Für den Versuchsbetrieb ist es wichtig, Nährsalze in der richtigen Konzentration zu dosieren und die Bewässerung so einzustellen, dass die Matten nicht austrocknen und die gewünschte Feuchtigkeit bekommen. Bei variierenden Betriebsparametern werden die sich jeweilig einstellenden Wirkungsgrade ermittelt. Die Versuche werden bei unterschiedlich hohen Rohgaskonzentrationen, verschiedenen Lösemitteln und verschiedenen Volumenströmen durchgeführt.

### 3 Aufbau der Versuchsanlagen

#### 3.1 Labortechnische Anlage

In Abbildung 1 ist die labortechnische Anlage der Hochschule RheinMain als Fließbild dargestellt. Der Versuchsreaktor ist ein maßstabgetreuer Nachbau der Standardcontainer der Firma Reinluft Umwelttechnik (Abmessungen 12,192 x 2,591 x 2,438 m) im Maßstab 1:8.

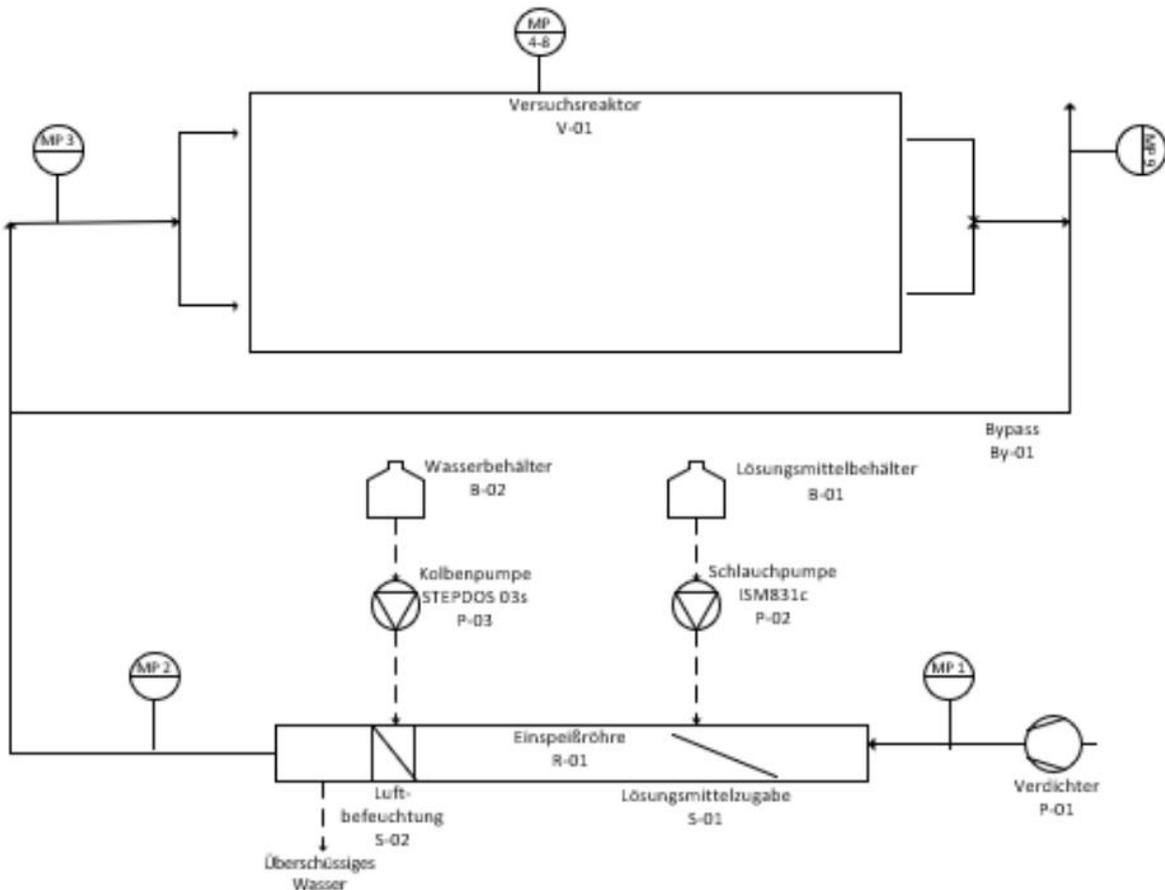


Abbildung 1: Fließbild Aufbau labortechnische Anlage (Quelle: Conrad, Abschlussarbeit, 2023)

#### Funktionsweise

Mittels eines Ventilators wird Raumluft über ein Rohr angesaugt. Zur Erzeugung einer synthetischen Abluft, wird zum Luftvolumenstrom ein Lösemittel zudosiert. In der Luftbefeuchtungsstelle wird die relative Luftfeuchtigkeit auf 100 % erhöht. Die wasserdampfgesättigte Abluft wird über einen Gleichrichter in den Versuchsreaktor geleitet. Dieser besteht aus einem Plexiglasgehäuse mit den Maßen 1,52 x 0,29 x 0,32 m. In dem Versuchsreaktor sind auf Plexiglasplatten Textilmatten aus Polypropylen (PP) befestigt, welche als inertes Trägermaterial dienen. In dem Reaktor finden später die Hauptprozesse, die Absorption sowie der bakterielle Abbau, statt (Conrad, Abschlussarbeit, 2023). Der Innenraum des Reaktors ist in fünf parallel durchströmte Kanäle unterteilt (siehe Abbildung 2). Abbildung 3 zeigt den Aufbau der Versuchsanlage.

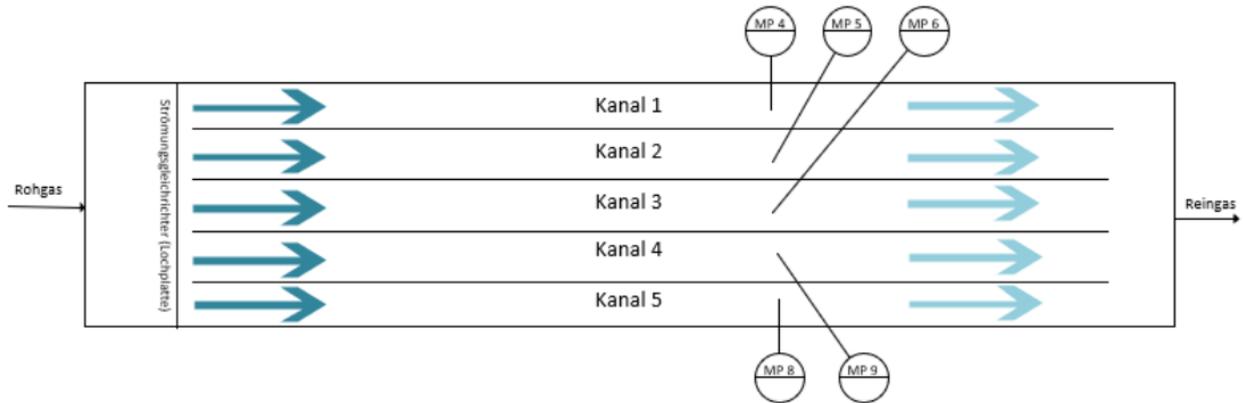


Abbildung 2: Fließbild Versuchsreaktor labortechnische Anlage (Quelle: Conrad, Abschlussarbeit, 2023)



Abbildung 3: Labortechnische Versuchsanlage (Quelle: Conrad, Abschlussarbeit, 2023)

### 3.2 Halbtechnische Anlage

Die halbtechnische Versuchsanlage wurde am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart aufgebaut. Sie wurde von der Firma Reinluft Umwelttechnik Ing. GmbH konzeptioniert und aufgebaut. In Abbildung 4 ist die Bioreaktor-Versuchsanlage dargestellt und Abbildung 5 zeigt die Zeichnung der Versuchsanlage.



Abbildung 4: Halbtechnische Versuchsanlage (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

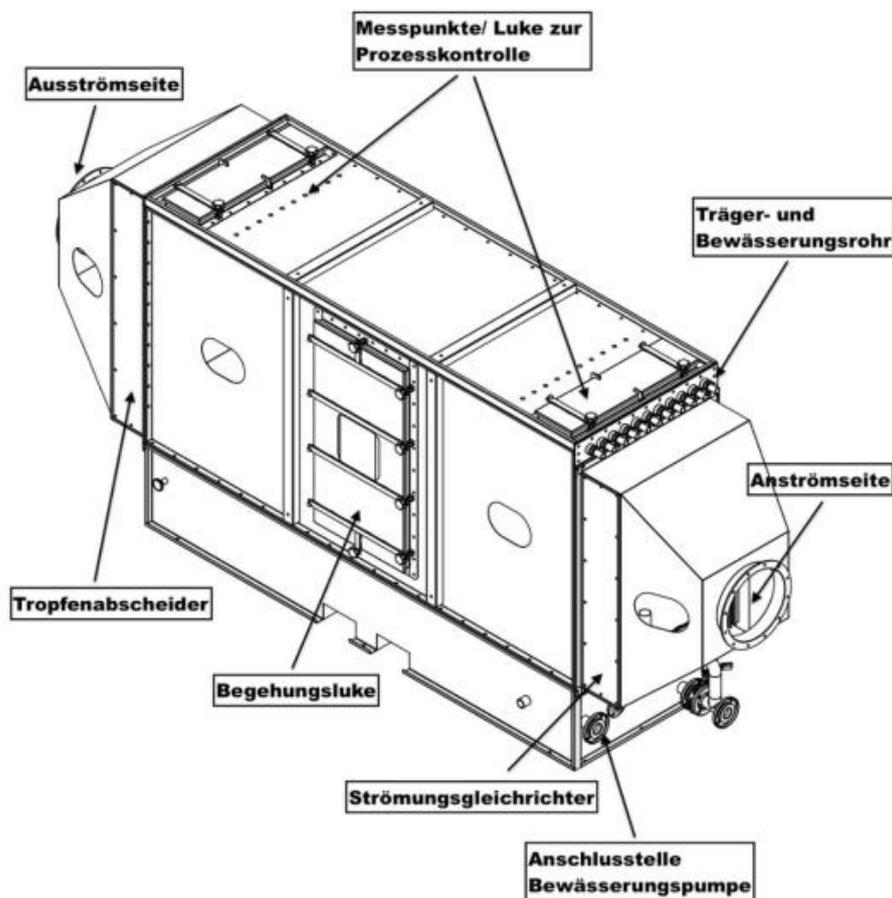


Abbildung 5: Zeichnung der Versuchsanlage (Quelle: Maier, Abschlussarbeit, 2022)

Das Funktionsprinzip der halbtechnischen Anlage ist das gleiche wie bei der labortechnischen Anlage (Kapitel 3.1). Als Trägermaterial werden Kokosfasermatten verwendet. Die Kokosfasermatten sind im Reaktor über elf Bewässerungsrohre aufgehängt (siehe Abbildung 6) und werden von der Luft tangential durchströmt. Zur Stabilisierung sind die Kokosfasermatten ca. 5 cm ins Waschwasser eingetaucht. Dies verhindert zudem Kurzschlussströmungen unter den Kokosfasermatten. Die Bewässerung der Kokosfasermatten erfolgt im Kreislauf mittels einer Pumpe.

Die Innenmaße des Reaktors betragen 3,0 m (Länge) x 0,9 m (Breite) x 1,95 m (Höhe). Im unteren Teil des Reaktors befindet sich die Wasservorlage, in welchem das von den Kokosfasermatten tropfende Waschwasser aufgefangen wird. Um einen zu hohen Feuchtigkeitsaustrag zu vermeiden, befindet sich am Ende des Reaktors ein Tropfenabscheider. Das System wird im Unterdruck betrieben. Zur Prozesskontrolle ist in der Mitte des Reaktors eine Begehungsluke eingebaut. Zudem sind an den langen Seiten des Reaktors im unteren Bereich vier Luken vorhanden und auf dem Dach des Reaktors jeweils an den Enden eine aufklappbare Luke.



Abbildung 6: Trägermaterial Kokosfasermatten aufgehängt auf Träger- und Befeuchtungsrohren

## 4 Strömungsmessung und Verweilzeitbestimmung

### 4.1 Labortechnische Anlage

#### 4.1.1 Verweilzeitbestimmung mittels Tracergas

Zur Untersuchung wurde die Impulsmethode herangezogen. Dabei wird ein Tracergas stoßartig zum Luftvolumenstrom hinzugegeben. Als Tracergas wird Feuerzeuggas bestehend aus einem Propan-Butan-Gemisch verwendet. Dieses ist unpolar und wird somit von den befeuchteten Matten nicht nennenswert absorbiert. Der Tracer wird direkt vor dem Reaktor aufgegeben. Mit einer Stoppuhr wird die Zeit gestoppt, bis mit einem FID an einem Messpunkt direkt hinter dem Reaktor ein schlagartiger Anstieg der Kohlenstofffracht detektiert wird. Die Totzeit muss anschließend von den gemessenen Zeiten abgezogen werden. Unter der Totzeit versteht man die Zeit, die das Tracergas benötigt, um durch die Schlauch- und Rohrleitungen zu gelangen, bis ein Signal vom FID gemessen wird.

Insgesamt wurden die Verweilzeiten für den leeren Reaktor, den trockenen Versuchsreaktor und befeuchteten Versuchsreaktor bestimmt. Die Versuche wurden jeweils für Luftvolumenströme von 15, 20 und 30 m<sup>3</sup>/h durchgeführt. In Abbildung 7 ist die Impulsantwort beispielhaft für einen Luftvolumenstrom von 30 m<sup>3</sup>/h dargestellt.

