

Abschlussbericht

Behandlung von Stallabluft durch photokatalytische Reinigungssysteme - Upscaling für die Anforderungen im Praxisbetrieb

Kooperation CLEAN AIR II

2021 LFE 0003

Koordinator:

Materialforschungs- und -prüfanstalt Weimar

Dr. E.-Peter Kulle
Coudraystraße 9
99423 Weimar



Lynatox GmbH Ilmenau

M.Sc. Daniel Martschoke
Ehrenbergstraße 11
98693 Ilmenau



Agrar GmbH Reinholterode

Agraringenieur Matthias Meise
Langer Rain 6
37308 Reinholterode

Thüringer Aufbaubank

Bereich Agrarförderung, Infrastruktur, Umwelt
Gorkistraße 9
99084 Erfurt



Europäischer Landwirtschaftsfonds
für die Entwicklung des ländlichen Raums



Unterschrift:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kulle', with a stylized, cursive script.

Dr. E.-Peter Kulle

Projektleiter Kooperation CLEAN AIR II

Weimar, 05.08.2025

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 Einleitung	6
2 Zielstellung	10
3 Grundlagen und Stand der Wissenschaft und Technik	12
3.1 Theoretische Grundlagen	13
3.2 Katalysatormaterial	16
3.3 Erwartete Vorzüge der Photokatalyse aus CLEAN AIR I	18
4 Material und Methoden	21
4.1 Demonstrator aus CLEAN AIR I und abschließende Untersuchungen	21
4.2 Katalysatorentwicklung und Messsysteme im Upscaling	24
4.3 Mikrobiologisch-hygienische Untersuchungen und Bioaerosole	27
4.3.1 Kulturmedien und Indikatororganismen	28
4.3.2 Impaktion, Impingertechnik, DNA-Extraktion	29
4.4 Sensorauswahl und -entwicklung im Labor	32
4.5 Strömungssimulation am Katalysator	32
5 Ergebnisse und Diskussion	33
5.1 Sensortechnik und Weiterentwicklung der photokatalytischen Technik	33
5.2 Abluftreinigung und Abbau der Schadgase im Feldversuch	38
5.2.1 Messkampagne Juli 2024	38
5.2.2 Messkampagne November 2024	40
5.2.3 Messkampagne März 2025	41
5.3 Strömungssimulation und entwickelte Elektronik	47
5.4 Mikrobiologisch-hygienische Untersuchungen	53
5.4.1 Mikrobiologisch-hygienische Leistungen des Demonstrators	53
5.4.2 Mikrobiologisch-hygienische Leistungen des Upscaling Demonstrators	56
5.5 Begleitende Materialuntersuchungen	61
6 Zusammenfassung und Ausblick	65

7	Literaturverzeichnis	68
	Danksagung	71

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BImSchG	Bundesimmissionsschutz- Gesetz
ca.	zirka
DLED	Direkt LED
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V.
EU	Europäische Union
e. V.	eingetragener Verein
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FLI	Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit
GE	Geruchseinheiten
GIRL	Geruchsimmissionsschutz- Richtlinie
h	Stunde(n)
IUM	Institut für Umweltmedizin
KbE	Kolonie bildende Einheiten
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
l	Liter
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
mA	Milliampere
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
min.	Minuten
Mio	Millionen
mW	Milliwatt
µm	Micrometer
nm	Nanometer
nrw	Nordrhein-Westfalen
PhS	Photokatalytisches System
ppm	parts per million
%	Prozent
RH	Reinholterode
sog.	sogenannt(e)
t	Zeit
TA	Technische Anleitung
Tab.	Tabelle
TMIL	Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft
UBA	Umweltbundesamt
UV-A	Ultraviolettstrahlung im Wellenlängen-Bereich A (315 – 400 nm)
vgl.	vergleiche
vs.	versus
V	Volumen
W	Watt

1 Einleitung

Das Schwein ist eines der ältesten Nutztiere des Menschen. Vor mindestens 9000 Jahren domestiziert, ist es heute der wichtigste Fleischlieferant Deutschlands und eine tragende Säule der heimischen Landwirtschaft. Die wachsende Weltbevölkerung und der zugleich zunehmende Wohlstand in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern veränderten und verändern das Ernährungsverhalten. Nach Angaben von *Our World in Data* hat sich der weltweite Fleischkonsum pro Kopf seit 1961 fast verdoppelt und lag im Jahr 2021 bei rund 42 Kilogramm im Jahr. Während er in Deutschland 2023 noch bei 52 kg lag, ist er mittlerweile auf 27,5 kg pro Kopf zurückgegangen. Der weltweite jährliche Fleischverbrauch hat in den letzten Jahrzehnten dennoch deutlich zugenommen. Lag der durchschnittliche Jahreskonsum 1990 noch bei 33,5 Kilogramm pro Kopf, waren es 2021 etwa 42 Kilogramm weltweit (vgl. *Tab. 1.1*).

Insbesondere die Schweinehaltung hat sich in den vergangenen Jahrzehnten rasant gewandelt: Zunehmend prägen diesen Produktionszweig hoch spezialisierte Betriebe mit großen Tierbeständen. Viele Betriebe gaben und geben in Deutschland auf. Nach den Ergebnissen der Landwirtschaftszählung 2020 gab es in Deutschland etwa 32.000 Betriebe, die Schweine halten. Das Gros davon sind Familienbetriebe. Rund 33 Prozent von ihnen halten weniger als 50 Tiere. Derzeit sehen sich die Tierhalter in Deutschland, insbesondere die Schweinehalter mit großen Herausforderungen konfrontiert.



Abbildung 1.1: Schweinemast: Optimierung ist heute absolutes Muss; Quelle: LAND&FORST

Um die globale Nachfrage nach Fleisch und anderen tierischen Produkten zu decken, wurde die Tierhaltung insgesamt stark ausgeweitet. So wurden 2019 beispielsweise weltweit rund 26 Milliarden Hühner gehalten. Das waren rund 80 % mehr als im Jahr 2000. Für das Jahr 2025 prognostizierte die USDA einen weltweiten Schweinebestand von rund 734,74 Millionen Tieren.

Die steigende Nachfrage nach tierischen Nahrungsmitteln wie Fleisch, Eiern und Milchprodukten in Deutschland und weltweit hat seit vielen Jahren eine starke Intensivierung der Nutztierhaltung verbunden mit einer Ausweitung der Stallhaltung zur Folge (vgl. *Tab. 1.1* und *1.2*). So hatte sich beispielsweise die Anzahl der in Deutschland gehaltenen Schweine in den letzten 50 Jahren von 19 Mio. auf zwischenzeitlich über 28 Mio. erhöht (mittlerweile etwa 21 Mio.), während die Anzahl der Schweinehaltenden Betriebe im gleichen Zeitraum von etwa 1,3 Mio. auf 27.000 gesunken ist.

In der chinesischen Landwirtschaft werden mit über 400 Millionen Tieren die meisten Schweine gehalten, entspricht dies über der Hälfte des globalen Bestands. Damit ist China zugleich der größte Produzent von Schweinefleisch. Die Produktion dient in erster Linie zur Deckung des großen nationalen Eigenbedarfs, China gilt gar als einer der größten Importeure von Schweinefleisch. Der größte Exporteur sind die USA. Dies eröffnet riesige Marktpotenziale auch im Bereich der Stallhaltung und ihrer peripheren Technik inkl. der umweltrelevanten Anforderungen.

Weltweit wurden z.B. 2018 rund 342,4 Millionen Tonnen Fleisch insgesamt erzeugt. In den Folgejahren gab es - entgegen den Erwartungen der FAO und trotz Ausbreitung der Afrikanischen Schweinepest – keinen Rückgang der Gesamtmenge. Mittlerweile (2024) liegt die weltweit produzierte Menge an Fleisch bei 370,7 Millionen Tonnen.

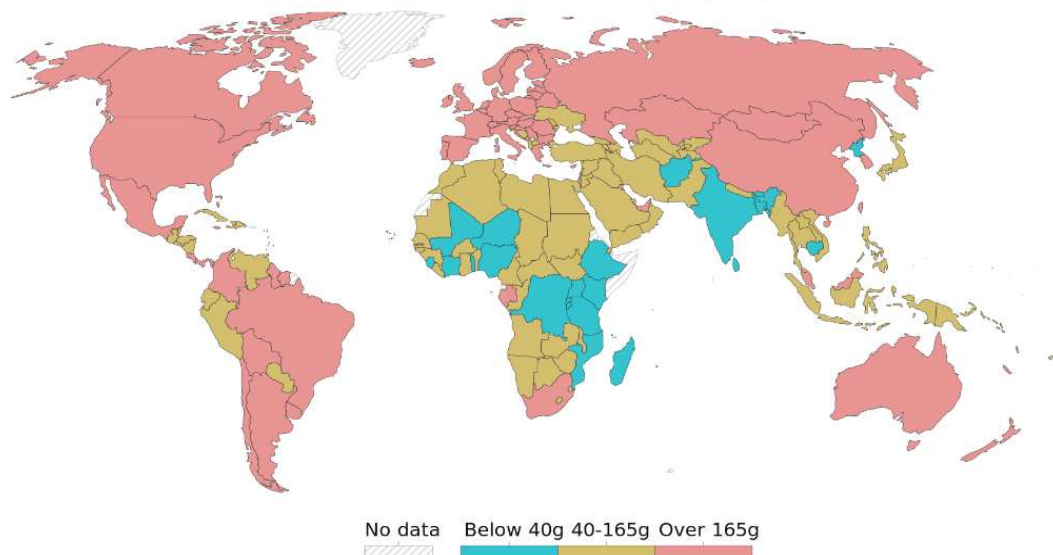
Tabelle 1.1: Durchschnittlicher Fleischverbrauch Welt in 2020 (aus: Per capita meat consumption by type)

Fleischart	Verbrauch pro Kopf (in Kilogramm)	Anteil in %
Geflügelfleisch	16,21	38,35 %
Schweinefleisch	14,45	34,19 %
Rindfleisch	8,98	21,26 %
Schaf- und Ziegenfleisch	1,96	4,63 %
anderes Fleisch	0,66	1,57 %
Gesamt	42,26	100 %

Daily meat consumption per person, 2021

Our World
in Data

Daily meat consumption is shown relative to the expected EU average of 165g per person in 2030. This projection comes from the livestock antibiotic scenarios from Van Boeckel et al. (2017).