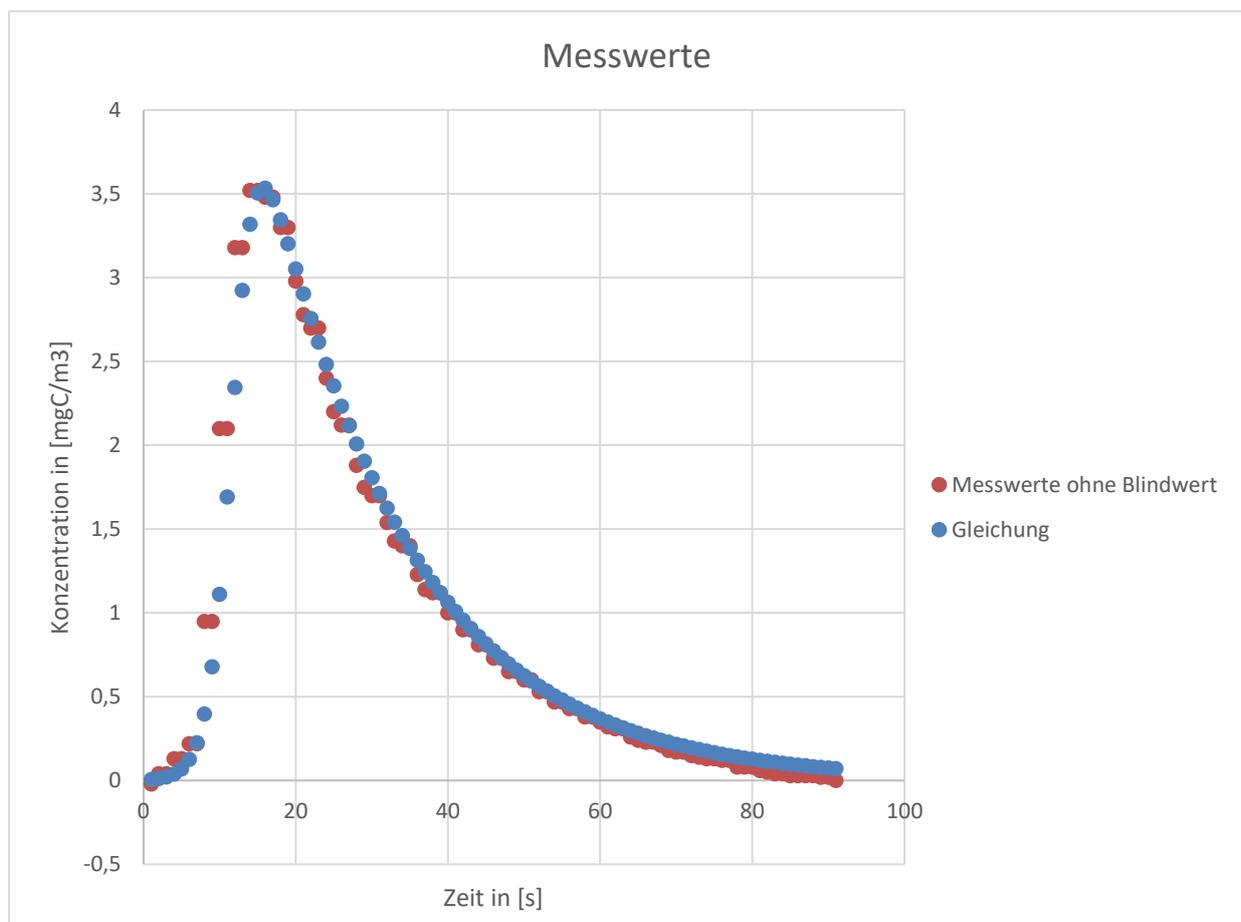


Abbildung 7: Beispielhaft die Impulsantwort für einen Luftvolumenstrom von 30 m<sup>3</sup>/h (Quelle: Stahlhacke, Abschlussarbeit, 2019)

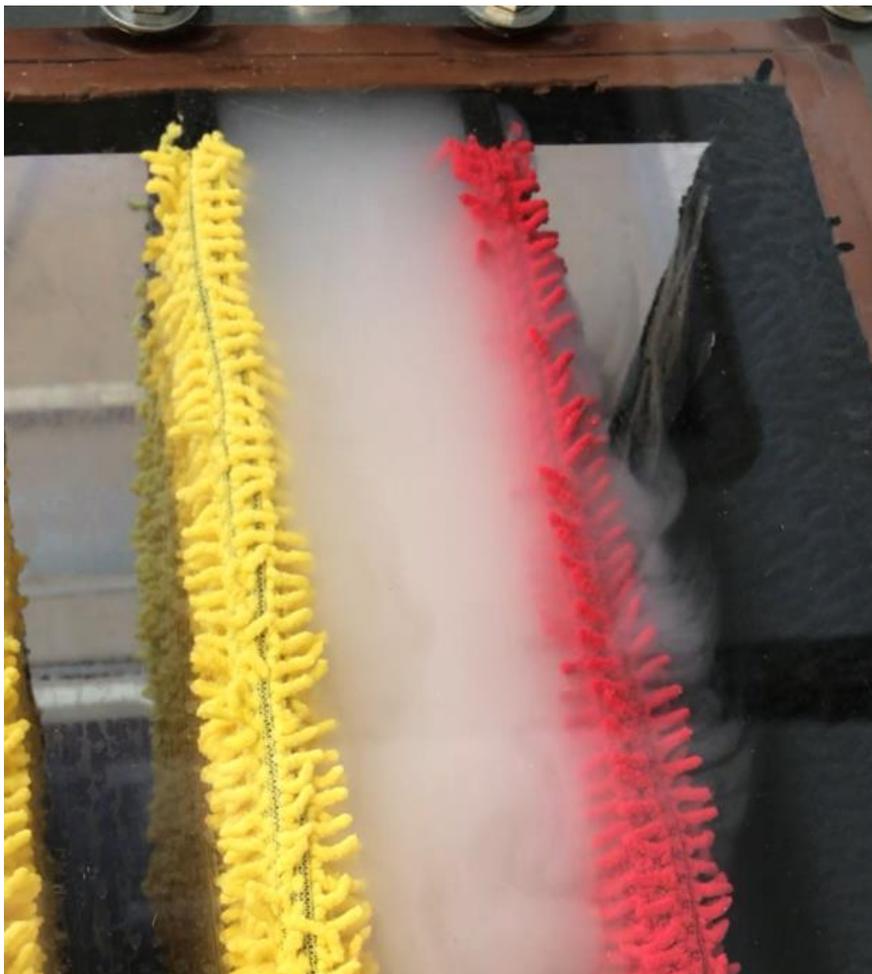
Tabelle 1 zeigt die gemessenen Verweilzeiten.

*Tabelle 1: Verweilzeit labortechnische Anlage ohne Textilien, mit trockenen Textilien und mit feuchten Textilien (Quelle: Stahlhacke, Abschlussarbeit, 2019)*

	Verweilzeit [s]		
	15 m <sup>3</sup> /h	20 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h
ohne Textilien	35	21	16
Mit trockenen Textilien	28,7	22	14
Mit feuchten Textilien	34	24	15

Es ist auffällig, dass die Unterschiede zwischen leer, trocken und feucht relativ gering sind und dass die Verweilzeiten ausschließlich vom Volumenstrom abhängen.

Parallel zu den Messungen wurden auch Strömungsuntersuchungen mit Hilfe einer Nebelmaschine durchgeführt. Dies wird in nachstehendem Bild dargestellt.



*Abbildung 8: Nebelversuch zur Erfassung des Strömungsverhaltens in einzelnen Strömungskanälen*

## 4.1.2 Druckverluste

### Versuchsdurchführung

In diesem Versuch soll der Druckverlust des Versuchsreaktors für die Volumenströme 15 m<sup>3</sup>/h, 20 m<sup>3</sup>/h und 30 m<sup>3</sup>/h bestimmt werden. Gemessen wird der statische Druck in der Rohrleitung direkt vor und hinter dem Reaktor. Der Versuch wird einmal ohne Textilien, einmal mit trockenen Textilien und einmal mit feuchten Textilien durchgeführt. Als Messgerät dient ein mobiles Manometer des Modells DM9100 der Marke MRU.

### Ergebnisse

In Tabelle 2 sind die gemessenen Druckverluste dargestellt.

*Tabelle 2: Druckverluste labortechnische Anlage ohne Textilien, mit trockenen Textilien und mit nassen Textilien*

	Druckverlust [Pa]		
	15 m <sup>3</sup> /h	20 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h
Ohne Textilien	11	27	37
Mit trockenen Textilien	15,5	20	40
Mit nassen Textilien	11	15,5	32

In allen Versuchsreihen entstehen im Reaktor kaum Druckverluste. Bei den Versuchen mit nassen Textilien ist der Druckverlust ca. um ein Viertel geringer als mit trockenen Textilien.

## 4.2 Halbtechnische Anlage

### 4.2.1 Verweilzeitbestimmung mittels Tracergas

Ein wichtiger Anlagenparameter für biologische Abluftreinigungsanlagen ist die Verweilzeit  $\tau$ . Je höher die Verweilzeit ist, desto höher ist die Stoffaustauschzeit zwischen dem Abgas und dem Filtermaterial. Somit spielt die Verweilzeit neben der Schadstoffkonzentration und der Reaktionsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle beim Umsatz des Schadstoffes. Typische Verweilzeiten für Biofilter sind 30 bis 60 Sekunden und für Biowäscher wenige Sekunden. Diese Zeiten dienen als Anhaltspunkt für den untersuchten Bioreaktor.

Zur Bestimmung der Verweilzeit werden bei verschiedenen Luftvolumenströmen Tracergastests durchgeführt. Die Tests erfolgen zunächst mit trockenen Kokosfasermatten und später mit befeuchteten Matten.

### Versuchsdurchführung

Als Tracergas wird wie bei den Tracergasversuchen der labortechnischen Anlage Feuerzeuggas verwendet. An den Messpunkten der Ebene A (siehe Abbildung 9) wird der Tracer aufgegeben und mit einer Stoppuhr die Zeit gestoppt, bis mit dem FID an den zugehörigen Messpunkten der Ebene C (gleiche Höhe und gleiche Kokosfasermattenbahn wie bei Ebene A) ein schlagartiger Anstieg der Kohlenstofffracht detektiert wird. Als Beispiel wird am Punkt AX1 das Tracergas

aufgegeben und mit dem FID am Messpunkt CX1 gemessen, dann am Punkt AX2 das Tracergas aufgegeben und mit dem FID am Messpunkt CX2 gemessen usw. Die Messpunkte der Ebene A und C haben einen Abstand von 2,2 m. Somit ist die Verweilzeit über die gesamte Länge der Kokosfasermatten von 2,25 m geringfügig länger.

Jede Messung wird pro Messpunkt für eine höhere Genauigkeit dreimal wiederholt und anschließend gemittelt. Die Totzeit muss anschließend von den gemessenen Zeiten abgezogen werden. Der Versuch wird bei Ventilatorfrequenzen von 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz und 40 Hz durchgeführt. Dies entspricht Volumenströmen von 760 m<sup>3</sup>/h, 1510 m<sup>3</sup>/h, 2370 m<sup>3</sup>/h und 3180 m<sup>3</sup>/h.

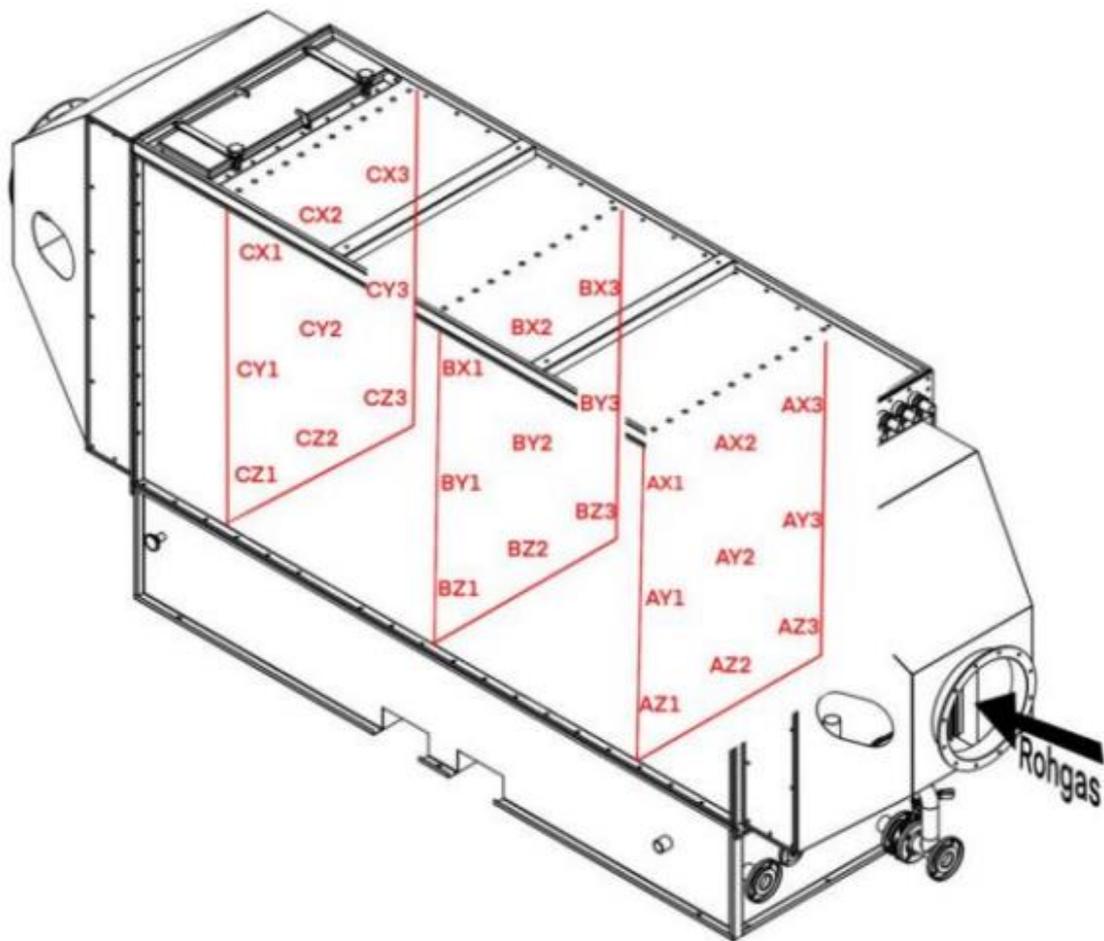


Abbildung 9: Messpunkte im Versuchsreaktor (Quelle: Maier, Abschlussarbeit, 2022)

### Ergebnisse

Die Messwerte zwischen der Ebene A und C werden pro eingestelltem Luftvolumenstrom jeweils bei trockener und nasser Fahrweise gemittelt. Ein Vergleich der gemittelten gemessenen Verweilzeiten bei trockener und nasser Fahrweise mit der theoretischen Verweilzeit zwischen der Ebene A und C ist in Abbildung 10 zu sehen.

Die theoretische Verweilzeit  $\tau$  wird dabei mit Gleichung (1) wie folgt berechnet:

$$\tau = \frac{s}{v} \quad (1)$$

Dabei ist  $s$  der Abstand zwischen der Ebene A und C und die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  wird mit Gleichung (2) bestimmt:

$$v = \frac{\dot{V}_L}{A_{\text{gesamt}} - A_{\text{verdrängt}}} \quad (2)$$

Mit:

$$A_{\text{gesamt}} = h \cdot b = 1,6\text{m} \cdot 0,9\text{m} = 1,44\text{ m}^2 \quad \text{Querschnittsfläche Reaktor}$$

$$A_{\text{verdrängt}} = 2 \cdot n_{\text{Textilbahnen}} \cdot b_{\text{Textil}} \cdot h$$

$$= 2 \cdot 11 \cdot 0,015\text{m} \cdot 1,6\text{m} = 0,912\text{ m}^2 \quad \text{verdrängte Querschnittsfläche durch Kokosfasermatten im Reaktor}$$

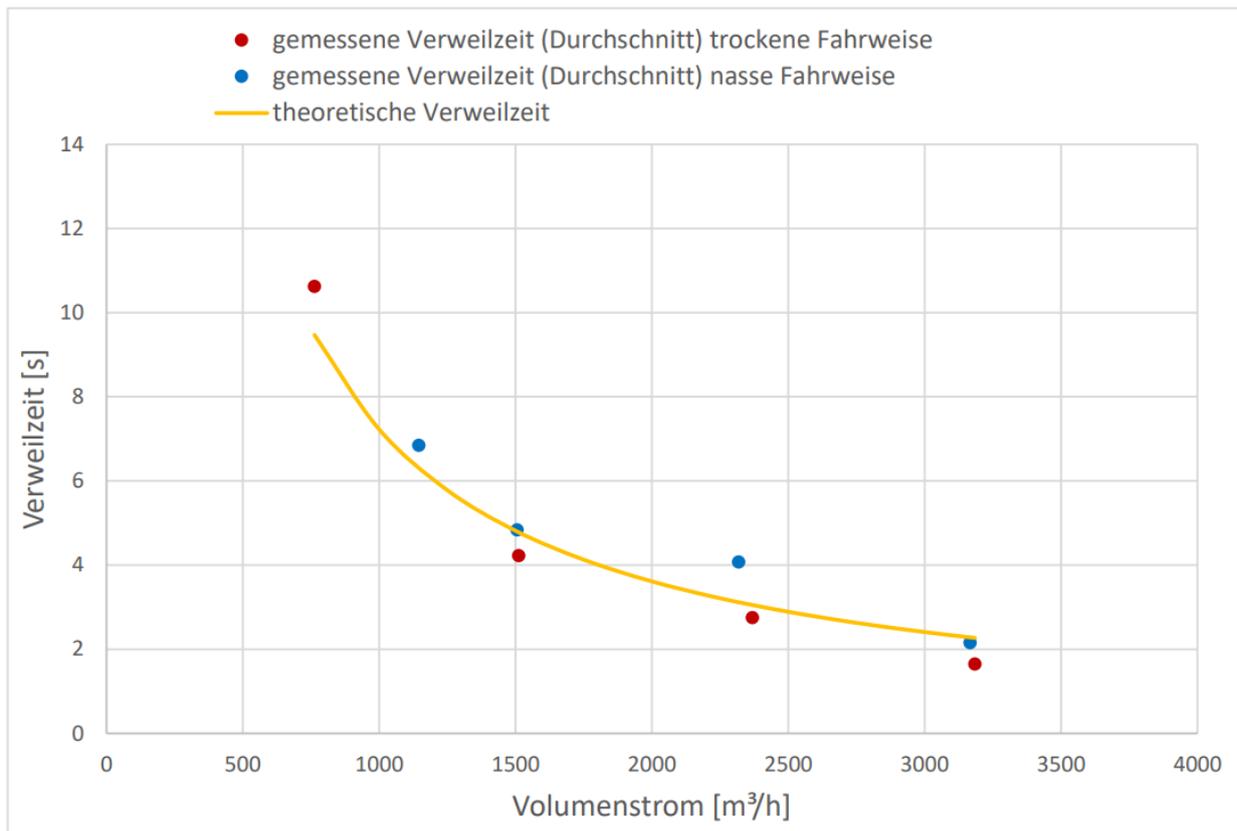


Abbildung 10: Vergleich der theoretischen und der gemessenen gemittelten Verweilzeit bei trockener und nasser Fahrweise zwischen der Ebene A und C (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

Bei steigendem Volumenstrom sinkt die theoretische Verweilzeit antiproportional. Zwischen der gemittelten gemessenen Verweilzeit und der theoretischen Verweilzeit sind die Abweichungen sehr gering. Die gemittelten Werte der Verweilzeit bei befeuchteten Kokosfasermatten entsprechen bei einem Volumenstrom von 1500 m³/h und 3170 m³/h nahezu der theoretischen Verweilzeit. Die anderen mittleren Verweilzeiten bei nasser Fahrweise sind geringfügig höher

als die theoretische Verweilzeit. Bei trockener Fahrweise ist der Mittelwert der gemessenen Verweilzeit mit Ausnahme von 760 m<sup>3</sup>/h um maximal 0,57 Sekunden niedriger als die theoretische Verweilzeit. Diese Abweichungen können jedoch auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden. Messungenauigkeiten entstehen dadurch, dass die Zeit mit einer Stoppuhr von Hand gestoppt wird. Zudem kann es zu geringen Zeitabweichungen kommen, da der Gasprobenbeutel mit dem Tracergas von Hand an das Kohlefaserrohr gehalten wird und anschließend das Tracergas durch einen Druck von Hand aufgegeben wird. Zudem stellen die 9 Messpunktpaare kein vollständig repräsentatives Bild der Strömung dar. Mehr Messpunktpaare würden zu einer höheren Genauigkeit führen, aber selbst dann könnte nicht der gesamte Reaktor modelliert werden, da es sich um einen realen Reaktor mit nichtidealer Strömung handelt.

### 4.2.2 Druckverluste

Wie bereits im Kurzbericht von August 2022 erwähnt, sind die Druckverluste sehr gering. Dies kann mit weiteren Messungen während des Anlagenbetriebs bestätigt werden. Der Druckverlust wird aus der Differenz der beiden Drucksensoren, welche vor- und nach dem Reaktor installiert sind, bestimmt. Bei einem Luftvolumenstrom von 1000 m<sup>3</sup>/h beträgt der Druckverlust gemittelt vom 9.5.23 9 Pa und steigt bei einem Luftvolumenstrom von 2000 m<sup>3</sup>/h auf 28 Pa an (gemittelt vom 5.6. und 7.6.23). Dieser geringe Druckverlust hat sich auch während des weiteren Betriebs nicht verändert. Somit wird im Vergleich zu Biofiltern, bei welchen der Druckverlust zwischen 200 und 2000 Pa pro Meter Filterhöhe liegt (Fischer, 1990), deutlich weniger Energie verbraucht und Betriebskosten können eingespart werden.

## 5 Sorptionsversuche

Ziel dieser Versuche ist es, die Sorptionsisothermen (Sorptionskurven) zu ermitteln. Die Absorption spielt in der biologischen Abluftreinigung eine entscheidende Rolle. Die Schadstoffe gelangen durch einen Absorptionsprozess aus der Gasphase in die Flüssigphase und werden dort anschließend mikrobiell umgesetzt.

### 5.1 Labortechnische Anlage

Wie im Kurzbericht vom August 2022 bereits erwähnt wurden einige Sorptionsmessungen an der labortechnischen Anlage durchgeführt. Insbesondere wurde der Einfluss verschiedener Verweilzeiten untersucht.

#### 5.1.1 Absorptionsversuche

##### Versuchsdurchführung

Die Sorptionsversuche werden bei Luftvolumenströmen von 12,5 m<sup>3</sup>/h, 20,5 m<sup>3</sup>/h und 32,1 m<sup>3</sup>/h durchgeführt. Als Lösemittel wird Ethanol verwendet. Roh- und reingasseitig wird die Ethanolkonzentration jeweils mit einem FID gemessen. Die Absorptionsversuche werden bei einer Rohgaskonzentration von 32,1 mg/m<sup>3</sup>, 20,5 mg/m<sup>3</sup> und 12,5 mg/m<sup>3</sup> durchgeführt.

## Ergebnisse

In Abbildung 11 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt.

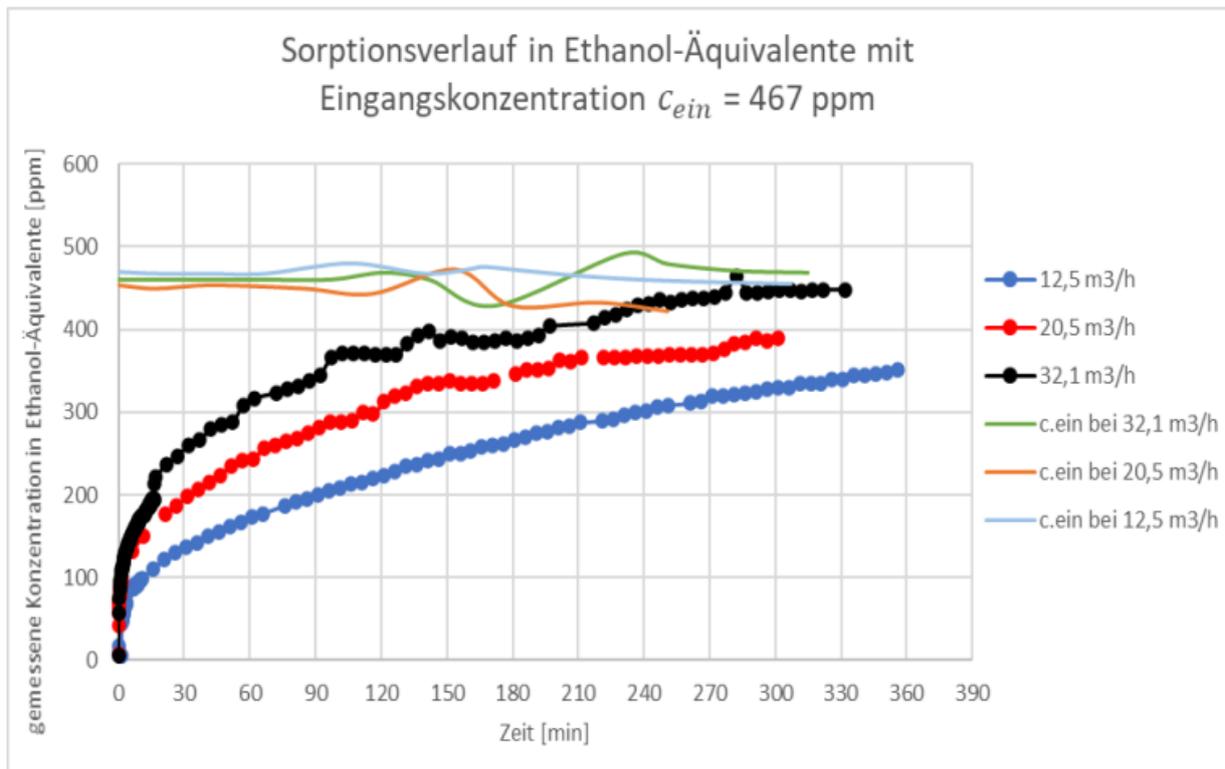


Abbildung 11: Sorptionsverlauf in Abhängigkeit von verschiedenen Verweilzeiten im Reaktor (Quelle: Görlach, Abschlussarbeit, 2022)

## Ergebnisinterpretation

Das Trägermaterial zeigte ein sehr gutes Aufnahmevermögen. Der Verlauf der Absorptionsisothermen ist bei allen Absorptionsversuchen gleich: Die Reingaskonzentration steigt zu Beginn des Versuchs stärker an und nähert sich dann asymptotisch der Rohgaskonzentration an. Werden die Konzentrationsverläufe bei den verschiedenen Volumenströmen miteinander verglichen, ist festzuhalten, dass die Kurven bei höheren Volumenströmen erwartungsgemäß insgesamt schneller ansteigen.

## 5.2 Halbtechnische Anlage

### 5.2.1 Absorptionsversuche

#### Versuchsdurchführung

Alle Sorptionsversuche werden bei einem Luftvolumenstrom  $\dot{V}_L = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$  durchgeführt. Roh- und reingasseitig wird die Ethanolkonzentration jeweils mit einem FID in bereits vorinstallierten Messlöchern im Konus vor und nach dem Wäscher im Roh- und im Reingas gemessen. Vor den Versuchen werden die Kokosfasermatten über einen Zeitraum von 1 Stunde bewässert. Während der Sorptionsversuche wird nicht bewässert. Als Lösungsmittel wird wie bereits bei der labortechnischen Anlage Ethanol verwendet. Die Absorptionsversuche werden bei einer

Rohgaskonzentration von  $500 \text{ mg/m}^3$  und  $1000 \text{ mg/m}^3$  durchgeführt. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird der Versuch bei  $500 \text{ mg/m}^3$  drei Mal und bei  $1000 \text{ mg/m}^3$  zwei Mal durchgeführt.

### Ergebnisse

In Abbildung 12 sind die Ergebnisse des Sorptionsversuchs bei einer durchschnittlichen Rohgaskonzentration von  $500 \text{ mg/m}^3$  und in Abbildung 13 bei einer durchschnittlichen Rohgaskonzentration von  $1000 \text{ mg/m}^3$  graphisch dargestellt.

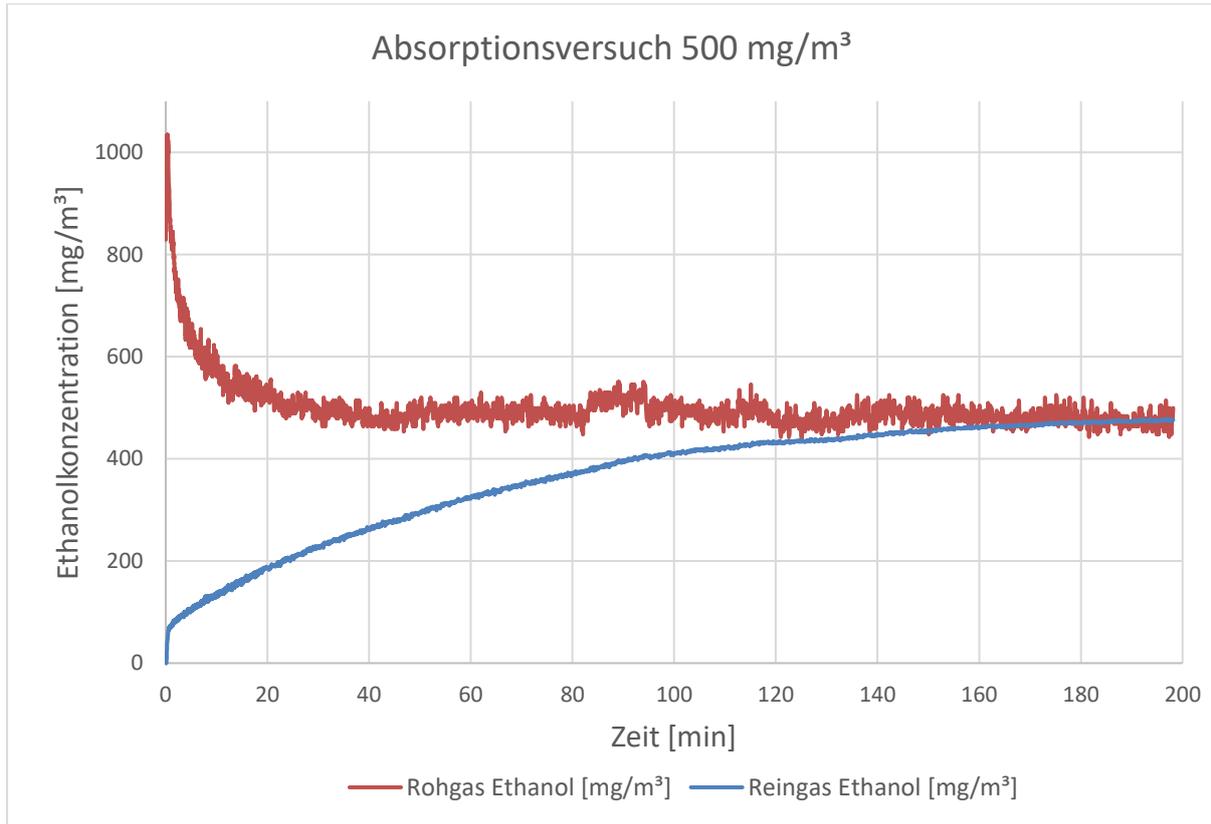


Abbildung 12: Absorptionsversuch Rohgaskonzentration  $c_{\text{Rohgas}} = 500 \text{ mg/m}^3$ , Luftvolumenstrom  $\dot{V}_L = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$  (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

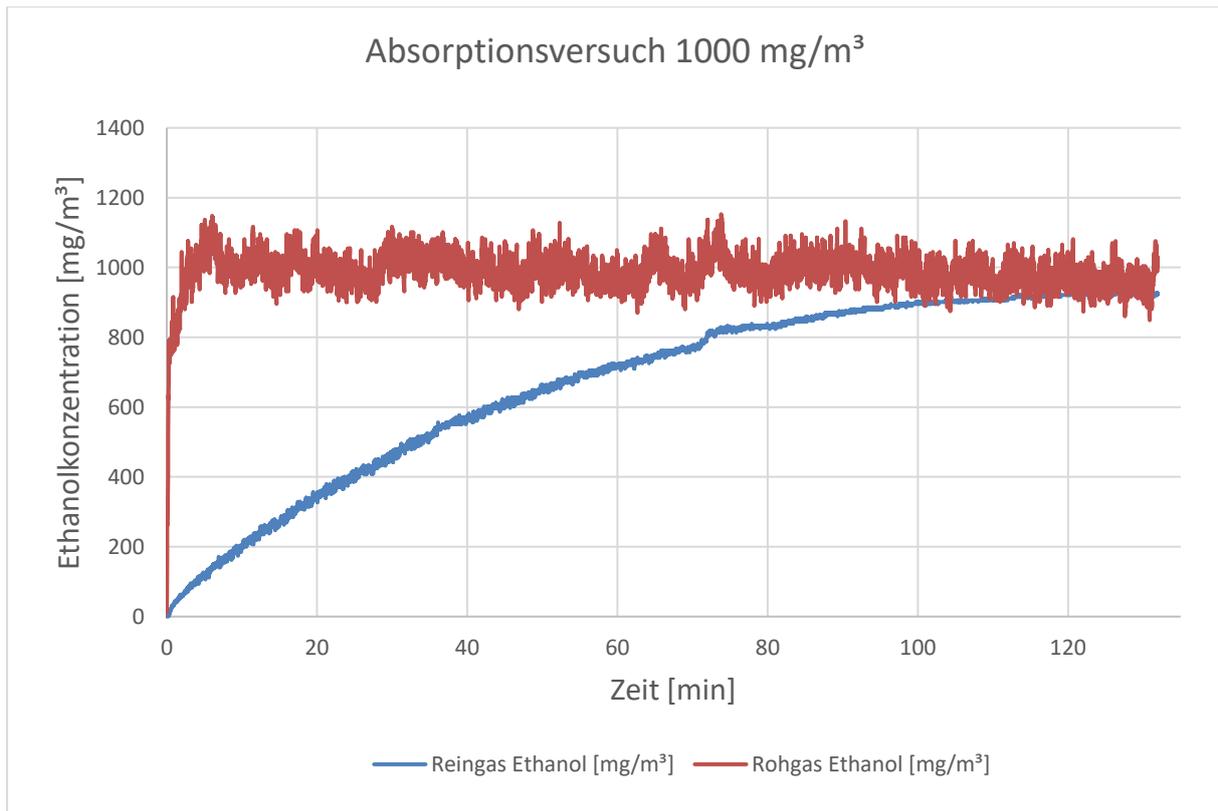


Abbildung 13: Absorptionsversuch Rohgaskonzentration  $c_{Rohgas} = 1000 \text{ mg/m}^3$ , Luftvolumenstrom  $\dot{V}_L = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ , (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

Die wiederholten Versuche weisen nahezu den gleichen Absorptionsisothermenverlauf auf, wie die Ergebnisse der Versuche, welche in Abbildung 12 und 13 dargestellt sind und bestätigen somit das Ergebnis.