Data source: Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023)

Note: Data shows per capita meat supply, which does not subtract consumer waste. Actual meat consumption will be lower figures.

Abbildung 1.2: Täglicher weltweiter Fleischkonsum pro Person (2021)

Tabelle 1.2: Durchschnittlicher Fleischverbrauch in 2018, stellvertretende Auswahl

	Geflügel	Schwein	Rind	Sonstige	Insgesamt
	Kilogramm pro Kopf				
Deutschland	18,2	43,2	14,8	2,6	78,8
Frankreich	23,0	31,5	20,7	3,9	79,0
China	14,2	38,3	5,5	4,5	62,4
Indien	2,3	0,2	1,0	0,5	4,1
Nigeria	1,1	1,5	2,0	3,0	7,5
Vereinigte Staaten	56,6	28,0	37,2	1,4	123,2
Welt	15,6	15,6	9,1	2,7	42,9

Quelle: FAO; Geflügel: Huhn, Ente, Gans, Perlhuhn, Pute/Truthahn. Sonstige: Schaf, Ziege und andere.

Die Stallhaltung ist mit Emissionen verbunden, die über Lüftungsanlagen in sehr konzentrierter Form ins Freie transportiert werden können (vgl. Abb. 1.3). Die hauptsächlichen, luftgetragenen Schadstoffemissionen in Tierzuchtbetrieben können in chemische und biologische Schadstoffe eingeteilt werden. Auf der Seite der chemischen Schadstoffe kommt es zu geruchsbildenden Substanzen (Hahne, 2013). Die biologische Belastung von Stallabluft wird hauptsächlich von pathogenen Keimen und deren Stoffwechselprodukten bestimmt. Des Weiteren kann es zu einer partikulären Belastung der Luft kommen (Clauß, 2015; Hartung et al., 2014).

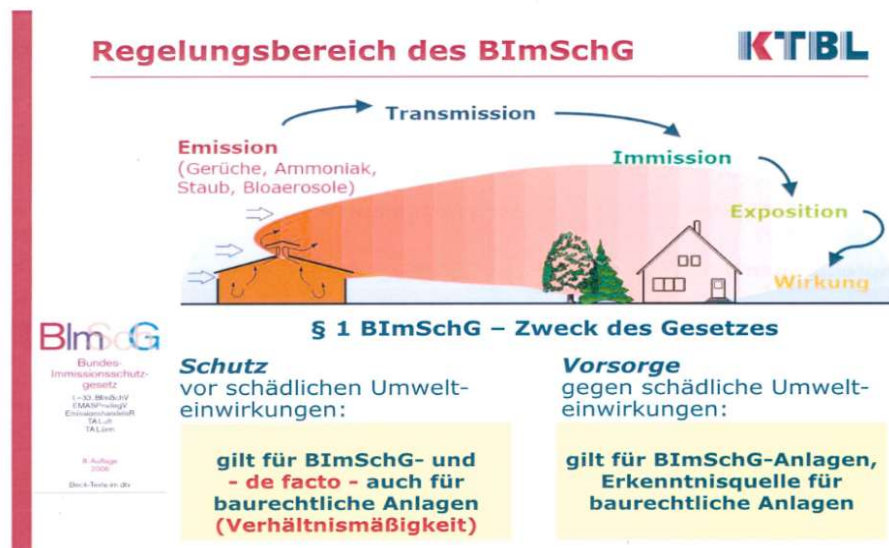


Abbildung 1.3: Regelungsbereich des BImSchG (nach E. Grimm, KTBL; 2017)

Technische Abluftanlagen mit integrierter Abluftbehandlung gewinnen bei dieser Problematik immer mehr an Bedeutung (Hahne, 2016). Grundsätzlich ist eine Abluftbehandlung jedoch nur in Stallungen mit Zwangsbelüftung zu realisieren (LfULG Sachsen, 2017).

Derzeit gibt es nach der Technischen Anleitung Luft in der aktuellen Novellierung und der von 2015 im Rahmen des BImSchG Emissionsbegrenzungen für die gefasste Luft von Stallungsanlagen im Hinblick auf Staub und Ammoniak. Die Grenzwerte liegen bei 200 g/h bzw. 20 mg/m³ für den Gesamtstaub und 150 g/h bzw. 30 mg/m³ für Ammoniak (2015).

Die EU- und nationalen Klimaschutzziele betreffen unmittelbar die Landwirtschaft. 95% der NH₃-Emissionen in Deutschland stammen aus der Landwirtschaft. Deutschland ist gefordert, bis 2030 eine Reduzierung der Ammoniakemissionen von 29% (gegenüber Bezugsjahr 2005) sicherzustellen. Das Bundeskabinett hat im Dezember 2020 die Novellierung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) beschlossen. Der Bundesrat hat sich mittlerweile mit der Vorlage intensiv beschäftigt und diese an den Gesetzgeber bzw. die Ressorts zurückverwiesen, um die aktuellen Anforderungen an die Tierhaltung (erweiterte Aspekte zum Tierwohl) mit zu berücksichtigen und anzupassen. Erwartet wird, dass die Länder erneut einige Änderungswünsche einbringen werden. Erstmals werden Regelungen zum Schutz vor erheblichen Belästigungen durch Geruchsimmissionen in die TA Luft aufgenommen. Grundlage ist die Richtlinie zur Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (*Geruchsimmissions- Richtlinie*, GIRL).

Für weitere relevante Verbindungen in der Stallabluft, wie Lachgas und Methan als klimaschädliche Gase gibt es bislang keine Grenzwerte. Diese Verbindungen werden mit herkömmlichen Abluftbehandlungsanlagen nicht oder nicht ausreichend entfernt. Lachgas ist 300-mal, Methan ist 25-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid (UBA, 2013). Beide waren aus diesem Grund mit Gegenstand der Betrachtungen im Projekt.

Tabelle 1.3: Übersicht zu Tierbeständen: weltweit am häufigsten gehaltene Tierarten

	2000	2010	2019	Veränderung 2000-2019
	<i>in Milliarden</i>			<i>in Prozent</i>
Hühner	14,4	20,2	25,9	+80,1
Rinder	1,3	1,4	1,5	+14,5
Schafe	1,1	1,1	1,2	+16,2
Enten	0,9	1,2	1,2	+26,3
Ziegen	0,8	0,9	1,1	+44,2
Schweine	0,9	1,0	0,9	-5,4

Quelle: FAO

Die gesetzlichen Vorgaben zu Bioaerosolen waren hinsichtlich der Begrenzung mikrobieller Emissionen bislang eher allgemein formuliert und wurden trotz seuchenhygienischer Relevanz in der nunmehr vorliegenden novellierten Fassung der TA Luft (TA Luft, 2021) im Rahmen von immissions-schutzrechtlichen Genehmigungen und Bewertungen nicht verbindlich.

2 Zielstellung

Im geplanten Projekt sollte die auf **photokatalytischer Oxidation** aufbauende Abluftreinigungsanlage mit dem Charakter Funktionsmuster aus dem Vorprojekt CLEAN AIR (I) im Rahmen eines Upscalings weiterentwickelt und an reale praktische Anforderungen im Agrarbetrieb angepasst und erprobt werden. Weiterhin sollte neben einer Desinfektion die Möglichkeit der Oxidation von Methan zu Kohlendioxid und Wasser untersucht werden. Die Emission hygienerelevanter Keime über Stäube und Aerosole der Stallluft sollte mittels Messung der sogenannten Indikatorbakterien und Pilze erfasst werden.

Die *Tabelle 2.1* stellt CLEAN AIR (I) und CLEAN AIR II vergleichend gegenüber.

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Projekte CLEAN AIR (I) und CLEAN AIR II (in Beantragung)

Kategorie	CLEAN AIR (I)	CLEAN AIR II
Abluft	Synthetische Komponenten wie NH ₃ , CH ₄ , VOC unter Laborbedingungen; Testung eines Klein- Demonstrators vor Ort	Abluftbehandlung unter Praxisbedingungen mit Sommer- und Winteraspekt, inkl. Spitzenbelastungszeiten
Verfahren	Konzept für labor- bzw. kleintechnischen Maßstab (u.a. Gasmesskammer)	Entwickelte Konzepte (halbtechnischer Maßstab); verbessertes Photokatalysesystem: Upscaling, Anpassung, Weiterentwicklung
Recht	TA Luft, BImSchG, Filtererlasse der Länder	Neuentwurf TA Luft Stand 2021
Wesentliche weitere Aspekte des Projekts	Prüfung der Anwendbarkeit der Photokatalyse für die Reinigung von Stallabluf zur Reduzierung Schadgase	Robuste Sensorik; Abluftvorbehandlung: Staubabscheidung; neue Trägermaterialien; PCR-Tests; Reduzierung Gerüche
Praxisbezug	Demonstrator: Funktionsmuster	Halbtechnischer Maßstab: Versuchsmuster
Abbau Schadgase	Nachweis der Abbaubarkeit von relevanten Schadstoffkomponenten inkl. Bioaerosolen	Halbtechnische Umsetzbarkeit der gezielten Reduzierung der Schadgase und –komponenten inkl. Stäube/Feinstaub
Spezifik Anlagentechnik	Labortechnik; Messungen vor Ort mit elektronischer Datenübertragung	Weiterentwicklung und Anpassungen an Stallanlage; Online- Messungen; modularer Aufbau
Ökonomie		Energiemonitoring

Um die Wirkung des geplanten Systems im **Upscaling** zu verifizieren musste eine stabil arbeitende online- Messtechnik mit telemetrischer Datenübertragung für die Versuchsanlage entwickelt werden. Dabei sollten folgende wesentliche Parameter bestimmt werden:

- Ammoniak- und NO_x- Gehalt der Zu- und Abluft des photokatalytischen Systems (PhS)
- (Fein)Staubgehalt
- Ggf. CO₂- und Methangehalt der Zu- und Abluft des PhS
- Gesamtkeimzahl und Leitparameter der Zu- und Abluft (Hygienerelevanz) des PhS

Die Realisierung eines solchen Projektes bedurfte dabei der intensiven Zusammenarbeit von Forschungseinrichtung, Stallbetreiber und technisch versierten Firmen.