### Ermittlung der Henry-Konstante H:

Zur Prüfung der Plausibilität wird die Henry-Konstante beispielhaft für die Absorptionsversuche bei einer Rohgaskonzentration von  $500 \text{ mg/m}^3$  Ethanol (Abbildung 12) und  $1000 \text{ mg/m}^3$  Ethanol (Abbildung 13) ermittelt.

#### Schritt 1: Berechnung der gelösten Ethanolkonzentration ( $C_1$ ) in der Flüssigphase auf den Matten

Zunächst wird mit Gleichung (3) die Masse an Ethanol ermittelt, welche sich auf den feuchten Kokosfasermatten gelöst hat. Die im Waschwasser gelöste Masse an Ethanol wird vernachlässigt.

$$m_{\text{Ethanol auf Matten}} = \dot{V}_L \cdot \left( \int c_{\text{Rohgas}} dt - \int c_{\text{Reingas}} dt \right) \quad (3)$$

Mit:

$\dot{V}_L$	Luftvolumenstrom [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
$c_{\text{Rohgas}}$	Rohgaskonzentration Ethanol [ $\text{mg/m}^3$ ]
$c_{\text{Reingas}}$	Reingaskonzentration Ethanol [ $\text{mg/m}^3$ ]

Die Integrale werden in Matlab von t=0 Minuten bis zum Zeitpunkt des Gleichgewichts von Rein- und Rohgaskonzentration integriert.

Eingesetzt in Gleichung (3) ergibt sich für den Absorptionsversuch bei einer Rohgaskonzentration von 500 mg/m<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{V} \cdot \left( \int_{0 \text{ min}}^{198 \text{ min}} c_{\text{Rohgas}} dt - \int_{0 \text{ min}}^{198 \text{ min}} c_{\text{Reingas}} dt \right) &= 16,67 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot (99130 - 72111) \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \cdot \text{min} \\ &= 450406,73 \text{ mg} = 450,41 \text{ g} \end{aligned}$$

Umgerechnet in mol ergibt dies mit Gleichung (4):

$$n = \frac{m}{M_{\text{Ethanol}}} = \frac{450,41 \text{ g}}{46,08 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 9,77 \text{ mol.} \quad (4)$$

Mit:

$n$	Anzahl mol
$m$	Masse [g]
$M$	Molare Masse [g/mol]

Die Matten haben eine Gesamtfläche von 79,2 m<sup>2</sup>. Experimentell wurde eine Wasserhaltekapazität der Kokosfasermatten von 1,2 l/m<sup>2</sup> ermittelt. Somit befindet sich auf den Kokosfasermatten eine Wassermenge von 79,2 m<sup>2</sup> · 1,2 l/m<sup>2</sup> = 95,04 l.

Mit der Annahme, dass sich das Ethanol auf allen Matten gleichmäßig verteilt, ergibt dies eine Konzentration von  $C_1 = \frac{9,77 \text{ mol}}{95,04 \text{ l}} = 0,102799 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ .

### Schritt 2: Berechnung des Partialdrucks $p_g$ mit Hilfe des idealen Gasgesetzes

Mit dem idealen Gasgesetz (Gleichung 5) kann der Partialdruck  $p_g$  von Ethanol bestimmt werden. Dabei ist R die universelle Gaskonstante  $\left[ \frac{\text{hPa} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$ .

$$p_{G,\text{Ethanol}} = \frac{nRT}{V} \quad (5)$$

Die einzusetzenden Werte ergeben sich wie folgt:

Zum Zeitpunkt des Gleichgewichts gilt:

Rohgaskonzentration = Reingaskonzentration = 476 mg /m<sup>3</sup> Ethanol.

Somit beträgt die Ethanolkonzentration im Reaktor durchschnittlich ebenfalls 476 mg /m<sup>3</sup>.

Daraus ergibt sich:

$$\frac{n}{V} = \frac{0,000476 \frac{\text{g}}{\text{l}}}{46,08 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,00001033 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

T = 286 K (Temperatur in der Versuchshalle zum Zeitpunkt des Versuchs)

Eingesetzt in Formel 5 ergibt dies:

$$p_{G,Ethanol} = \frac{nRT}{V} = 0,00001033 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot 83,14 \frac{\text{hPa} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 286 \text{ K} = 24,56 \text{ Pa}$$

Schritt 3: Einsetzen von  $C_1$  und  $p_g$  in das Gesetz von Henry (Gleichung 6)

Das Gesetz von Henry (Gleichung 6) besagt, dass die Konzentration eines Gases in einer Flüssigkeit proportional zum Partialdruck des Gases über der Flüssigkeit ist. Die Henry-Konstante ist dabei der Proportionalitätsfaktor.

$$p_g = H \cdot C_1 \tag{1}$$

Mit:

$p_g$  Partialdruck in der Gasphase

$C_1$  Gleichgewichtskonzentration des gelösten Gases in der Flüssigphase

$H$  Henry-Konstante (Absorptionskoeffizient)

Eingesetzt in das Gesetz von Henry ergibt sich:

$$H = \frac{p_{G,Ethanol}}{C_1} = \frac{24,56 \text{ Pa}}{0,102799 \frac{\text{mol}}{\text{l}}} = 238,93 \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{mol}}$$

Die berechnete Henry-Konstante beträgt somit  $239 \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{mol}}$ .

Analog wird die Henry-Konstante für den Absorptionsversuch bei einer Rohgaskonzentration von  $1000 \text{ mg/m}^3$  berechnet. Diese beträgt  $H = 293 \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{mol}}$ . Die gemittelte Henry-Konstante der beiden Absorptionsversuche beträgt  $\bar{H} = 266 \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{mol}}$ .

Die Absorptionsversuche bei einer Rohgaskonzentration von  $500 \text{ mg/m}^3$  Ethanol und  $1000 \text{ mg/m}^3$  Ethanol sollen miteinander verglichen werden. Dies erfolgt in Tabelle 3.

Tabelle 3: Vergleich Absorptionsversuche bei einer Rohgaskonzentration von  $500 \text{ mg Ethanol/m}^3$  und  $1000 \text{ mg Ethanol/m}^3$

	Absorptionsversuch $500 \text{ mg/m}^3$	Absorptionsversuch $1000 \text{ mg/m}^3$
Luftvolumenstrom	$1000 \text{ m}^3/\text{h}$	$1000 \text{ m}^3/\text{h}$
Durchschnittliche Rohgasmassenkonzentration $C_{m,Rohgas}$	$532 \frac{\text{mgEthanol}}{\text{m}^3}$	$987 \frac{\text{mgEthanol}}{\text{m}^3}$
Halbwertszeit	40 min	32 min
Versuchsdauer	198 min = 3h 18min	132 min = 2 h 12 min
Henry-Konstante	$239 \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{mol}}$	$293 \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{mol}}$

Bei den Absorptionsversuchen mit einer Rohgaskonzentration von  $1000 \text{ mg/m}^3$  Ethanol hat sich das Gleichgewicht von Rohgaskonzentration gleich Reingaskonzentration über eine Stunde schneller eingestellt als bei der Rohgaskonzentration von  $500 \text{ mg/m}^3$  Ethanol (siehe Tabelle 3). Die Unterschiede der berechneten Henry-Konstanten können dadurch entstehen, dass der Wassergehalt in den Matten geringe Unterschiede aufweist, obwohl vor beiden Versuchen jeweils für eine Stunde bewässert wurde.

### Ergebnisinterpretation

In den Versuchen konnte wie bereits bei den Absorptionsversuchen der labortechnischen Anlage eine gute absorbierende Wirkung nachgewiesen werden, was eine wichtige Voraussetzung für den späteren Betrieb des Bioreaktors mit Mikroorganismen ist. Der Literaturwert des Henry-Koeffizienten bei  $13^\circ\text{C}$  beträgt  $510 \text{ (Pa}\cdot\text{l)/mol}$  (Sander, 2015). Die berechneten Henry-Koeffizienten von  $239 \text{ (Pa}\cdot\text{l)/mol}$  und  $293 \text{ (Pa}\cdot\text{l)/mol}$  sind geringer als der Literaturwert von Ethanol. Da das Ethanol jedoch in dem Wasser der befeuchteten Kokosfasermatten gelöst ist, wird diese Abweichung als plausibel eingeschätzt.

## 5.2.2 Desorptionsversuche

### Versuchsbeschreibung

Die Desorptionsversuche werden bei Reingaskonzentrationen von  $480 \text{ mg/m}^3$  und bei  $950 \text{ mg/m}^3$  gestartet. Zu Beginn der Desorptionsversuche wird die Ethanoldosierung ausgeschaltet. Mit den FIDs werden die Roh- und Reingaskonzentrationen aufgezeichnet bis die Reingaskonzentration gegen Null geht. Der Luftvolumenstrom beträgt weiterhin  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### Ergebnisse

In Abbildung 14 und 15 sind die Ergebnisse der Desorptionsversuche graphisch dargestellt.

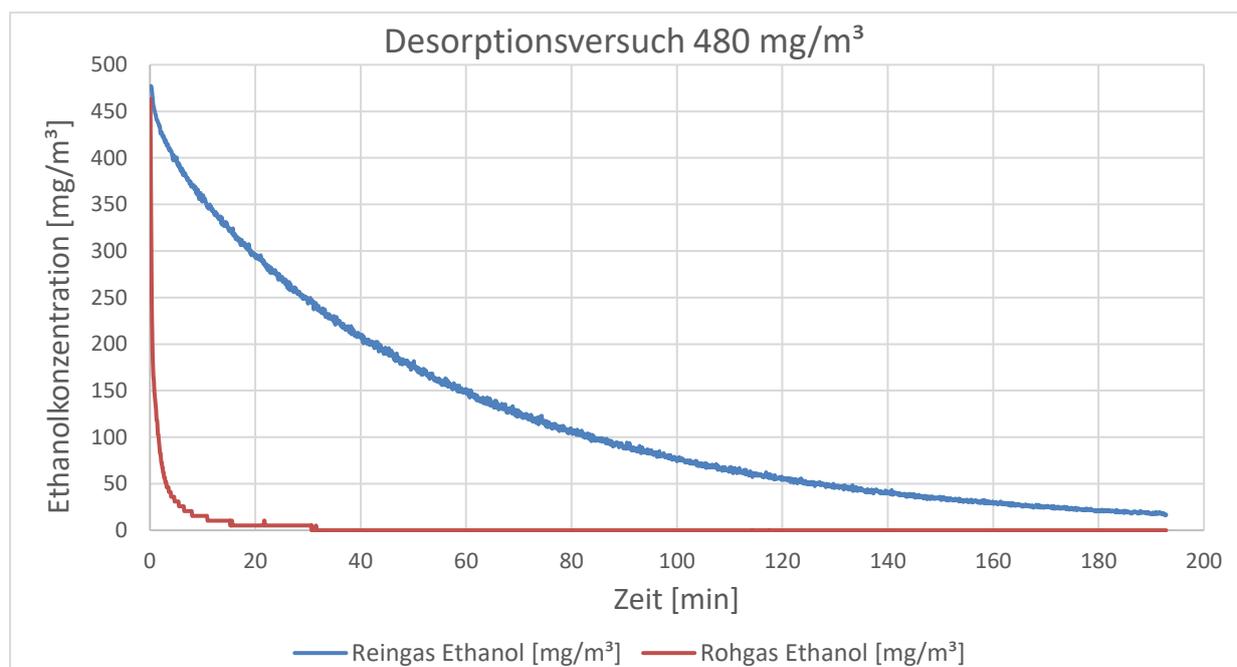


Abbildung 14: Desorptionsversuch Startkonzentration Rohgas= $480 \text{ mg/m}^3$ , Luftvolumenstrom  $\dot{V}_L=1000 \text{ m}^3/\text{h}$  (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

Nach 193 Minuten (3h 13 min) ist der Versuch abgeschlossen, da die Reingaskonzentration gegen  $0 \text{ mg/m}^3$  geht.

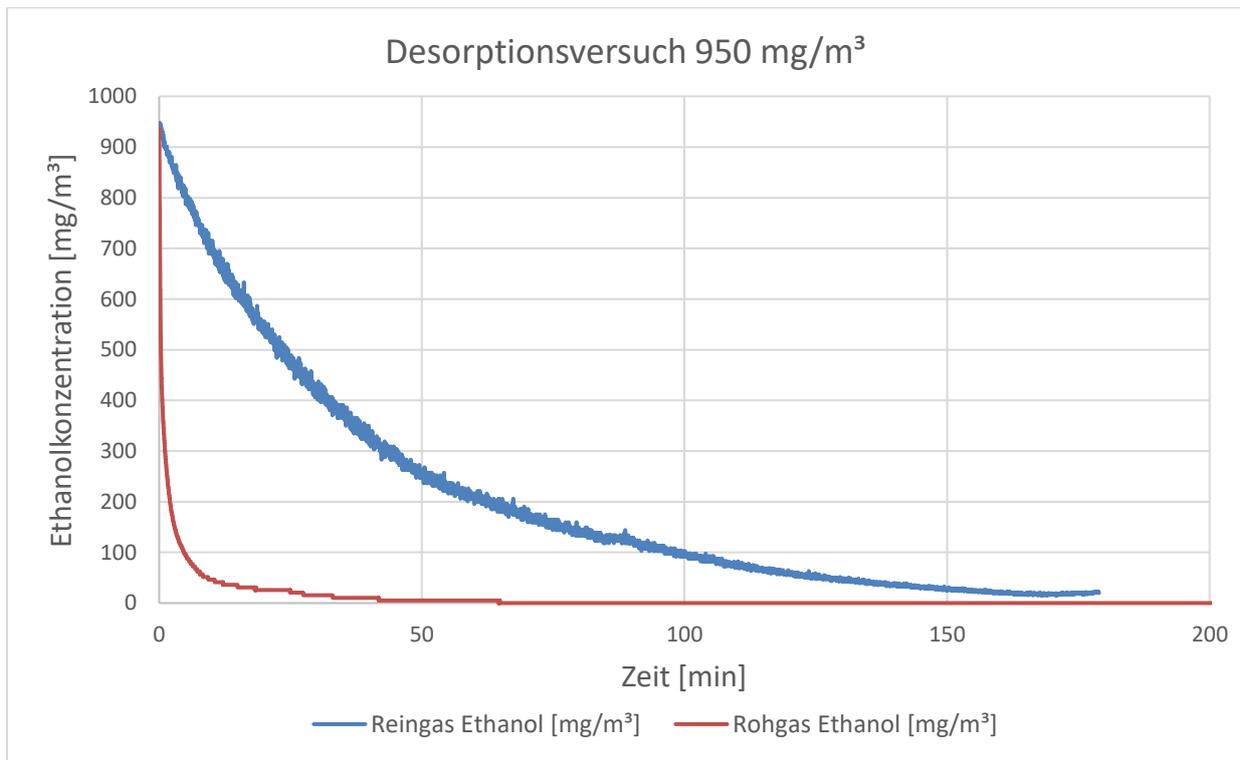


Abbildung 15: Desorptionsversuch Startkonzentration Rohgas=950  $\text{mg/m}^3$ , Luftvolumenstrom  $\dot{V}_L = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$  (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

Die Versuchsdauer beträgt 179 Minuten (2h 59 min).

Bei den Desorptionsversuchen sinkt die Reingaskonzentration zunächst schneller ab und nähert sich dann asymptotisch  $0 \text{ mg/m}^3$  an. Die Desorptionsversuche werden nach ca. 3 Stunden beendet, da die Reingaskonzentration bereits nahe  $0 \text{ mg/m}^3$  liegt. Es hätte jedoch noch einige Zeit gedauert, bis die Reingaskonzentration tatsächlich auf  $0 \text{ mg/m}^3$  gesunken wäre, da zum Ende des Versuchs die Reingaskonzentration nur noch sehr langsam gesunken ist.

Fehler können dadurch auftreten, dass die Matten über den Versuch hinweg immer mehr ausgetrocknet sind. Die Matten zwischendurch zu bewässern war nicht möglich, da das Wasser Ethanol abgespült hätte. Nach den Absorptions- und direkt folgenden Desorptionsversuchen sind einige Stellen der Kokosfasermatten trocken.

## 6 Anlagenbetrieb mit Mikroorganismen

In diesem Kapitel geht es um die Versuche zur biologischen Abluftreinigung mit synthetischer Abluft. Als Lösemittel wurden an beiden Versuchsanlagen Ethanol, 2-Butanon und Ethylacetat verwendet. Zudem wurde an der labortechnischen Anlage Aceton und an der halbtechnischen Versuchsanlage ein Lösemittelgemisch erprobt.

Zu Beginn werden die Trägermaterialien mit Belebtschlamm, bzw. Rücklaufschlamm aus der Kläranlage angeimpft und Mikroorganismen auf den Kokosfasermatten angezüchtet. Danach wird in verschiedenen Versuchsphasen mit variierenden Versuchseinstellungen die Effizienz der Versuchsanlagen bestimmt.

### 6.1 Labortechnische Versuchsanlage

#### 6.1.1 Allgemeine Betriebsweise

Durch die Temperaturdifferenz von Rohgas und Reingas, findet trotz 100 % relativer Luftfeuchte ein Wasseraustrag statt. Aufgrund dieses Wasseraustrags aus dem Versuchsreaktor, werden die Textilbahnen 3-mal pro Woche mit 2 bis 2,5 Litern Wasser bewässert. Zur Versorgung der Mikroorganismen mit Spurenelementen, wie Natrium, Phosphor und Stickstoff, wird dem Wasser vor der Bewässerung ein volllösliches Nährsalz zugemischt.

#### 6.1.2 Animpfen der Textilmatten

Die aus Polypropylen (PP) bestehende Textilmatten mussten, bevor der richtige Langzeitversuch begann, mit Mikroorganismen besiedelt werden. Dazu wurden am 16.01.2023 von der kommunalen Kläranlage in Rüsselsheim aus dem Belebungsbecken 40 Liter Belebtschlamm entnommen. Der Belebtschlamm wurde in den einzelnen Kanistern stehen gelassen, damit sich die Schlammflocken absetzen konnten. Anschließend wurde der Überstand über ein 200 µm-Sieb in ein 50 Liter Behälter gegeben. In diesem Filtrat konnten sich die übriggebliebenen Schwebstoffe erneut absetzen, welche durch ein erneutes Umfüllen dann dem dekantierten Überstand entnommen werden konnten. In diesem neu gewonnenen Belebtschlammfiltrat wurden die Textilmatten für eine Woche eingelegt. Während dieser Woche, wurde das Substrat kontinuierlich mit Luft begast und diskontinuierlich (alle zwei Tage) mit kleinsten Mengen Ethanol, als Kohlenstoffquelle für die Mikroorganismen, versorgt. Nach der Animpfwoche wurde durch eine optische Überprüfung mittels eines Mikroskops im Labor mikrobielle Bewegung in einer Probe des Belebtschlammfiltrats festgestellt (Conrad, Abschlussarbeit, 2023).

### 6.1.3 Biologischer Abbau verschiedener organischer Lösemittel

#### 6.1.3.1 Abbauversuche mit Ethanol

##### Versuchsdurchführung

Der erste Langzeitversuch wird bei einem Luftvolumenstrom von 20 m<sup>3</sup>/h und einer mittleren Ethanolkonzentration von 117 ppm durchgeführt.

Mit einem FID wird zuerst die Volumenkonzentration des Rohgases für 15 Minuten gemessen und anschließend, für 15 Minuten, die des Reingases. Die Messung wird über ein Aufnahmeprogramm der Firma TESTA in 1-Minute-Intervallen aufgezeichnet.

##### Bestimmung des Wirkungsgrades

Eine charakteristische Größe zur Beschreibung der Effizienz einer Abluftreinigungsanlage ist der Wirkungsgrad  $\eta$ . Dieser wird aus Roh- und Reingaskonzentration berechnet und gibt an, wie viel Prozent der ursprünglichen Konzentration im Rohgas aus der Abluft gereinigt werden:

$$\eta [\%] = \frac{c_{\text{Rohgas}} - c_{\text{Reingas}}}{c_{\text{Rohgas}}} \quad (7)$$

##### Ergebnisse

In Abbildung 16 ist der aus den Messdaten mit Gleichung (7) berechnete Wirkungsgradverlauf graphisch dargestellt.

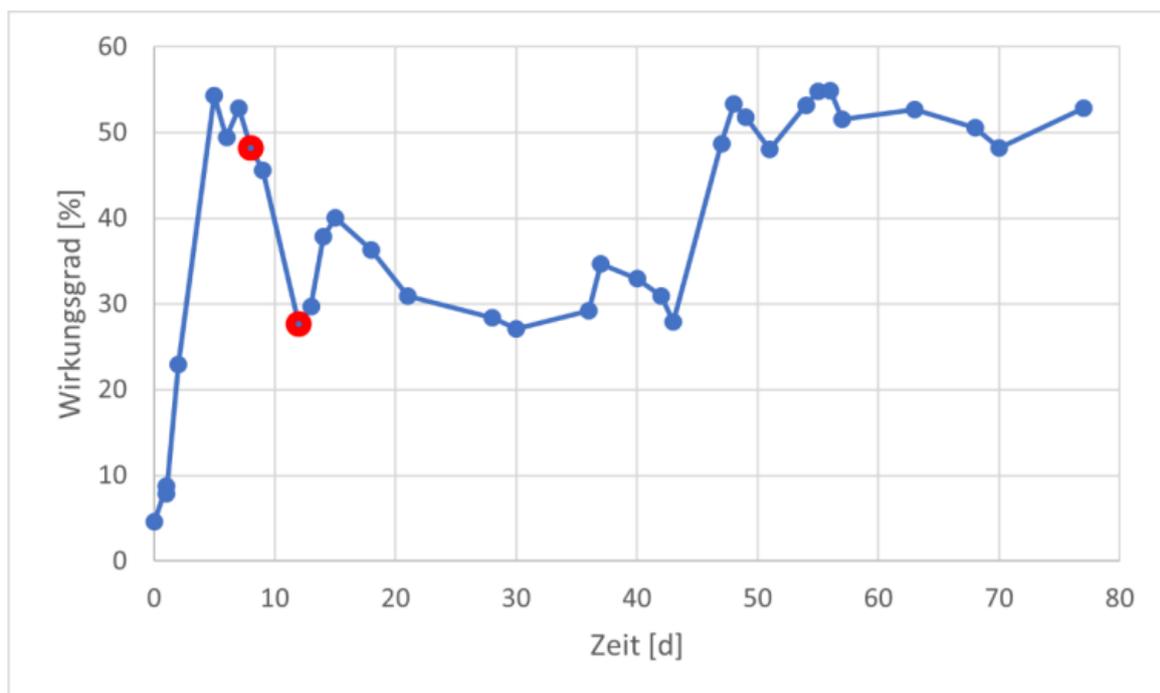


Abbildung 16: Wirkungsgradverlauf vom 25.01.2023 bis 13.04.2023 (Quelle: Conrad, Abschlussarbeit, 2023)

Der Langzeitversuch zeigte sich als effektiv. Es konnten Wirkungsgrade von über 50 % Abbauleistung des Ethanols erreicht werden. Die niedrigen Werte zwischen dem 12. Tag und

43. Tag, lassen sich durch mehrere Gründe erklären. Zum einen wurde in dieser Anfangszeit sehr wenig gedüngt. Die Versorgung des mikrobiellen Bewuchses mit notwendigen Spurenelementen war in dieser Zeit noch mangelhaft. Erst durch eine regelmäßige Düngung konnte eine Besserung erreicht werden. Zusätzlich spielt die Rohgastemperatur eine entscheidende Rolle. Mikroorganismen benötigen eine Mindesttemperatur von 10 °C, um grundlegend in Funktion zu treten. Eine diskontinuierliche (tagsüber) Beheizung des Rohgases konnte erst ab dem 45. Tag durchgeführt werden, dies hat mit einer kontinuierlichen Düngung zu einem erkennbaren Anstieg des Wirkungsgrades geführt (Conrad, Abschlussarbeit, 2023).

### 6.1.3.2 Abbauversuche mit Aceton

#### Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde analog der oben beschriebenen Methode (Kapitel 6.1.3.1) durchgeführt. Als Schadstoff wurde ein Gemisch aus Aceton und Wasser im Verhältnis 1:2,5 verwendet.

#### Ergebnisse

In Abbildung 17 ist der Verlauf des Wirkungsgrades in den ersten 14 Tagen nach der Umstellung auf Aceton als Kohlenstoffquelle dargestellt. Bei Änderungen im Bioreaktor, wie der Bereitstellung einer neuen Kohlenstoffquelle, benötigen die Mikroorganismen eine gewisse Anpassungszeit (Adaption) an die neuen Bedingungen. Direkt nach der Umstellung des Lösungsmittels sinkt der Wirkungsgrad auf 3 % ab, steigt danach schnell wieder an und erreicht nach acht Tagen ein stabiles Abbauniveau mit einem Wirkungsgrad von über 40%.

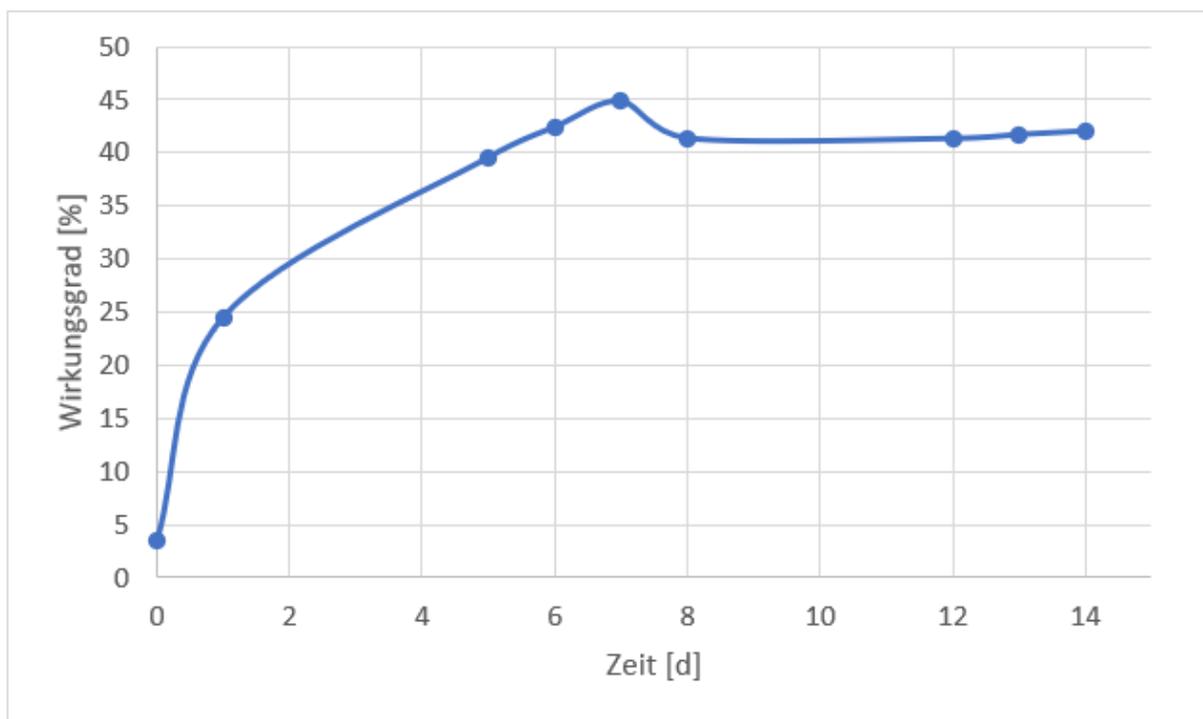


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf des Acetonabbaus in den ersten 14 Tagen nach Umstellung des Lösemittels (Quelle: Kreinbihl, Abschlussarbeit, 2023)

### 6.1.3.3 Abbauversuche mit Ethylacetat

#### Versuchsdurchführung

Der Versuch wird analog zu der in Kapitel 6.1.3.1 beschriebenen Methode durchgeführt. Als Schadstoff wurde unverdünntes Ethylacetat eingebracht.

#### Ergebnisse

In Abbildung 18 ist der Verlauf des Wirkungsgrades in den ersten 13 Tagen nach der Umstellung auf Ethylacetat als Kohlenstoffquelle dargestellt. Anders als bei der Umstellung von Ethanol auf Aceton ist bei der Umstellung von Aceton auf Ethylacetat keine Adaptionphase zu beobachten. Unmittelbar nach der Umstellung auf Ethylacetat zeigt der Bioreaktor ein stabiles Abbauniveau mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 50%.