Letztlich sollte das Upscaling die Weiterentwicklung des Funktionsmusters auf der Basis des Demonstrators (aus CLEAN AIR I) die Grundlagen für technisch und mikrobiologisch-hygienisch sichere, modular nach- und aufrüstbare Stallabluftsysteme auf Basis der Photokatalyse schaffen.

Die Aktualität der Aufgaben- und Zielstellungen des geplanten Projekts wurden u.a. bereits auf dem „Thüringer Geflügeltag“ am 08.11.2017 unter dem Motto „*Hygiene ist Sicherheit*“ und dem „Mitteldeutschen Schweinetag“ (2017) mit Hinweisen auf Verschärfungen bei den zulässigen N-Depositionen und Bioaerosolen unterstrichen. Die Novellierung der TA Luft (2021) formuliert für die schweine- und geflügelhaltenden Betriebe mittlerweile klare Anforderungen, die es einzuhalten gilt. Zu den Rahmenbedingungen gehört auch, dass das Thüringer Umweltministerium am 21. Juni 2016 den sogenannten *Filtererlass* für Thüringen durchgesetzt hatte.

3. Grundlagen und Stand der Wissenschaft und Technik

In der modernen landwirtschaftliche Praxis sind bereits mehrere biologische und chemisch-physikalische Verfahren für die Behandlung der Abluft von Schweine- und Geflügelstallanlagen entwickelt worden. Ihr Einsatz hat sich in vielfältiger Hinsicht bewährt. Chemowäscher sowie Rieselbettfilter und Biofilter (vgl. Abb. 3.1, 3.2, 3.3) bilden den Stand der Technik in Bezug auf die Stallablufteinigung (UBA, 2016). Dabei war die zu erbringende Reinigungsleistung dieser Systeme durch den DLG Signum Test vorgegeben und ist nunmehr durch die novellierte TA Luft konkretisiert. Die geruchsseitige Belastung soll demnach auf 300 GE/m³ begrenzt werden. Der Gesamtstaub, der Ammoniak und der Gesamtstickstoff muss um 70% verringert werden. Diese Vorgaben waren und sind Mindestanforderungen für das zu entwickelnde System mittels photokatalytischer Reinigung.

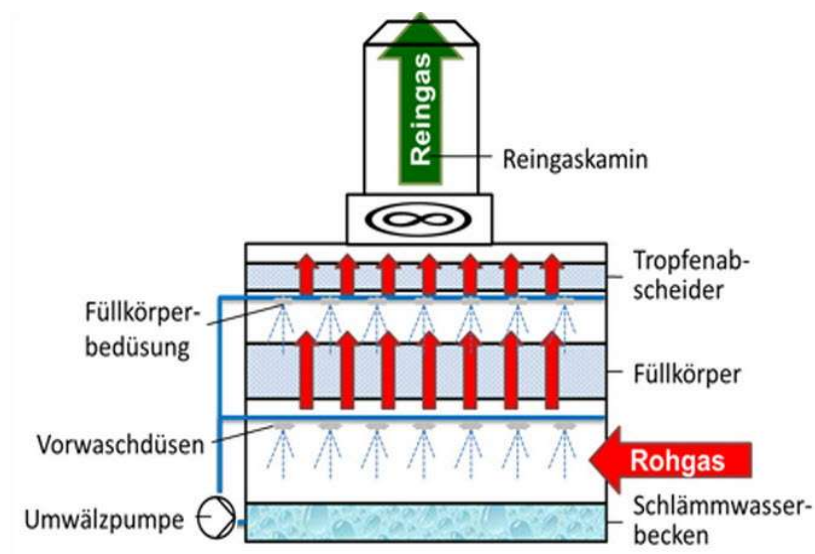


Abbildung 3.1: Grundprinzip der technischen Stallablufteinigung

Bisher wurde die photokatalytische Reinigung der Stallablufteinigung noch nicht praktiziert und war auch noch nicht Gegenstand von anwendungsorientierten Forschungsvorhaben. Sie stellt somit eine technische Neuerung dar. Die zugrundeliegenden Reaktionsmechanismen der photokatalytischen Umsetzung von Ammoniak und Methan sowie die hygienisierende Wirkung von Hydroxylradikalen sind bekannt.



Abbildungen 3.2 und 3.3: Stallablufteinigung mit Biofiltern (Einsatz organischer Filtersubstrate)

Bei der Photokatalyse werden reaktive Sauerstoffspezies durch die Anregung eines Titandioxid-Halbleiters durch UV A Licht gebildet. Die so entstehenden Hydroxylradikale haben das höchste chemische Oxidationspotential aller technisch einsetzbaren Oxidationsmittel. Neben Geruchsstoffen können auch die Zellwände von Mikroorganismen wie Bakterien, Pilzen/Pilzsporen, aber auch Viren angegriffen werden, was eine desinfizierende Wirkung zur Folge hat.

3.1 Theoretische Grundlagen

Der von der Firma Lynatox mittels LED-Technik weiterentwickelte photokatalytische Effekt an dem Halbleiter Titandioxid ist seit der Entdeckung der photokatalytischen Wasserspaltung durch *Honda* 1974 ein Forschungsschwerpunkt in der Umwelt- und Energietechnik (*Pichat et al., 2013*). Neben Titandioxid gibt es noch eine ganze Reihe andere Metalloxide wie Zinkoxid, Wolframoxid oder Ceroxid, welche photokatalytische und photohalbleitende Eigenschaften besitzen. Aufgrund der Ungiftigkeit und der großen Verfügbarkeit zu geringen Kosten haben sich allerdings Titandioxid und Titandioxid-Nanopartikel als technischer Photokatalysator durchgesetzt. Titandioxid kommt in drei Kristallphasen vor, wobei die *Anatas*-Phase als semistabile Kristallanordnung die höchste photokatalytische Aktivität besitzt. Die *Rutil*- und *Brookit*-Phasen sind photokatalytisch wesentlich inaktiver. *Abbildung 3.1.1* zeigt die verschiedenen Kristallphasen des Titandioxids (*Kirsch et al., 2012; Römpf, 1999*).

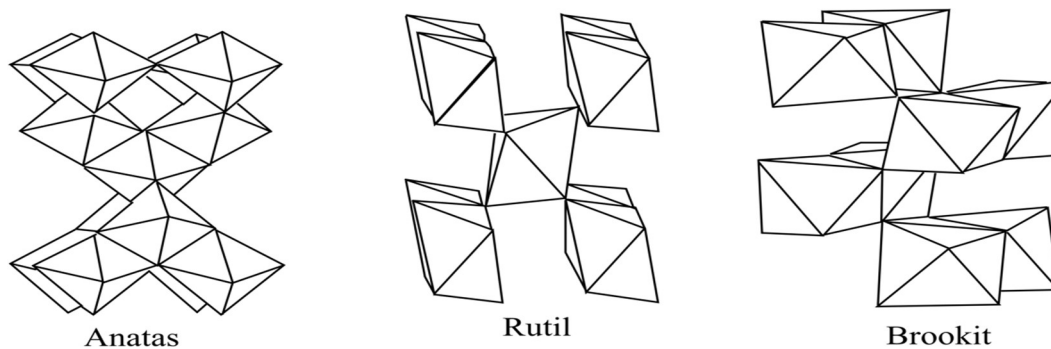


Abbildung 3.1.1: Die drei Kristallphasen des Titandioxids (Schnabel, 2020)

Der photokatalytische Effekt selbst beschreibt die durch Lichtquanten ausgelösten chemischen Reaktionen an der Halbleiteroberfläche. Hierbei müssen Lichtquanten mit einer bestimmten Energie, die der Halbleiterbandlücke entspricht, auf das Katalysatorkristallgitter treffen. Dabei werden Elektronen aus der Kristallstruktur auf höhere Energieniveaus gebracht (Leitungsband), wobei im Kristallgitter (Valenzband) Elektronenfehlstellen übrigbleiben. Diese Ladungsträgertrennung ermöglicht reduktive und oxidative Reaktionen am Halbleiter. Hier können die Elektronenfehlstellen direkt als starkes Oxidationsmittel mit organischen und anorganischen Substanzen reagieren. Die Elektronen am Leitungsband können reduktiv wirken. Wenn die Elektronenfehlstellen nicht schnell genug reagieren, können die Leitungsbandelektronen zurückfallen (Rekombination) und es wird Energie in Form von Wärmestrahlung frei. Die Rekombination am Halbleiter kann unterbunden werden, um die Effizienz der photokatalytischen Reaktion zu erhöhen. Dies kann beispielsweise durch das Anlegen elektrischer Potentiale erfolgen oder durch den Betrieb in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre (*Penafiel, 2002; Schnabel et al., 2020, 2021; Mehling et al., 2021; Dutschke et al., 2021*). Der prinzipielle Ablauf der photokatalytischen Reaktion ist im nachfolgenden Schema dargestellt (vgl. *Abb. 3.1.2*).