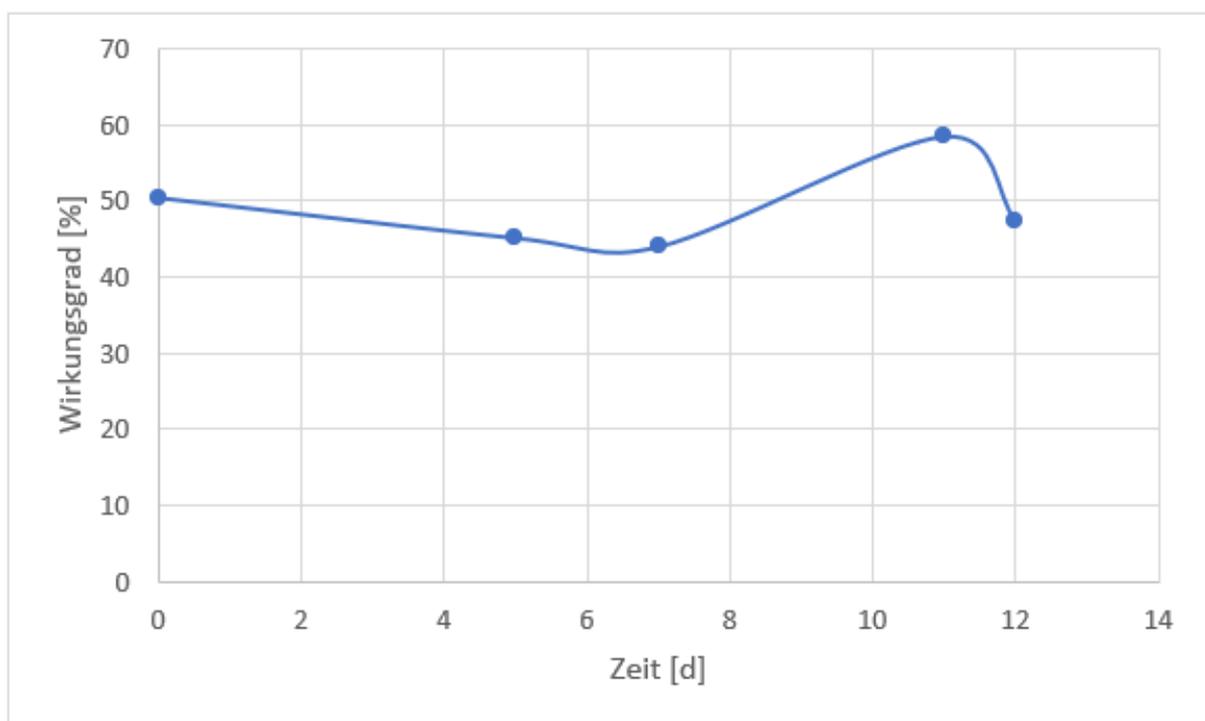


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf des Ethylacetatabbaus in den ersten 14 Tagen nach Umstellung des Lösemittels (Quelle: Kreinbühl, Abschlussarbeit, 2023)

Der Abfall des Wirkungsgrades von Tag 11 auf Tag 12 ist auf eine zu geringe Bewässerung und Nährsalzzugabe zurückzuführen.

### 6.1.4 Vergleich der drei Lösemittel

Mit den oben durchgeführten Versuchen konnte für jedes Lösemittel ein biologischer Abbau im Bioreaktor gezeigt werden. Es konnten jeweils Wirkungsgrade von über 40 und teilweise über 50 % erzielt werden. Der Bioreaktor hat innerhalb von kürzester Zeit die Adaption an verschiedene Stoffklassen (Alkohol, Keton und Ester) als auch auf den Wechsel von vollständig mit Wasser mischbaren Substanzen (Ethanol und Aceton) zum nur mäßig wasserlöslichen Ethylacetat geschafft.

### 6.1.5 Dokumentation Bewuchs

In Abbildung 19 ist der im April 2023 entstandene Bewuchs zu sehen. Dieser ist weiß mit einigen dunkleren Stellen. Im Laufe der Versuche hat der Bewuchs noch deutlich zugenommen und sich farblich mehrfach verändert.



Abbildung 19: Bewuchs 12.04.23 (Quelle: Conrad, Abschlussarbeit, 2023)

## 6.2 Halbtechnische Versuchsanlage

### 6.2.1 Allgemeine Betriebsweise

#### Nährstoffe

Bei einem Verhältnis von C (Kohlenstoff):N (Stickstoff):P (Phosphor) von 100:5:1 bis 100:10:1 findet ein optimaler Abbau statt (VDI 3478, Blatt 2). Den Kohlenstoff erhalten die Mikroorganismen aus der Abluft, die weiteren Spurenelemente müssen zugegeben werden. Während dieser Arbeit wird als Düngemittel ein volllösliches Nährsalz verwendet.

#### Bewässerung

Bei der Anlage kann je nach Einstellung der Bewässerung zwischen einer auswaschenden Fahrweise der Schadstoffe aus den Kokosfasermatten und der reinen Aufrechterhaltung der Feuchtigkeit wie bei Biofiltern gewechselt werden. Während dieses Projekts ist die Bewässerung so eingestellt, dass die Matten zu keinem Zeitpunkt austrocknen und somit immer ein feuchtes Milieu für die Mikroorganismen besteht. Es wird ein automatisches Bewässerungsprogramm

installiert. In 15 Minuten-Intervallen kann für jeden Wochentag eingestellt werden, wann bewässert wird. Das verwendete Bewässerungsprogramm ist in Abbildung 20 dargestellt.



Abbildung 20: Verwendetes Bewässerungsprogramm

In dem Programm wird die Bewässerung insgesamt pro Tag über einen Zeitraum von 3 Stunden und 15 Minuten eingeschaltet. Im Laufe des Betriebs wurde das Bewässerungsprogramm mehrfach geändert. Für den späteren Betrieb wären Bewässerungsintervalle in gleichmäßigen Abständen optimal.

### Verdunstung des Waschwassers

Während des Betriebs der Anlage ist die Verdunstungsrate des Waschwassers aufgrund des nicht vorbefeuchteten, vorbeiströmenden Luftvolumenstroms hoch. Deshalb wird die Wasservorlage 2- bis 3-mal pro Woche mit Frischwasser nachgefüllt. Zur Bestimmung der Verdunstungsrate wird über mehrere Tage zur selben Uhrzeit die Füllstandshöhe gemessen und über die Füllstandshohendifferenzen pro Tag die Verdunstungsrate berechnet. Bei einem Luftvolumenstrom von 1000 m<sup>3</sup>/h und einer Hallentemperaturen von 15°C sind ca. 90 Liter pro Tag verdunstet und bei Temperaturen von 20 °C bereits über 150 Liter pro Tag.

### **6.2.2 Animpfen der Kokosfasermatten**

Zur Besiedlung der Kokosfasermatten mit Mikroorganismen wird Rücklaufschlamm aus der Kläranlage verwendet. Dieser weist eine hohe Konzentration an Mikroorganismen auf. Aus dem Lehr- und Forschungsklärwerk des ISWAs werden am 22.03.2023 20 Liter Rücklaufschlamm entnommen. Damit sich die Schlammflocken absetzen werden die Kanister für 2 Stunden stehen gelassen. Anschließend wird der klare Überstand (insgesamt 10,7 Liter) durch die Begehungsluke in die Waschwasservorlage gegeben. Zur Verteilung der Mikroorganismen auf den Matten wird die Bewässerung für 2 Stunden eingeschaltet. Da nach 2 Wochen noch keine Mikroorganismen zu erkennen sind und kein Abbau stattfindet, wird am 05.04.2023 erneut Rücklaufschlamm aus der Kläranlage zugegeben. Es werden ca. 15 Liter Überstand des Rücklaufschlammes in die Waschwasservorlage gegeben.

Der Luftvolumenstrom beträgt 1000 m<sup>3</sup>/h und die Ethanolkonzentration im Rohgas wird auf 500 mg/m<sup>3</sup> eingestellt. Mit einem FID wird die Roh- und Reingaskonzentration gemessen. Am 25.04.2023 ist zum ersten Mal ein Bewuchs sichtbar.

### 6.2.3 Biologischer Abbau verschiedener organischer Lösungsmittel

An der halbtechnischen Versuchsanlage werden bei variierenden Rohgaskonzentrationen und Luftvolumenströmen für die Lösemittel Ethanol, 2-Butanon, Ethylacetat und ein Lösemittelgemisch die Reinigungseffizienz ermittelt. In den Kapiteln 6.2.3.1 bis 6.2.3.3 sind für ausgewählte Versuche die Ergebnisse dargestellt. In Kapitel 6.2.4 werden die Ergebnisse aller Versuche zusammengefasst. Gemessen wird die Rein- und Rohgaskonzentration jeweils mit einem FID und einem FTIR. Damit können die Messwerte der unterschiedlichen Messmethoden gegenseitig überprüft werden.

#### 6.2.3.1 Abbauversuche mit Ethanol

##### Versuchsdurchführung

Begonnen wird in der 1. Versuchsphase (27.04.2023 bis 15.05.2023) mit einer Ethanolkonzentration im Rohgas von 260 mg/m<sup>3</sup> bei einem Luftvolumenstrom von 1000 m<sup>3</sup>/h.

##### Ergebnisse

Am 5.5.2023 (Phase 1, Tag 9) wird zum ersten Mal ein Abbau mit einem Wirkungsgrad von ca. 80 % gemessen. Bis zum 8.5.2023 ist dieser auf über 95 % angestiegen. In Abbildung 21 ist als Beispiel vom 10.5.2023 die Ethanol Roh- und Reingaskonzentration dargestellt.

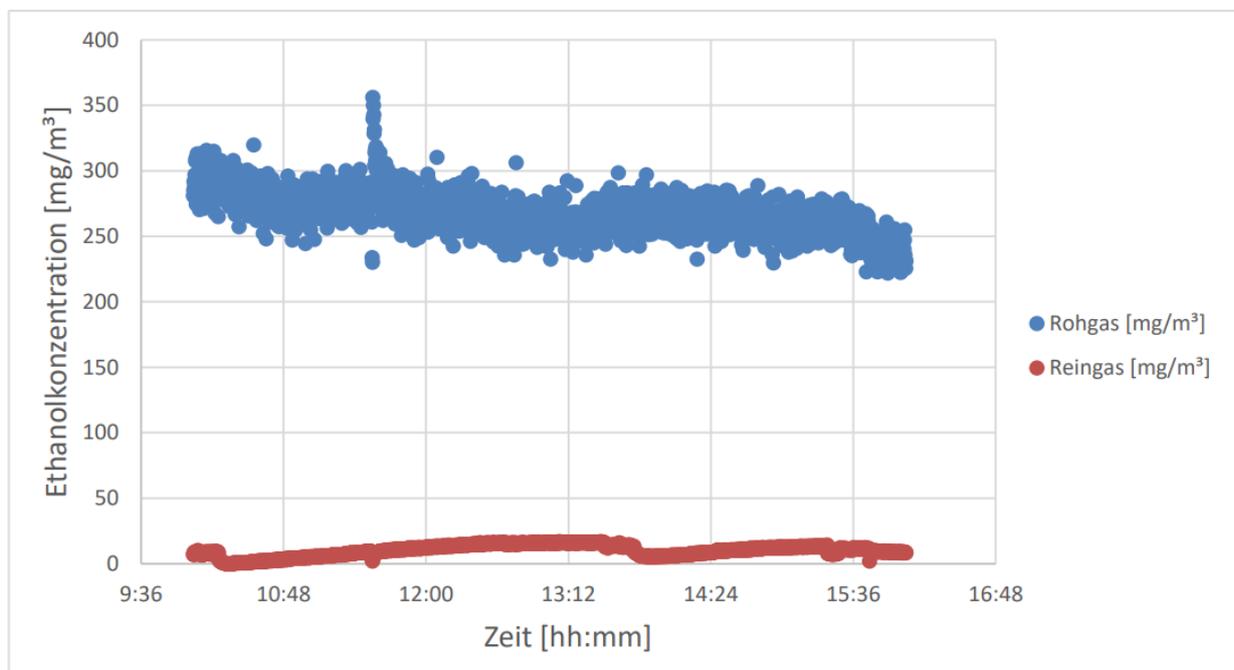


Abbildung 21: Roh- und Reingaskonzentrationen für eine Belastung mit Ethanol von 260 mg/m<sup>3</sup> und einem Volumenstrom von 1000 m<sup>3</sup>/h (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

Da in der ersten Versuchsphase ein sehr hoher Wirkungsgrad erzielt wurde, wird die Rohgaskonzentration in der 2. Versuchsphase auf  $370 \text{ mg/m}^3$  erhöht. Der Luftvolumenstrom beträgt weiterhin  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Mit einem FTIR werden die Roh- und Reingaskonzentrationen von Ethanol in  $\text{mg/m}^3$ ,  $\text{CO}_2$  in ppm und potenziellen Zwischenprodukten gemessen.

In Abbildung 22 ist die gemessene Roh- und Reingaskonzentration von Ethanol graphisch dargestellt:

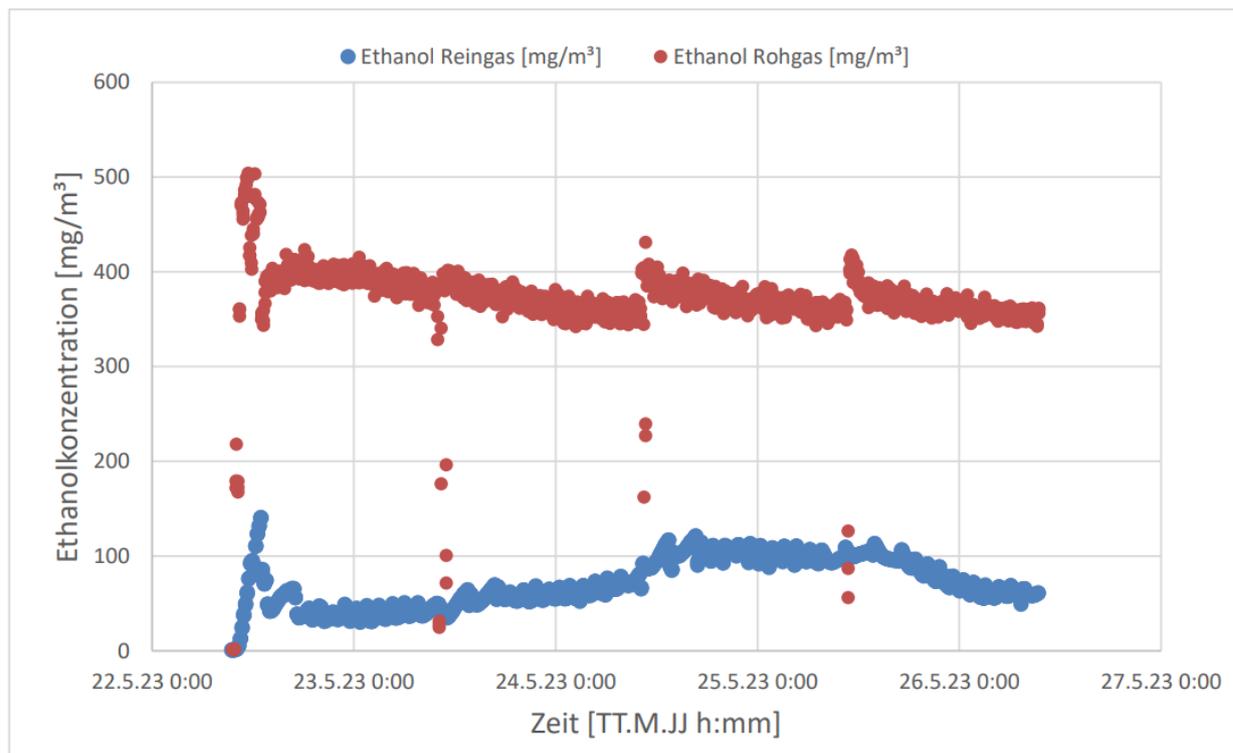


Abbildung 22: Roh- und Reingaskonzentrationen für eine Belastung mit Ethanol von  $370 \text{ mg/m}^3$  und einem Volumenstrom von  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

Nach ca. 8 Stunden stellt sich ein Wirkungsgrad von ca. 90 % ein. Ab dem 23.5.2023 nach der Bewässerung um 10:15 (Tag 2) sinkt der Wirkungsgrad bis zum Mittag am 24.5.2023 auf knapp über 70 % ab und steigt anschließend wieder bis zum 26.5.2023 auf über 80% an. Es wird kein Zwischenprodukt in höheren Konzentrationen gemessen. Die entstandene Acetaldehydkonzentration beträgt immer unter  $5 \text{ mg/m}^3$ .

### Messung der $\text{CO}_2$ -Konzentration im Roh- und Reingas

In Abbildung 23 ist die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Roh- und Reingas von Versuchsphase 2 dargestellt und die daraus berechnete  $\text{CO}_2$ -Differenz.

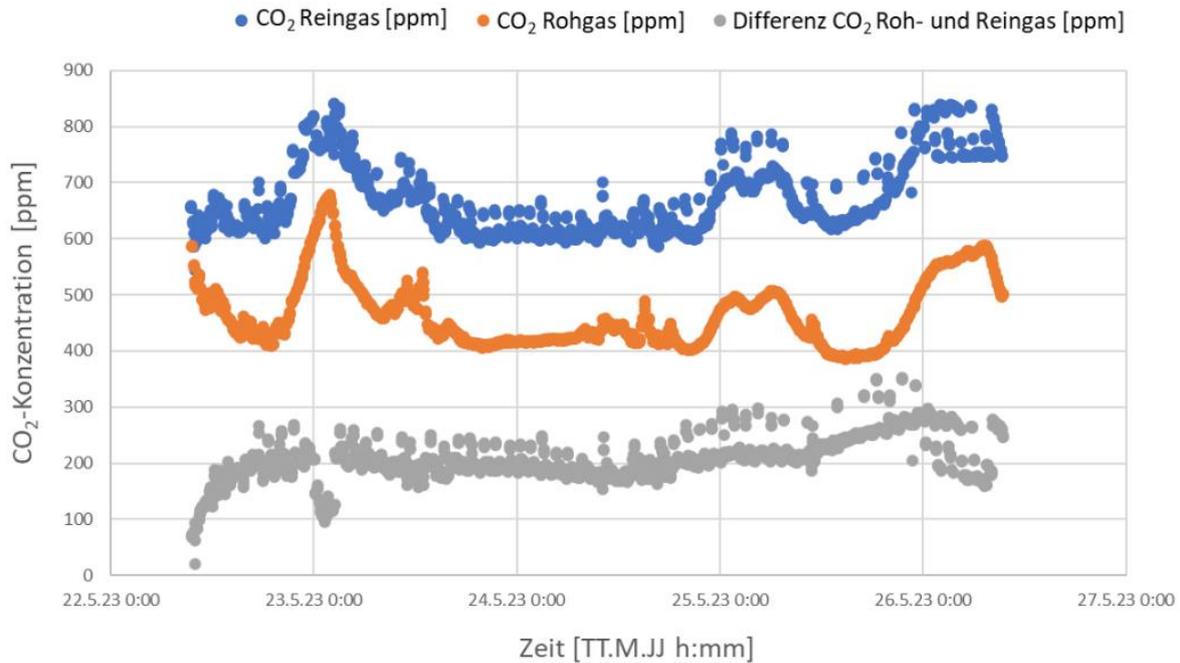


Abbildung 23: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von Roh- und Reingas (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

Nach dem Einschalten der Dosierung steigt die CO<sub>2</sub>-Differenz von Rein- und Rohgas im Mittel auf 208 ppm an. Das heißt, dass der Wirkungsgrad tatsächlich auf eine Mineralisierung des Ethanol zurückzuführen ist. Auffallend sind Schwankungen in der Rohgaskonzentration. Bei der Überprüfung mit den Messwerten der Außenluft fällt auf, dass die Schwankungen auch im Freien messbar sind. Die Differenz aus Roh- und Reingas bleibt jedoch trotz der Schwankungen nahezu konstant.

### 6.2.3.2 Abbauversuche mit 2-Butanon

Nach dem Abschluss der Versuche für das Lösemittel Ethanol werden einige Versuche für das Lösemittel 2-Butanon durchgeführt. In Abbildung 24 ist als Beispiel die Roh- und Reingaskonzentration von 2-Butanon bei einem Luftvolumenstrom von 430 m<sup>3</sup>/h dargestellt.

Aufgrund der Charakteristik des Lösemittels musste die Dosierung umgestellt werden. Dies hatte zur Folge, dass die Rohgaswerte stärker schwanken. Trotz der etwas größeren Schwankungsbreite bleiben die Ergebnisse belastbar.

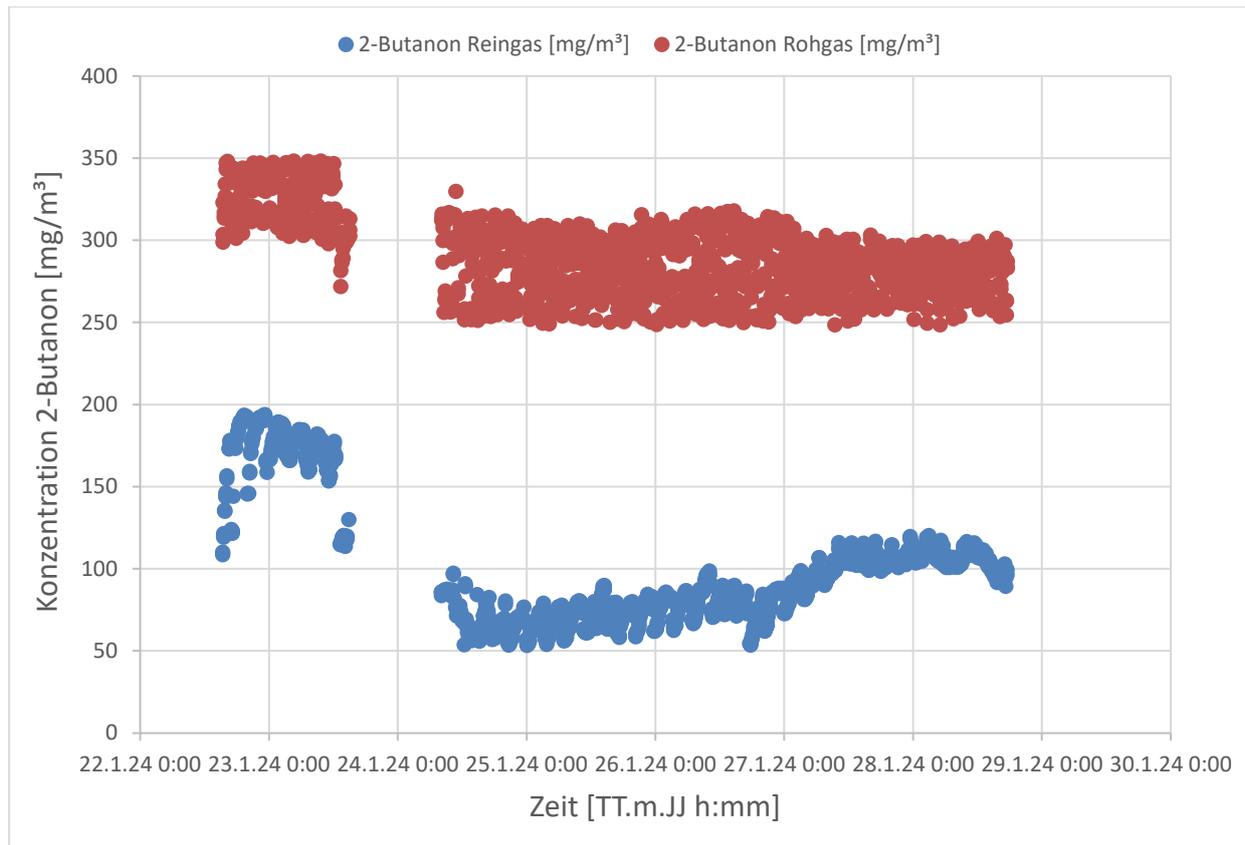


Abbildung 24: Roh- und Reingaskonzentrationen für eine Belastung mit 2-Butanon von  $290 \text{ mg/m}^3$  und einem Volumenstrom von  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$

Der Wirkungsgrad beträgt im Durchschnitt 65 %. Die höchsten Werte mit einem Wirkungsgrad von über 80 % wurden am 24.05.24 gemessen. Anschließend ist der Wirkungsgrad wieder gesunken und beträgt am 28.05.24 knapp über 60 %.

### 6.2.3.3 Abbauversuche mit einem Lösemittelgemisch auf 2-Butanonbasis

Da in der Industrie häufig Lösemittelgemische zum Einsatz kommen, wurde die Reinigungsleistung abschließend für ein reales industrielles Lösemittelgemisch untersucht. Das verwendete Lösemittelgemisch besteht laut Sicherheitsdatenblatt im Wesentlichen zu etwa 90% aus 2-Butanon. Der Rest sind nicht weiter benannte Kohlenwasserstoffe.

In Abbildung 25 ist die Roh- und Reingaskonzentration des realen Lösemittelgemischs bei einer durchschnittlichen Rohgaskonzentration von  $130 \text{ mg C /m}^3$  und einem Luftvolumenstrom von  $430 \text{ m}^3/\text{h}$  dargestellt. Das Dosierverfahren aus 6.2.3.2 wurde übernommen. Auch hier haben die Rohgaswerte eine gewisse Streuung.

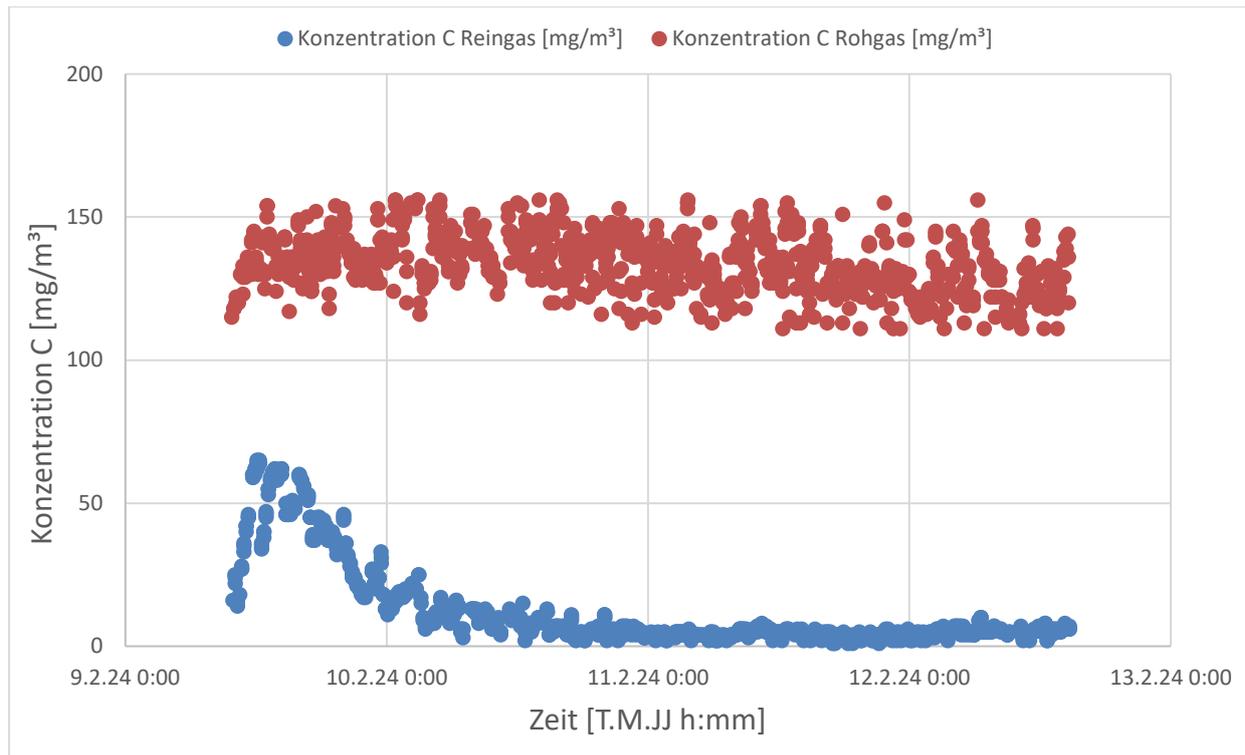


Abbildung 25: Roh- und Reingaskonzentrationen für eine Belastung mit einem Lösemittelgemisch auf 2-Butanon-Basis von  $130 \text{ mgC/m}^3$  und einem Volumenstrom von  $430 \text{ m}^3/\text{h}$

Der durchschnittliche Wirkungsgrad beträgt etwa 90 %. Folglich ist das verwendete Lösemittelgemisch mit dem Bioreaktor bei den oben genannten Versuchseinstellungen sehr gut biologisch abbaubar und der Abbau wird durch die zum 2-Butanon zugemischten Komponenten nicht behindert, bzw. gehemmt.

## 6.2.4 Vergleich der Versuchsphasen und Ergebnisinterpretation

In Tabelle 5 sind alle Versuchsphasen mit den wichtigsten eingestellten und berechneten Parametern gelistet.

Tabelle 4: Tabellarischer Vergleich verschiedener Versuchsphasen und Lösemittel

Phase	Lösemittel	Lösemittelkonzentration	Volumenstrom $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /h]	Wirkungsgrad [%]
1	Ethanol	260 [mg/m <sup>3</sup> ]	1000	>95
2	Ethanol	370 [mg/m <sup>3</sup> ]	1000	80
3	Ethanol	370 [mg/m <sup>3</sup> ]	2000	55
4	2-Butanon	135 [mg/m <sup>3</sup> ]	1000	>80
5	2-Butanon	125 [mg/m <sup>3</sup> ] 160 [mg/m <sup>3</sup> ]	1000	>95% >85%
6	Ethylacetat	18 [mg/m <sup>3</sup> ]	1000	80
7	Ethylacetat	28 [mg/m <sup>3</sup> ]	1000	70
8	Ethylacetat	40 [mg/m <sup>3</sup> ]	1000	45
9	2-Butanon	290 [mg/m <sup>3</sup> ]	430	65
10	*Lösemittel-gemisch 1	130 [mgC/m <sup>3</sup> ]	430	90
11	*Lösemittel-gemisch 1	110 [mgC/m <sup>3</sup> ]	1000	50
12	*Lösemittel-gemisch 1	120 [mgC/m <sup>3</sup> ]	2000	16
13	*Lösemittel-gemisch 1	230 [mgC/m <sup>3</sup> ]	1000	25

\*Lösemittelgemisch 1: besteht zu über 90% aus 2-Butanon und zu 5-10% aus Ethylacetat

Abschließend ist zu sagen, dass auch bei der halbtechnischen Anlage für alle getesteten Lösemittel ein biologischer Abbau stattgefunden hat. Es konnten sehr vielversprechende Wirkungsgrade erzielt werden.

Es war auffällig, dass die Abbauleistungen der halbtechnischen Anlage zum Teil deutlich über den Wirkungsgraden der Laboranlage lagen. Dies kann unter anderem mit der etwas schlechteren Befeuchtung und Nährstoffzugabe erklärt werden.

### 6.2.5 Dokumentation Bewuchs

In Abbildung 26 sind für einen besseren Vergleich unbesiedelte Kokosfasermatten dargestellt.



Abbildung 26: Unbesiedeltes Trägermaterial zu Beginn der Versuche (Quelle: Maier, Abschlussarbeit, 2022)

Zu Beginn ist durchsichtig glänzender Bewuchs gewachsen, welcher nach ein paar Wochen weißlich wurde (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27: Bewuchs auf den Kokosfasermatten (Quelle: Wolf, Abschlussarbeit, 2023)

Der gewachsene mikrobielle Bewuchs ist homogen. Mit dem Auge sind keine Pilzmyzele erkennbar. Es ist kein übermäßiger Bewuchs entstanden und somit auch kein Zuwachsen (Clogging).

## 7 Keimbelastung

Neben Kohlenstoffdioxid und Wasser können Biofilter als sekundäre Emissionen auch Bioaerosole freisetzen. Dazu gehören auch potentielle Krankheitserreger und Pilze, die Sporen und Mykotoxine produzieren. Diese können sich nachteilig auf die menschliche Gesundheit und das Ökosystem auswirken. Daher wurden Versuche durchgeführt, um die Bioaerosol-Emissionen des Biofilters quantitativ bestimmen zu können.