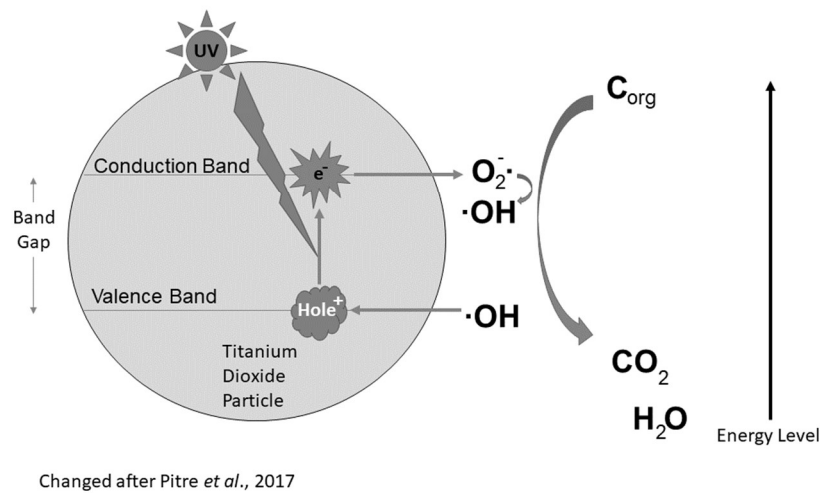


Abbildung 3.1.2: Photokatalytische Reaktion am Titandioxid (Schnabel, 2020)

Hauptsächlich laufen oxidative Reaktionen an Photohalbleitern durch Reaktionen von am Halbleiter gebildeten reaktiven Sauerstoffspezies ab (ROS). Dazu gehören zum Beispiel Hydroxylradikale, Superoxidanionen Radikale, Singulett Sauerstoff oder Wasserstoffperoxid. Hauptsächlich sind jedoch Hydroxylradikale für die oxidativen Stoffumwandlungen am Halbleiter verantwortlich (Kleinschmitt, 2001; Lindner, 1997; Pfortner, 2012). Die nachfolgenden Formeln geben einen kurzen Überblick über die chemischen Reaktionen am belichteten Titandioxid.



Für die Behandlung von (Ab)Luft durch Photokatalyse können zwei Technologien unterschieden werden:

1. Solare Photokatalyse, bei der Sonnenlicht als Energiequelle genutzt wird,
2. Künstliche Beleuchtung, am besten mit monochromatischem Licht, welches möglichst genau auf der Bandlücke des Photohalbleiters liegen sollte.

Für die Versuche und Demonstrator- Tests im Clean-Air Projekt I wurden beide Ansätze verfolgt. Im Laboreinsatz und im Rahmen von Clean Air II wurden jedoch lediglich Systeme mit künstlicher UV-Beleuchtung mittels Light Emitting Diodes (LEDs) eingesetzt, um bessere und reproduzierbarere Bedingungen zu generieren. Die Bandlücke des Photohalbleiters gibt die Energie an, welche benötigt wird, um die Ladungstrennung im Halbleiter zu ermöglichen. Diese Energie kann durch die Umrechnung der Photonenenergie in einen Wellenlängenbereich durch die Einstein-Planck Beziehung errechnet werden (Formel 10).

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{h_P * c}{\lambda} = E_{\text{gap}} \quad (10)$$

Für eine Bandlücke von Titandioxid von 3,2 eV Energie ergibt sich hiernach eine Beleuchtungs-wellenlänge im UV-A Bereich zwischen 320 und 400 nm. Am Markt befindlich sind heutzutage einige UV-A Wellenlängen in diesem Bereich. Eine Aktivitätsanalyse durch den Abbau von Methylenblau in vorangegangenen Projekten konnte die Wellenlänge von 365 nm als am effizientesten identifiziert werden. Die *Abbildung 3.1.3* zeigt den Vergleich von verschiedenen UV-A Wellenlängen in Bezug auf die Abbaueffizienz.

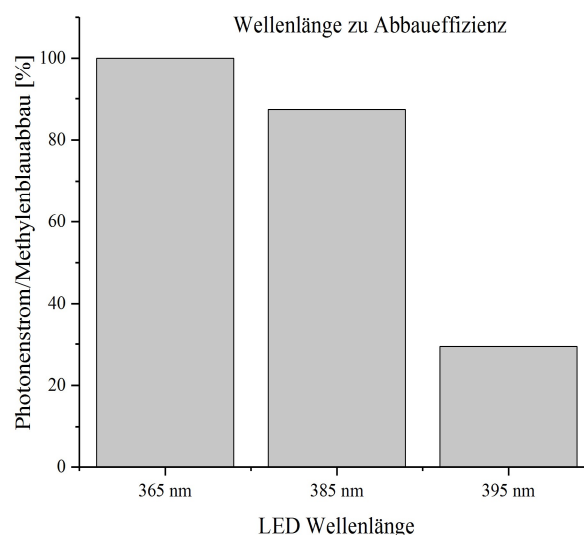


Abbildung 3.1.3: Vergleich der Abbaueffizienz verschiedener UV-A LEDs (Schnabel, 2020)

Aufgrund der Effizienz beim Abbau von Methylenblau wurden die Versuche mit UV-A LEDs der Wellenlänge von 365 nm durchgeführt.

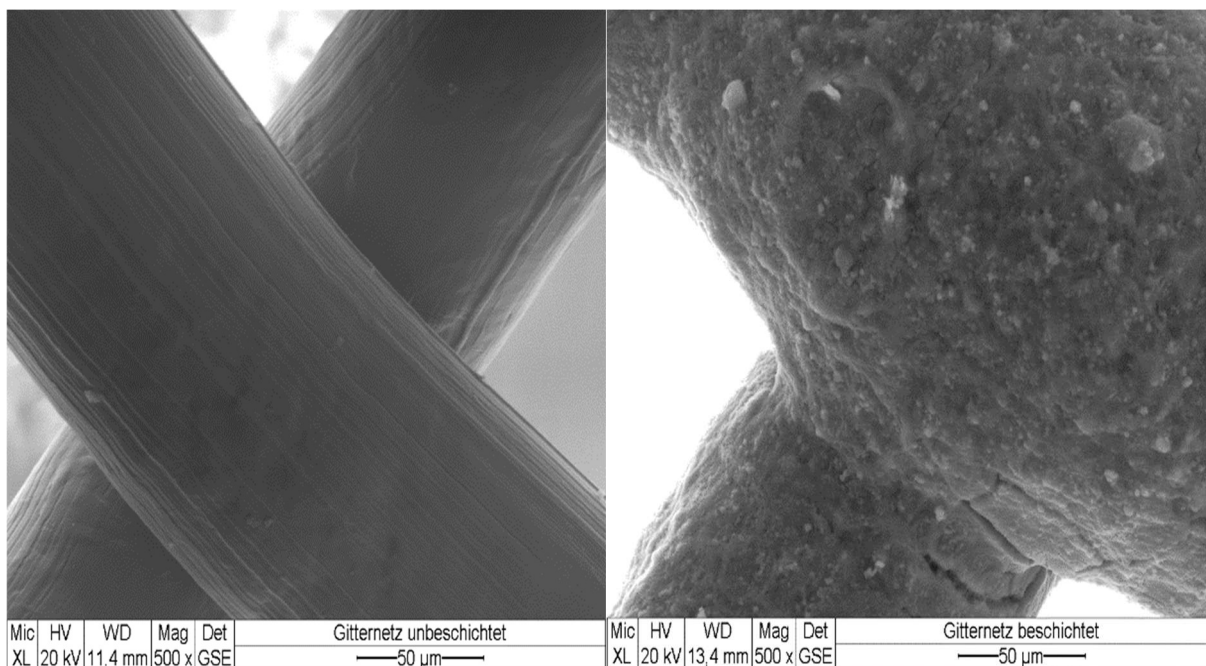
3.2 Katalysatormaterial

Das Grundmaterial für die Katalysatoren wurde von der Firma Lynatox zur Verfügung gestellt. Die Beschichtung konnte dabei aus nanoskaligem Titandioxid ausgeführt werden. Eine Partikelsuspension wurde auf verschiedene Trägermaterialien aufgebracht. Aus der Gasphase wurde die Suspension auf die Materialien gesprüht, wobei sich eine fraktale Katalysatorstruktur mit sehr hoher, innerer Oberfläche ausbildet.

Dabei kamen zwei Grundmaterialien zum Einsatz. Zum einen ein Carbonmaterial sowie ein gewebtes Glasfaserfließ, wie es bereits bei anderen Produkten für die Luftreinigung der Firma Lynatox Verwendung findet. Beide Materialien wurden in der gleichen Weise mit einer ähnlichen Flächenbeladung an Katalysatorpartikeln hergestellt. Die Materialien unterscheiden sich wesentlich hinsichtlich ihrer Strömungseigenschaften und dem Weg der Verarbeitung. Das Glasfasergewebe ist nicht selbststabilisierend und muss in der Regel in eine mechanische Vorrichtung gespannt werden, wenn es in Reaktorsysteme implementiert wird. Des Weiteren hat das Carbonmaterial aufgrund der sehr kleinen Poren einen höheren Strömungswiderstand.

Im Projekt Clean Air I verwendetes Edelstahlgewebe hat im Vergleich durch die großen Poren einen wesentlich kleineren Strömungswiderstand, was das Material für die Luftanwendung wesentlich besser geeignet macht. Auf der negativen Seite ist zu bemerken, dass die Herstellung des Materials und die Plissiertechnik zum Einbau in Reaktoren (Clean Air I) wesentlich komplexer ist als die Herstellung des Glasfasergewebes.

Die nachfolgenden *Abbildungen 3.2.1-4* und *3.2.5-8* zeigen beispielsweise Aufnahmen von beschichteten und unbeschichteten Edelstahlmaterialien mittels Rasterelektronenmikroskop.



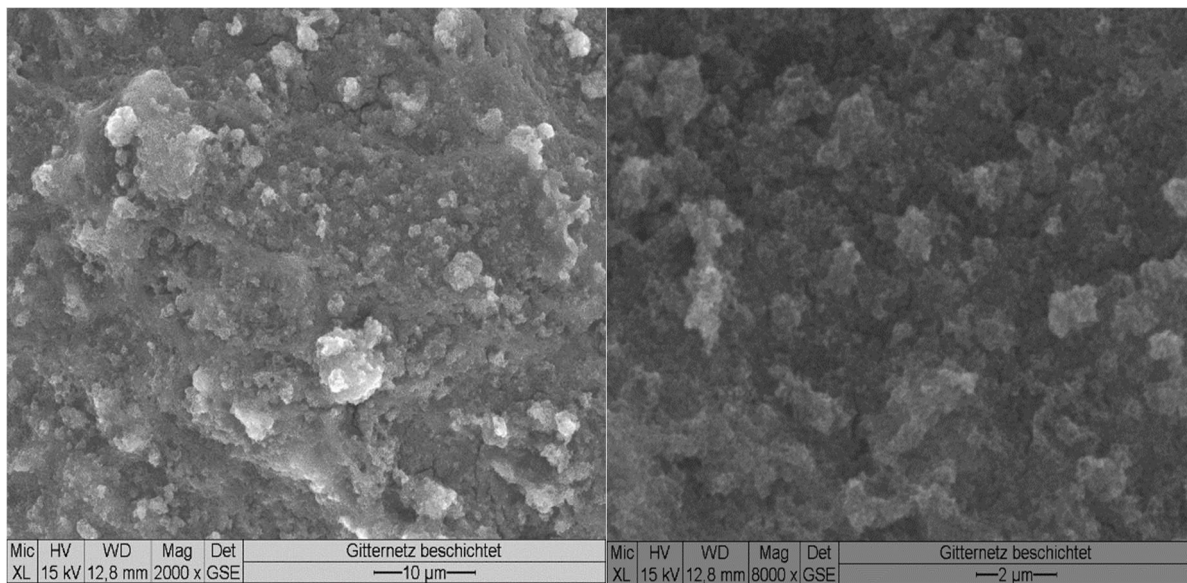


Abbildung 3.2.1-4: Beschichtete und unbeschichtete Edelstahlkatalysatoren der Firma Lynatox bei verschiedenen Vergrößerungen; fraktale Oberflächenstruktur gut erkennbar (Schnabel, 2020)

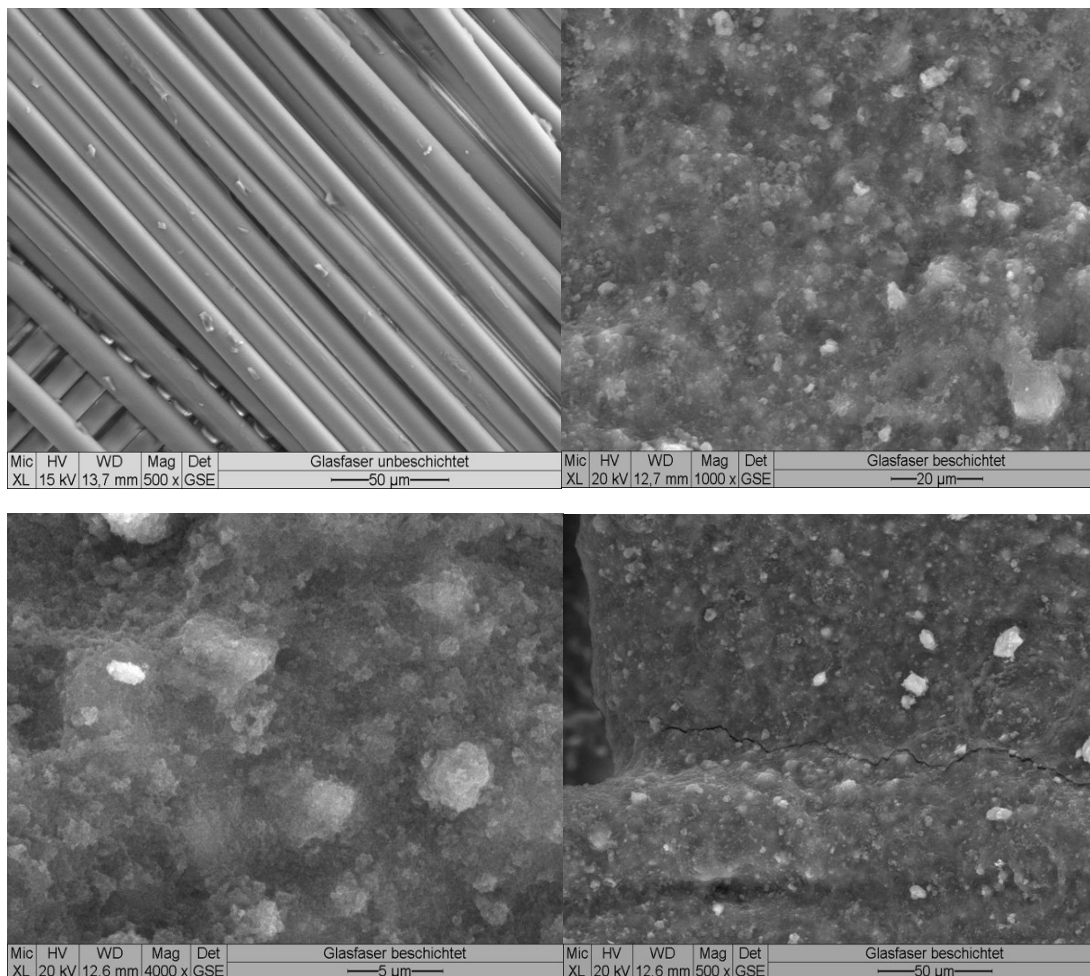


Abbildung 3.2.5-8: Glasfaserkatalysatoren, unbeschichtet und beschichtet in verschiedenen Vergrößerungen (Schnabel, 2020)

Hier traten allerdings Korrosionserscheinungen auf. Durch die Weiterentwicklung des Materials, auch mittels spezifischer Beschichtungen konnten Korrosionserscheinungen an einem ursprünglichen Katalysatormaterial entgegengewirkt werden (vgl. *Abbildung 3.2.9*).

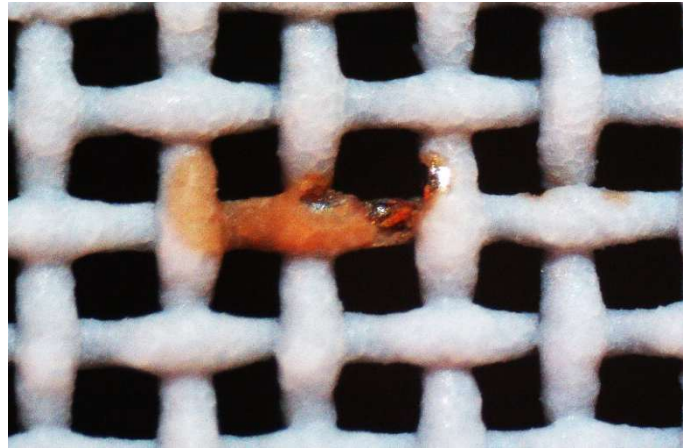
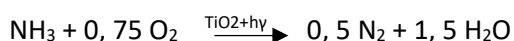


Abbildung 3.2.9: Rost an einem ursprünglichen Katalysatormaterial vor Verbesserung der Beschichtung (Schnabel, 2020)

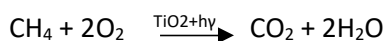
3.3 Erwartete Vorzüge der Photokatalyse aus CLEAN AIR I

Es wurde davon ausgegangen, dass im Gegensatz zur Chemowäsche oder bei der Nutzung von Biofiltern keine hochgradig stickstoffbelasteten Reststoffe wie Abwässer und belastetes Filtermaterial erzeugt werden. Die Oxidation von Methan zu Wasser und Kohlendioxid wurde erwartet. Damit wäre die klimaschädliche Wirkung des Methans um den Faktor 25 auf das Niveau von Kohlendioxid aus dem natürlichen Kohlenstoffkreislauf reduziert und die Emission in den klimaneutralen Bereich verschoben.

Die Oxidation von Ammoniak mittels Photokatalyse verläuft nach *Völker* (2000) im Rahmen folgender Gleichung:



Dabei würde der Ammoniak **idealerweise** zu molekularem Stickstoff und Wasser umgesetzt.



In ähnlicher Weise kann Lachgas als starkes Klimagas zu klimaneutralem Stickstoff oder Nitrat oxidiert werden. Der Reaktionsweg hängt dabei letztlich von der allgemeinen Zusammensetzung der Abluft ab.

Die Photokatalyse kann für Umweltmedien eine deutliche Verringerung der mikrobiologisch-hygienisch relevanten Keimzahlen und deren Stoffwechselprodukte bewirken. Die Mikroorganismen werden dabei indirekt durch die Oxidation der Zellwandstrukturen inaktiviert und abgetötet.

Die MFPA Weimar in Kooperation mit der Firma Lynatox hat durch verschiedene Forschungsprojekte im Bereich der Photokatalyse und dem Einsatz der Photokatalyse zur Reduktion von Schadstoffen in Wässern und Wohnräumen mittlerweile ein breites Know-How auf diesem Gebiet. In den letzten Jahren wurden insbesondere photokatalytische Beschichtungen und Materialsysteme mit sehr hoher Abbau- und Energieeffizienz entwickelt und die technische Anwendung vorbereitet. Die Beschichtungssysteme zur Erzeugung von Photokatalysatoren wurden zum Patent angemeldet.

Im Gegensatz zu anderen photokatalytischen Systemen kommen bei den von der MFPA und der Firma Lynatox entwickelten Photokatalysatoren speziell zugeschnittene UV A LEDs mit langer Lebensdauer zum Einsatz. Dies bewirkt, neben den geringeren Energiekosten, eine wesentlich längere Standzeit und weniger Wartungsintervalle.