### 7.1 Labortechnische Anlage

#### Durchführung

Um die Keimbelastung in der Abluft des Bioreaktors bestimmen zu können, wurden Agar-Platten in den Rohrleitungen des Kamins exponiert. Als Nährmedium wurde Lysogeny-Broth-Medium (LB-Medium) verwendet. Die Agar-Platten wurden über Kopf geöffnet, etwa 25 cm tief in das

Rohr eingebracht, um 90° gekippt, sodass die Agar-Fläche frontal in den Luftstrom zeigte und anschließend um etwa 10° mit der Strömungsrichtung angeschrägt, um eine möglichst gleichmäßige Strömung der Luft entlang der Agarplatte zu erzielen. Die Platte mit Deckel wurde anschließend mit Parafilm luftdicht verschlossen. Zum Vergleich wurde die Keimbelastung der Umgebungsluft, etwa 2 m von der Revisionsklappe entfernt, sowie die Keimbelastung des Rohgases, direkt vor der Saugöffnung des Ventilators untersucht.

Der Versuch wurde jeweils für Expositionszeiten von 5, 30, 60, 300 und 600 Sekunden bei einem Luftvolumenstrom von 20 m<sup>3</sup>/h durchgeführt. Die Agar-Platten wurden anschließend für 5 Tage bei Raumtemperatur im Trockenschrank (memmert UN55) inkubiert, um ähnliche Wachstumsbedingungen wie im Bioreaktor zu schaffen.

### Ergebnisse

In Abbildung 28 sind die Agarplatten nach der 5-tägigen Inkubation dargestellt. Die Platten sind von links nach rechts in steigender Expositionszeit und von oben nach unten als die Proben der Umgebungsluft, des Rohgases sowie des Reingases aufgestellt.

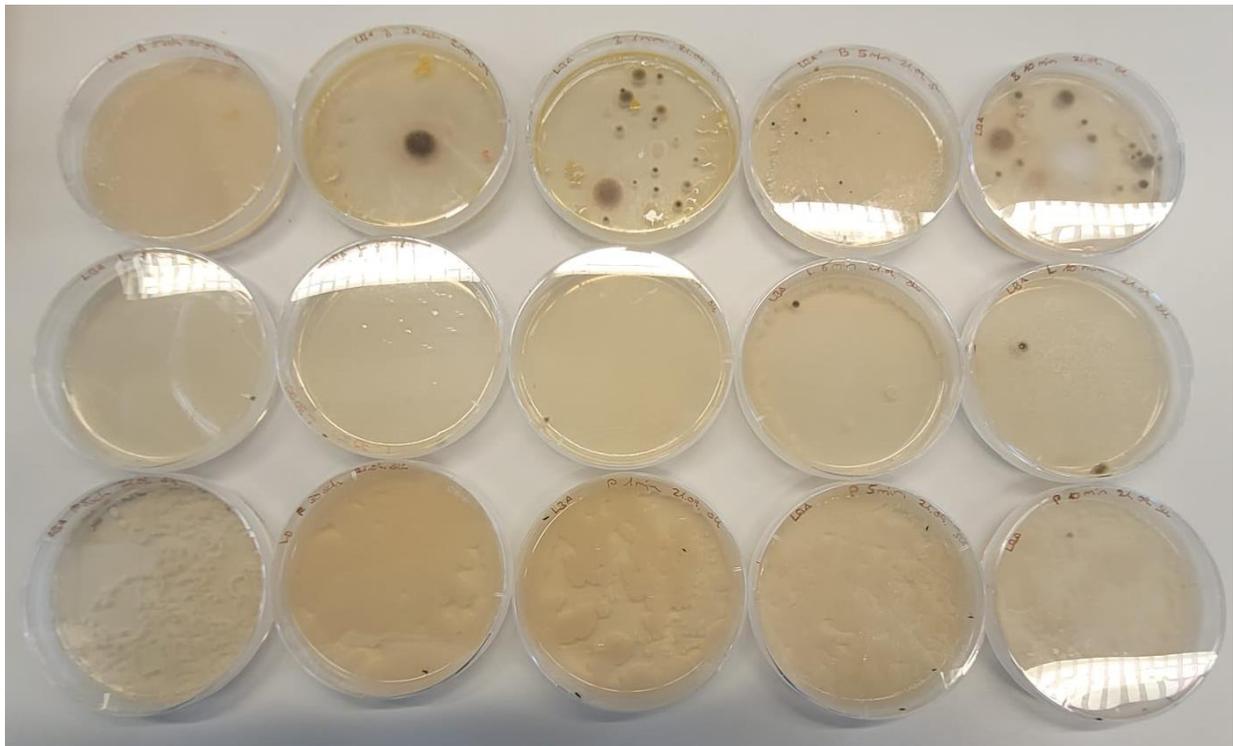


Abbildung 28: Agarplatten labortechnische Anlage nach 5-tägiger Inkubationszeit (Quelle: Kreinbihl, Abschlussarbeit, 2023)

Die Proben der Umgebungsluft sind am dichtesten und heterogensten bewachsen. Die Zahl der KBE nimmt auf den Agarplatten mit steigender Expositionszeit zu. Eine Ausnahme bildet die Expositionszeit von 300 Sekunden, hier ist auf der Agarplatte ein eher flächiger Bewuchs, statt einzelnen Kolonien zu sehen. Die Proben der Umgebungsluft sind deutlich stärker bewachsen als die Proben der behandelten Abluft aus dem Biofilter und des Rohgases. In den Proben der Umgebungsluft wachsen sowohl helle Bakterienkolonien als auch helle und dunkle Pilzkolonien. Auf den Proben der behandelten Abluft und des Rohgases sind ebenfalls sowohl Bakterien- als

auch Pilzkolonien zu finden. Auf den Platten des Rohgases ist der Bewuchs sehr gering und eher am Rand. Die Proben der behandelten Abluft sind in allen Expositionszeiten stark mit hellen Bakterienkolonien bewachsen. Es ist keine Abhängigkeit des Bewuchses zur Expositionsdauer erkennbar (Kreinbihl, Abschlussarbeit, 2023).

## 7.2 Halbtechnische Anlage

Die Beprobung wird analog zu der Beprobung an der labortechnischen Anlage durchgeführt (siehe Kapitel 7.1). Der Luftvolumenstrom wird auf 1000 m<sup>3</sup>/h eingestellt.

### Ergebnisse

In Abbildung 29 sind oben die Platten mit dem beprobten Rohgas und unten mit dem beprobten Reingas abgebildet. Von links nach rechts sind die Platten nach 5, 30, 60, 300 und 600 Sekunden Expositionszeit dargestellt.

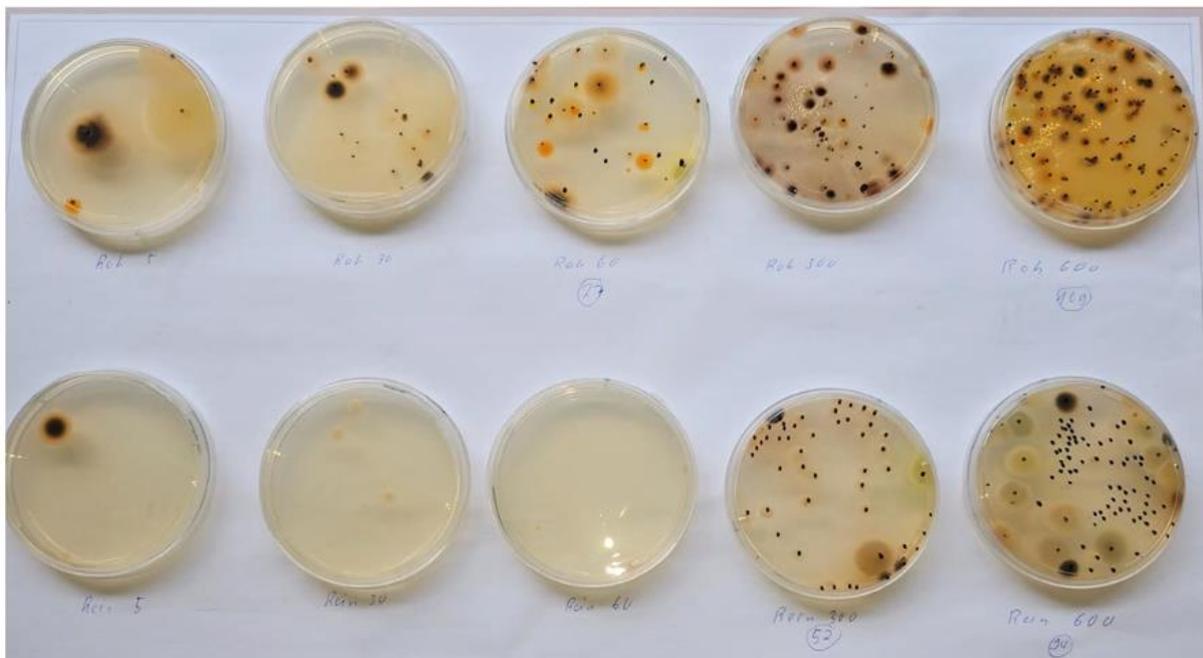


Abbildung 29: Agarplatten halbtechnische Anlage nach 5-tägiger Inkubationszeit

Die Anzahl der KBE nimmt jeweils von links nach rechts zu. Eine Ausnahme stellt die Platte mit dem beprobten Reingas bei 60 Sekunden dar. Es sind jeweils Bakterien und Pilze gewachsen, ca. im Verhältnis 50/50. Auf den Platten des beprobten Rohgases sind im Vergleich zum Reingas beim selben Volumenstrom jeweils mehr KBE gewachsen. Folglich werden die Mikroorganismen von den feuchten Kokosfasermatten gut zurückgehalten und es erfolgt keine nennenswerte Emission im Reingas.

## 8 Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden zunächst sowohl an der labortechnischen als auch an der halbtechnischen Anlage wichtige anlagencharakteristische Parameter bestimmt. Dazu gehören die Verweilzeit und der Druckverlust. In Absorptions- und Desorptionsversuchen wurde die Sorptionsfähigkeit der Trägermaterialien ermittelt. Durch die Zugabe von Belebtschlamm bzw. Rücklaufschlamm aus der Kläranlage wurden die Trägermaterialien angeimpft und ein mikrobieller Bewuchs angezchtet. An der labortechnischen Anlage wurden Polypropylen-Matten und an der halbtechnischen Anlage Kokosfasermatten als Trägermaterial verwendet. Bei variierenden Lösemittelkonzentrationen und Luftvolumenströmen wurden für verschiedene Lösemittel die sich jeweils einstellenden Wirkungsgrade ermittelt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

### Verweilzeit und Druckverlust

Ein Vergleich der gemittelten experimentell bestimmten Verweilzeiten und der theoretischen Verweilzeit an der halbtechnischen Anlage zeigt, dass diese nahezu übereinstimmen. Bei einem Luftvolumenstrom von 1000 m<sup>3</sup>/h beträgt die theoretische Verweilzeit 7,4 Sekunden und sinkt bei 2000 m<sup>3</sup>/h auf 3,6 Sekunden ab. Der Druckverlust in den Versuchsreaktoren ist jeweils sehr gering. An der labortechnischen Anlage beträgt dieser bei einem Luftvolumenstrom von 15 m<sup>3</sup>/h 11 Pa und steigt bei 30 m<sup>3</sup>/h auf 32 Pa an. An der halbtechnischen Anlage beträgt der Druckverlust während des Betriebs mit Mikroorganismen bei einem Luftvolumenstrom von 1000 m<sup>3</sup>/h 9 Pa und bei 2000 m<sup>3</sup>/h 28 Pa.

### Sorptionsverhalten

In Absorptions- und Desorptionsversuchen wurde an beiden Versuchsanlagen das Sorptionsverhalten der Trägermaterialien für das Lösungsmittel Ethanol ermittelt. In den Absorptionsversuchen konnte sowohl für die Polypropylen-Matten als auch für die Kokosfasermatten eine gute absorbierende Wirkung nachgewiesen werden.

### Mikrobieller Bewuchs

Auf den Oberflächen der Matten ist ein homogener Bewuchs aus Mikroorganismen entstanden, welcher sich im zeitlichen Verlauf farblich verändert hat. An beiden Anlagen ist kein übermäßiger Bewuchs entstanden und somit auch kein Zuwachsen (Clogging).

### Erzielte Wirkungsgrade beim Abbau des Lösemittels

In Langzeitversuchen wurde der Abbau dreier Stoffklassen (Alkohol, Keton und Ester) und eines Lösemittelgemischs auf 2-Butanonbasis bei unterschiedlichen Eingangsfrachten und Verweilzeiten getestet. Die Wirkungsgrade der labortechnischen Anlage lagen bei 35 bis 53 % bei einem Volumenstrom von 20 m<sup>3</sup>/h. An der halbtechnischen Anlage konnten ebenfalls sehr vielversprechende Wirkungsgrade erzielt werden. Auch das verwendete Lösemittelgemisch war mit dem Bioreaktor gut biologisch abbaubar und der Abbau wurde durch die zugemischten Komponenten nicht behindert, bzw. gehemmt.

An der labortechnischen Anlage der Hochschule RheinMain haben bereits erste Versuche zum Einsatz von Hanfmatten als Trägermaterial begonnen. Diese haben den ökologischen Vorteil, dass sie wie die Kokosfasermatten nachwachsend sind, jedoch auch in Deutschland produziert werden können. Diese Versuche sollen fortgesetzt werden.

## 9 Literaturverzeichnis (einschließlich der durchgeführten Abschlussarbeiten)

- [Fis90] FISCHER, K.: Biofilter: Aufbau, Verfahrensvarianten, Dimensionierung. In *Biologische Abluftreinigung: Anwendungsbeispiele, Möglichkeiten und Grenzen für Biofilter und Biowäscher* (1. Aufl.). expert Verlag, 1990.
- [San15] SANDER, R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent, Atmos. Chem. Phys., 15, <https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015>, 2015.
- [VDI08] VDI 3478, Blatt 2: Biologische Abgasreinigung Biorieselbettreaktoren. VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KdRL) – Normenausschuss (Hrsg.), 2008.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden nachstehende Abschlussarbeiten angefertigt:

- [Con23] CONRAD, P.: *Langzeitversuche in der biologischen Abluftreinigung mit Mikroorganismen auf Kunststofftextil als Trägermaterial*, Bachelor-Thesis, Hochschule RheinMain Rüsselsheim, 2023
- [Kre23] KREINBIHL, S.: *Betrieb und Beprobung eines neuartigen Bioreaktors zur Abluftreinigung mittels lateral angeströmter mikrobiologisch aktiver Oberfläche*, Bachelor-Thesis, Hochschule RheinMain Rüsselsheim, 2023.
- [Mai22] MAIER, B.: *Konzeptionierung und Aufbau einer neuartigen Anlage zur biologischen Abluftreinigung unter Berücksichtigung inerter Trägermaterialien*, Bachelor-Thesis, Universität Stuttgart, 2022.
- [Pra22] PRADO-GÖRLACH, C.: *Erweiterung der VersuchsfILTER-Anlage auf textiler Basis und Bestimmung der Sorptionsisothermen*, Bachelor-Thesis, Hochschule RheinMain Rüsselsheim, 2022.
- [Sta19] STAHLHACKE, J.: *Erforschung und Erprobung einer neuen Biofilterpilotanlage auf textiler Basis*, Bachelor-Thesis, Hochschule RheinMain Rüsselsheim, 2019
- [Wol23] WOLF, N.: *Erprobung einer neuartigen Anlage zur biologischen Abluftreinigung mit inerten Trägermaterialien*, Bachelor-Thesis, Universität Stuttgart, 2023.