Durch den weltweit steigenden Konsum von tierischen Nahrungsmitteln werden Stallanlagen erweitert, erneuert oder neu gebaut. Gleichzeitig stieg in Deutschland auch die Anzahl der Stallanlagen mit Abluftbehandlung um ca. 93 Stück pro Jahr (UBA, 2016). Diese Anlagen wurden lediglich auf die im DLG Signum Test vorgesehenen Parameter und nunmehr nach der novellierten TA Luft hin bemessen. Das klimaschädliche Gas Methan und die Keimbelastung (Bioaerosole) spielen aktuell keine Rolle, sollten aber zukünftig stärker berücksichtigt werden. Ein Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Landwirtschaft ergab, dass es bei ordnungsgemäß arbeitenden „klassischen“ Abluftreinigungsanlagen einen Rückgang der Keimbelastung (Bioaerosole) um lediglich eine Zehnerpotenz gibt.

Bei den Anlagen nach dem Stand der Technik fallen Reststoffe in unterschiedlichen Mengen an (vgl. Abb. 3.3.1). Diese können zum einen in verbrauchte Filtermaterialien und zum anderen in die Waschflüssigkeiten der Abluftwäscher eingeteilt werden. Diese Reststoffe können nur zum Teil und eingeschränkt als Düngemittel weiterverwendet werden (u.a. Hackschnitzel-, Kompost- oder Wurzelholz- Filter). Jedoch erfordert die Weiterverwertung eine Kontrolle des Materials nach der Düngemittelverordnung. Das Material muss nach der Bioabfallverordnung hygienisch unbedenklich sein (UBA, 2016). Aufgrund der strengen Regulierungen sind Verfahren mit wenigen Abfallprodukten zu bevorzugen. Gleiches gilt für die Abwässer von biologischen und chemischen Abluftbehandlungen. Diese Abwässer müssen einer Kläranlage zugeführt werden und können nicht als Wirtschaftsdünger verwertet werden, so dass ein Entsorgungs- bzw. Behandlungsproblem bei den flüssigen Restprodukten besteht.

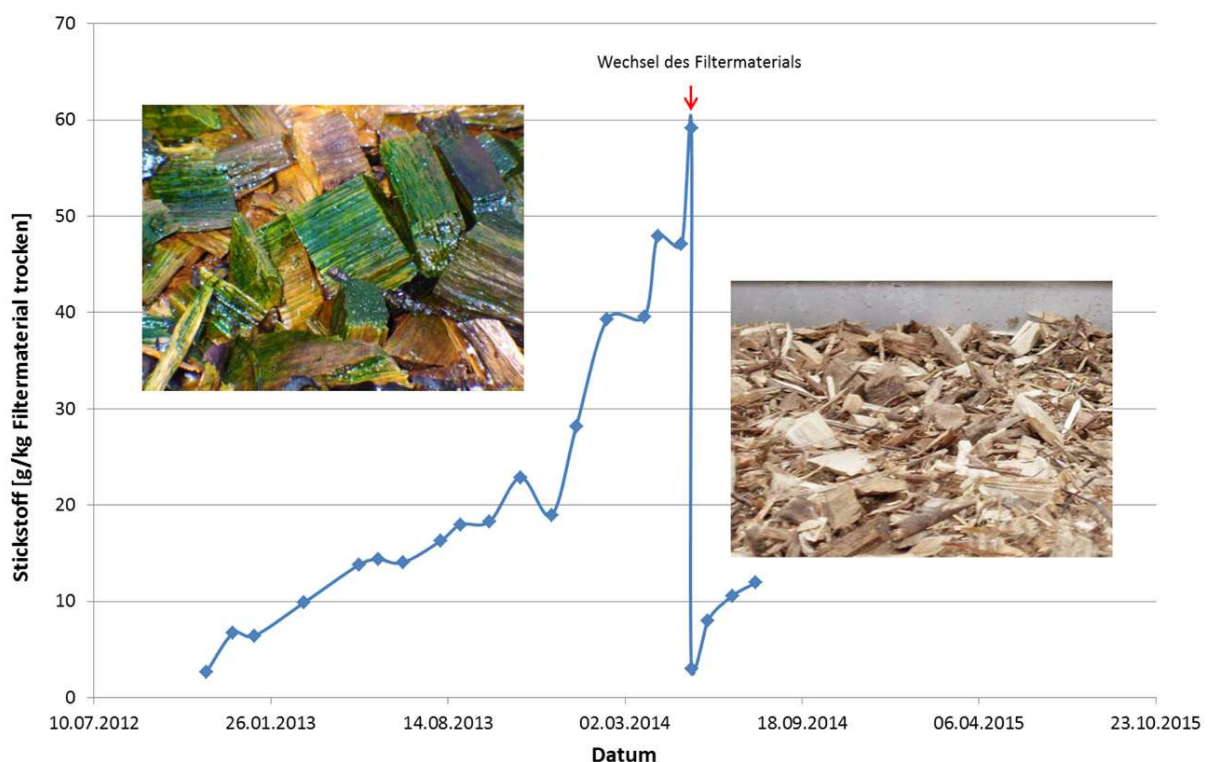


Abbildung 3.3.1: Anstieg der Stickstoffkonzentration im Filtermaterial, Thünen-Institut, J. Hahne (2022)

Die Reinigung von Abluft aus Viehzuchtanlagen mittels Photokatalyse kann somit ein neues Konzept mit folgenden Vorteilen darstellen, die im Praxistest zu prüfen waren:

- Oxidation von Ammoniak zu (idealerweise) N_2 und Wasser, es bleiben keine N- Verbindungen als Abfallstoffe oder in Form belasteter Abwässer übrig (?),
- Abbau von organischen Spurengasen wie Methan zu Kohlendioxid und Wasser, Neutralisation von klimaschädlichen Spurengasen (?),
- Abbau bzw. Neutralisierung der geruchsrelevanten Stoffe,
- Aktive Wirkung des Photokatalysators gegenüber pathogenen Keimen (Hygienisierung),
- Geringe Wartungskosten, da langlebige UV- LEDs genutzt werden können; gleichzeitig ist ein reduzierter Energieeinsatz notwendig.

4 Material und Methoden

4.1 Demonstrator aus CLEAN AIR I und abschließende Untersuchungen

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Laboruntersuchungen an Prototypen aus CLEAN AIR I wurde von der Lynatox GmbH ein Demonstrator entwickelt, welcher im halbtechnischen Maßstab in Clean Air I und II (zu Beginn) für Versuche und Messungen an realer Stallluft am Standort Reinholterode eingesetzt werden konnte.

Um den Photohalbleiter Titandioxid anzuregen, müssen Photonen im UVA-Bereich eingestrahlt werden. Der Reaktor wurde grundsätzlich aus Glas- Röhren aufgebaut, um sowohl für solare als auch artifizielle Strahlung erreichbar zu sein. Hinter den Helix-Katalysatorröhren wurden Reflektorflächen implementiert, welche die Ausbeute an Strahlungsleistung aus der solaren Strahlung erhöhten.

Die kontinuierliche Probenahme erfolgte über einen Zuluftschlauch, welcher immer an derselben Stelle über einer voll belegten Schweinebox positioniert wurde. Auf diese Weise konnten vergleichbare Messungen erzeugt werden.

Der Aufbau des Demonstrators ist im Detail in der nachfolgenden *Abbildung 4.1.1* dargestellt.



Abbildung 4.1.1: Demonstrator vor der Stallanlage in Reinholterode im solaren Betrieb

Um zu gewährleisten, dass sich im Katalysator keine anorganische Verstaubung niederschlägt, wurde ein einfacher Staubfilter **(1)** verwendet. Damit konnte der Gasstrom hinsichtlich grober Staubpartikel vorgereinigt werden. Apparativ anschließend befindet sich die Ventilationseinheit **(2)**, welche unter den gegebenen Bedingungen drei verschiedene Fördermengen (50, 75, 100 m³/h) konstant gewährleisten konnte. Diese Werte wurden mit einem geeigneten Anemometer unter realen Arbeitsbedingungen ermittelt. Die Ventilationseinheit beförderte den Gasstrom in eine Kaskade von vier Katalysatorbausteinen **(3-6)**. Diese in Reihe geschalteten sog. Helixkatalysatoren konnten einzeln betrieben werden, indem die Schadstoffkonzentrationen im Gasstrom über Drei-Wege-Hähne **(7)** vor und nach dem jeweiligen Katalysatorbaustein analysiert wurden. Anschließend wurde das Abgas in die Außenluft abgegeben.

An dieser Stelle konnte parallel die Abbaubarkeit der Bioaerosole mittels Impinger- Messungen charakterisiert werden.

Für die Messungen mit Unterstützung artifizierter Strahlung wurden LED-Bänder von außen an die Röhren des Demonstrators geklebt. Diese wurden so angeordnet, dass ein gutes Verhältnis zwischen homogener Beleuchtung der Katalysatorfläche und minimaler Verschattung erreicht werden konnte. Mit diesen LED-Bändern waren pro Helix-Katalysator 6 LEDs auf die Katalysatoroberfläche gerichtet. Zur Beleuchtung des gesamten Demonstrators wurden also 24 LEDs eingesetzt. Diese stufenlos regelbaren Strahlungsquellen hatten bei maximaler Beleuchtung eine elektrische Gesamtleistung von lediglich 109 W.

Aufgrund des effizienten Aufbaus und des hohen Wirkungsgrades von annähernd 50 % konnte auf diese Weise eine maximale Bestrahlungsstärke Φ_{UVA} (bei 365 nm) von 48,4 W erzeugt werden.

Die Charakterisierung des Abbaus der biogenen Abgase über den Konzentrationsverlauf der Schadgaskonzentrationen wurde mit einem photoakustischen Gasmonitor INNOVA 1512 von Lumasense durchgeführt. Dieses hochpräzise und portable Messgerät ist in der Lage, verschiedene Gase gleichzeitig zu messen und wurde über die vorher beschriebenen Drei-Wege-Hähne an das System angeschlossen. Auf diese Weise konnten die Schadgaskonzentrationen online gemessen und die Auswirkungen der Parametrisierung auf den Abbauprozess aufgenommen werden.

Bei artifizierter Strahlung können diskret messbare Parameterpunkte angefahren werden. Aus diesem Grund wurde zur Validierung der Daten ein randomisierter Versuchsplan mit den Parametern Durchflussmenge und Beleuchtungsstärke entwickelt und angewendet. Das Abbauverhalten der Schadgase konnte durch Messung der jeweiligen Lokalkonzentration erfasst werden.

Der photoakustische Gasmonitor ermittelte Messwerte in einem Zeitinkrement von ca. 1 Minute. Aus diesem Grund wurde jeder Versuchspunkt für 5 Minuten eingefahren, wobei nur die letzten drei Minuten betrachtet wurden, um einen Gleichgewichtszustand der Desorptions-Adsorptions-Prozesse an der Katalysatoroberfläche zu gewährleisten. Aus diesen Werten wurde ein arithmetisches Mittel gebildet. Zur Minimierung von Verschleppungseffekten des Katalysatorsystems wurde eine Doppel-durchführung mit einer nochmaligen Randomisierung der Versuchspunkte durchgeführt.

Die Analytik der Schadgase begrenzte sich auf Ammoniak und Methan als repräsentative Schadgase in biogener Stallabluft von Schweinemastanlagen. Der gesetzliche Rahmen zur Ammoniak- Emission wird hierbei durch die TA-Luft geregelt und ist derzeit auf 30 mg/m³ festgeschrieben (TA-Luft, 2021). Für Ammoniak gilt in der Nutztierhaltung bereits ein enger Grenzwert von 20 ppm (§ 26 Abs. 3 Nr. 1 TierSchNutzV). Zwar liegt die innerhalb dieses Projekts angestrebte Nutzung des Katalysatorsystems in der Reduzierung der Schadgaskonzentration im Abgas, allerdings ist eine Implementierung im Stall in weiterer Folge ebenfalls denkbar und sinnvoll. Methan ist als Treibhausgas aufgrund seiner ca. 25-fachen Wirkung verglichen mit CO₂ (UBA, 2020) von besonderer Relevanz. Die Messung der VOCs erfolgt als Toluol- Äquivalent, was für die erhebliche Bandbreite der in der realen Matrix vorkommenden VOCs insgesamt zu unspezifisch ist.

Mit dem FT-IR-Gasanalysator von GasMET, dem photoakustischen Gasanalysator Lumasense und dem NOx- Messgerät von Horiba wurden abschließende Untersuchungen und Messungen im Agrarbetrieb in Reinholterode vorgenommen. Dabei ergaben sich kurz zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- 1) Der Anteil NH₃, der abgebaut wird, wird zu weiten Teilen in NO_x umgesetzt (Oxidation).
- 2) Methan wird in nicht nennenswerten Mengen abgebaut.

Bzgl. des Ammoniakabbaus wurde bis zu diesem Zeitpunkt immer auf die NO_x- Publikation (*Schnabel, 2021*) verwiesen, wo unter Laborbedingungen mit einfachen programmierbaren Sensoren im Batch NO₂ photokatalytisch umgebaut werden konnte. Es blieb unklar, welche(s) Reaktionsprodukte dabei entstehen. Die Bildung von Nitrat und dessen Beladung des Katalysators und die damit verbundenen schrittweisen Reduzierungen im Wirkungsgrad, d.h. im längeren Betrieb, sind sehr wahrscheinlich und mittlerweile nachgewiesen.

Wahrscheinlich sind auch hier die Bedingungen in Reinholterode zu unterschiedlich. Zwar wird auch Nitrat entstanden sein, was dann seinerseits durch eine Komproportionierung mit NO auch wieder NO₂ bilden könnte, aber das müsste bestenfalls durch ein Abwaschen der Katalysatoren und Bestimmung der Menge an gebildetem Nitrat nachgewiesen werden, was am gegebenen Katalysatorsystem nicht umsetzbar war.

Hinsichtlich des Methans liegt der kaum nennenswerte Abbau sicherlich in der Struktur des Moleküls begründet. Andererseits konnten am Demonstrator bereits Wirkungsgradeinbußen durch öftere und längere Nutzung vorgelegen haben (Nitratablagerungen). Auch wenn die Batch-Versuche in CleanAir I einen Abbau zeigten, sind die Reaktionsbedingungen im Demonstrator ggf. auch wegen der hohen Luftfeuchte und dem damit noch vergrößerten Hemmnis für Methan an die Oberfläche zu adsorbieren nicht erfüllt.

4.2 Katalysatorentwicklung und Messsysteme im Upscaling

Zur Messung der relevanten Gase wurde ein photoakustischer Gasmonitor der Firma Innova / Lumasense mit sechs Filtern eingesetzt. Die photoakustische Gasanalyse zeichnet sich durch einen sehr linearen Bereich aus, welcher von wenigen ppm Konzentration bis zu 100% genauste Gasanalysen ermöglicht. Bei dem verwendeten System kamen Filter für die Messung des TOC (kalibriert über Toluol), Ammoniak, Lachgas, Methan, Kohlendioxid und Wasserdampf zum Einsatz. Der Gasmonitor kann dabei durch den Wechsel der Filter alle genannten Gase online und beinahe simultan bestimmen. Das Messprinzip beruht auf der Photoakustik. Dabei wird das zu messende Gas in einer Durchflussküvette periodisch (gechoppt) mit infraroter Strahlung einer selektiven Wellenlänge für das jeweilige Gas bestrahlt. Dabei geraten die Gasmoleküle in eine resonante Schwingung, welche einen spezifischen Ton erzeugt, welcher mittels der Auswertelektronik analysiert und in einen Konzentrationswert umgerechnet wird. Die *Abbildung 4.1.1* zeigt den technischen Aufbau des Messsystems sowie den verwendeten Gasmonitor im Praxiseinsatz.

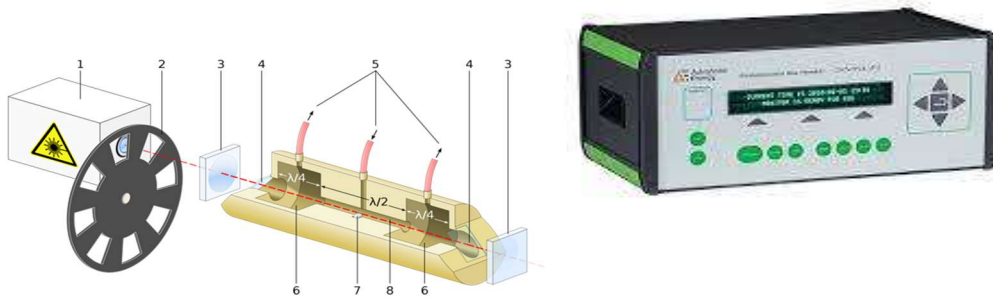


Abbildung 4.2.1: Prinzip der photoakustischen Gasmessung und verwendeter Gasmonitor der Firma Innova (Quelle: 7Solutions)

Ein Nachteil der photoakustischen Messung ist die unspezifische Erfassung von *volatile organic compounds* (VOCs). Durch die Kalibrierung auf Toluol werden diese Verbindungen als Summenparameter erfasst. Die Zusammensetzung komplexer Mischungen kann stofflich somit nicht ausgewertet werden.



Abbildung 4.2.2: FTIR-Gasanalysator Gasmet CX4015

Die Abbildung 4.1.2 zeigt den FTIR-Gasanalysator der Firma Gasmet für die abschließenden Messungen am Demonstrator aus Clean Air I. Der FTIR-Gasanalysator wurde für die kontinuierliche Überwachung der Luft am Arbeitsplatz, in der Umwelt und für Anwendungen in der Qualitätskontrolle entwickelt. Das Gasmessgerät kann bis zu 50 Komponenten gleichzeitig messen. Zusätzliche Messkomponenten können kundenseitig ohne Hardware-Änderungen ergänzt werden. Die Probenzelle kann auf bis zu 50 °C beheizt werden, wodurch Messungen bei hoher Feuchtigkeit und bei wechselnden Bedingungen gewährleistet sind. Der Gasmet CX4015 kann als selbständiger Analysator mit externer Pumpe und Computer betrieben werden.

Aufbau des Prüfstands und Messungen

Um den photokatalytischen Abbau der relevanten Gase zu ermitteln, wurde ein System von der Firma Lynatox entwickelt und zur Verfügung gestellt, welches den Abbau der relevanten Gase durch die photokatalytische Oxidation im Realbetrieb im Upscaling ermöglicht (vgl. Abb. 4.2.3 – Abb. 4.2.5).



Abbildung 4.2.3: Photokatalyse- Reaktor mit Sensorik und Abluftrohr



Abbildung 4.2.4: Photokatalyse- Reaktor mit Sensorik und Zuluftrohr (links)



Abbildung 4.2.5: Vorfilter (rechts) mit Anschlußstutzen für Rohabluft- Schlauch

4.3 Mikrobiologisch-hygienische Untersuchungen und Bioaerosole

Unter Bioaerosolen werden per Definition luftgetragene organische Partikel biologischer Herkunft verstanden. Konkret sind dies u. a. luftgetragene Viren, Bakterien, Schimmelpilzsporen und -hyphen und Pollen, deren Bruchstücke und Stoffwechselprodukte, wie z. B. Endotoxine und Mykotoxine, sowie Fragmente von Hautschuppen, Haaren, Federn, Fäkalien, Einstreumaterial und Futterresten. Bioaerosole entstehen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung entlang der gesamten Produktionskette, bei der vorgelagerten Produktion von Tierfutter, bei der eigentlichen Aufzucht und Haltung der Tiere, bei Tiertransporten, bei der Schlachtung, bei der Fleischverarbeitung, der Weiterverarbeitung von Eiern, beim Transport und der Ausbringung von Mist oder Gülle als Dünger auf Felder (Jahne et al., 2016; Murayama et al., 2010). Die Untersuchungen des Bioaerosols erfolgten begleitend zum Nachweis der photokatalytischen Reduktion der Schadgase.

Luft ist nicht primär als Lebensraum von Mikroorganismen anzusehen, spielt jedoch als Übertragungsmedium bei der Ausbreitung von mikrobiellen Zellen, insbesondere von spezialisierten Sporen der Pilze eine große Rolle. Die Ausbreitung von pathogenen Mikroorganismen stellt ein Gesundheitsrisiko dar, das nach dem Vorsorgeprinzip vermieden oder geringgehalten werden muss. Die Abluftbehandlung kann dazu einen Beitrag leisten.

Um die Wirksamkeit des Verfahrens der Photokatalyse auf die in der Abluft enthaltenen Mikroorganismen zu prüfen, wurde die mikrobiologische Luftqualität untersucht. In drei Messkampagnen wurden Vorfiltration und Katalysatoren auf unterschiedlichen Materialien - in den beiden ersten Serien Carbon-Material, in der dritten Serie Glasfaser-Material - eingesetzt.

4.3.1 Kulturmedien und Indikatororganismen

Für den Nachweis und die Kultivierung der mikrobiologisch relevanten Organismen (Bioaerosole) werden in der mikrobiologischen Praxis spezifische Labormedien eingesetzt und diese nach Inokulation unter Laborbedingungen geführt, wie die *Abbildung 4.3.1* veranschaulicht.

In den Richtlinien VDI 4250 Blatt 3 und VDI 4253 Blatt 3 sind allgemeine Summenparameter („Gesamtbakterien“ und „Gesamtpilze“), in Tierställen spezifisch vorkommende Leitparameter sowie für besondere Fragestellungen relevante „spezielle Messparameter“ angegeben, nebst Kultivierungsverfahren und Bestätigungsreaktionen. Die Auswahl der Leitorganismen scheint dabei rein medizinisch geprägt zu sein und spiegelt nicht unbedingt das tatsächliche Vorkommen der ausgewählten Mikroorganismen in nativen Bioaerosolproben wieder.

Für die Bestimmung der Gesamtmenge bzw. -zahlen von kultivierbaren Mikroorganismen – aerobe Bakterien und Pilze – sowie die selektive Differenzierung von Arten, welche als Indikatoren für Bioaerosole in der Stallabluf anzusehen sind, wurden im Rahmen des Projekts etablierte Verfahren entsprechend der Standard—Arbeitsanweisungen des IUM Mikrobiologischen Labors Erfurt (SOP) angewandt.

Es wurden als hygienerelevante Gruppen *Enterobacteriaceae*, darunter speziell *Escherichia coli*, Enterokokken, Staphylokokken, sowie Schimmelpilze isoliert.

Dabei kamen Universalmedien (Casein-Sojapepton-, Columbia-Blut-Agar) und Selektivmedien (Chromogen-Coliformen-, Slanetz-Bartley- Agar) zur Anzucht ausgewählter Bakteriengruppen zum Einsatz. Für Pilze wurden Malzextrakt-, Dichloran-Glycerol- und Potato-Dextrose- Agar verwendet.

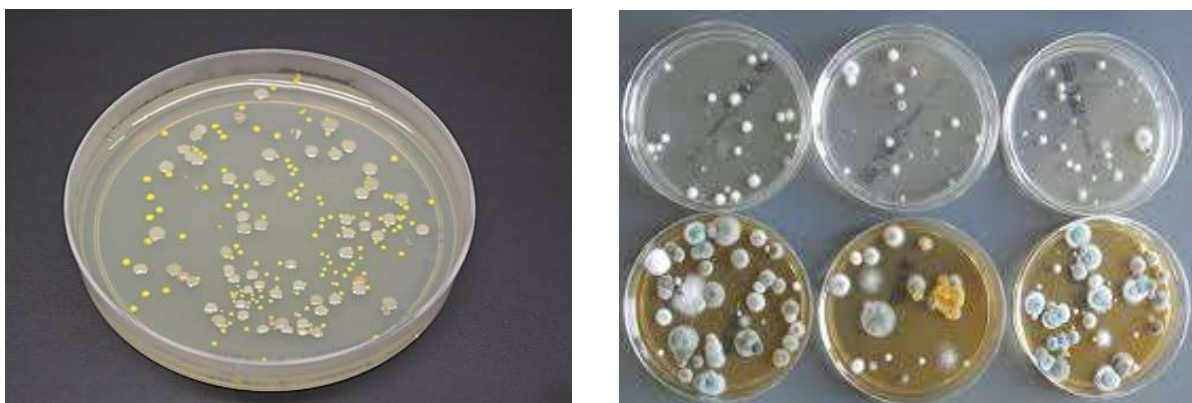


Abbildung 4.3.1: Bewachsene Nähragarplatten für Bakterien (Foto links) und Schimmelpilze (Foto rechts)

4.3.2 Impaktion und Impingertechnik

Zur Erfassung der mikrobiologisch-hygienischen Belastung der Stallabluft wurden im Projektverlauf zahlreiche Messungen mittels Impaktion und Impingement vorgenommen (vgl. Abb. 4.3.2). Die Verfahren eignen sich zur Bestimmung von gramnegativen und grampositiven Bakterien sowie von austrocknungstoleranten Bakteriosporen und Pilz(spor)en. In beiden Verfahren wird eine definierte Menge Luft mithilfe einer Pumpe angesaugt und die in der Luft enthaltenen Bakterien, -sporen und/oder Schimmelpilzsporen in einer sterilen Flüssigkeit (NaCl-Lösung oder Leitungswasser: Impingement) oder direkt auf dem Nährmedium (Impaktion) abgeschieden. Die im Impinger suspendierten Partikel wurden nach Durchmischung und gegebenenfalls Verdünnung auf Nährmedien ausgestrichen. Für den Impinger erfolgte eine Abzweigung des Luftstromes nach der Behandlung, der Impaktor wurde unmittelbar im Abluftstrom platziert.



Abbildung 4.3.2: a) Impaktor MBASS

b) Impinger- Messungen vor Ort (hier am Demonstrator)

DNA- Extraktion: Messdaten Probenahme Reinholterode März 2025

- Für die Messreihe wurden kleine Impingerflaschen mit 30 ml Saline (9 g NaCl/ 1l steril gefiltertes Wasser) befüllt und anschließend autoklaviert
- nach dem Impinger wurde eine „Polizeiimpingerflasche“ angebracht um potenzielle Bioaerosole, welche sich im Impinger wieder reaerosoliert haben, abzuschneiden
- Zum Schutz der verwendeten Pumpen wurde ebenfalls noch eine Flüssigkeitsfalle zwischen Gaszähler und Impinger geschaltet
- Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 4.3.2c dargestellt



Abbildung 4.3.2 c: Versuchsaufbau zur Probenahme mittels Impinger

- Die Extraktion erfolgte unter Verwendung des E.Z.N.A Water DNA Kit, Reversions Number: v5.0, manual Date: August 2019, LOT D55256214-46 (Omega Bio-tek Inc, Georgia).

Tabelle 4.3.2 a: Messdaten Eingang Reaktor

Proben- bezeich- nung	Endvolumen der Impinger [ml]	Dauer [min]	Volume n [l]	Volumenstr om [l/min]	Ort	Bemerkung
E 1	15	87	500	5,75	Außenluft- messung	
E 2	15	53	1001	18,89	Stallluft- messung durch Schlauch welcher Tür gelegt wurde	Tür nicht verschlossen, Zugluft
E 3	9	47	1001	21,30		
E 4	10	39	1010	25,90		
E 5	22	204	502	2,46	Stallluft- messung direkt über den Tieren -	keine Zugluft
E 6	11	49	1013	20,67		Polizeiflasche für E 6
E 7	10					
E 8	15					Leerer Impinger zum Auffangen des „Primärim- pingermediums“ und der Polizei- flasche um Volumenverlust zu bestimmen
E 9	13	83	1073	12,93		
E 10	16	30	79	2,63		
E 12	15	30	539	18,00		
E13	18	18	53	2,94		
E 14	12	13	30	2,31		

Tabelle 4.3.2b: Messdaten Ausgang Reaktor

Proben- bezeichnung	Endvolumen der Impinger [ml]	Dauer [min]	Volumen [l]	Volumenstrom [l/min]	Ort	Bemerkung
A 1	8	35	1000	28,57	Stallluft- messung durch Schlauch welcher Tür gelegt wurde	Tür nicht verschlossen, Zugluft
A 2	26	102	349	3,42		
A 3	11	36	1000	27,78	Stallluft- messung direkt über den Tieren	keine Zugluft
A 4	8	36	1000	27,78		
A 5	9	46	1211	26,32		
A 6	10	39	1029	26,38		
A 7	10	37	1002	27,08		
A 8	14	59	174	2,95		

4.4 Sensorauswahl bzw. -entwicklung im Labor

Um die prinzipielle Eignung der photokatalytischen Oxidation für den Abbau von relevanten Stoffen aus Stallabluft zu prüfen sowie eine prinzipielle Unterscheidung von verschiedensten Katalysatormaterialien und Reaktorkonzepten durchzuführen, wurden eine Reihe aufwendiger Laboruntersuchungen mit Reinstgasen durchgeführt.

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Suche nach einem geeigneten Sensorsystem und dessen umfangreicher Testung bzgl. der Schadgase unter zunächst Laborbedingungen und schließlich im Feldversuch, eine besondere Herausforderung darstellte. Die Auswahl eines relevanten Sensorsystems ist dabei durch folgende Charakteristika der Stallabluft geprägt und eingeschränkt: Aggressive/Korrosive Bestandteile (- dies verlangt nach einem korrosionsbeständigen Sensor und idealerweise auch nach korrosionsbeständigem Gehäuse/Einhausung), Staub und Feststofflast (Abgedichteter Sensor, Reinigungsmöglichkeit/Regenerierung des Sensors), hohe Luftfeuchtigkeit (Wasserdichtigkeit bzw. Temperatur höher als Umgebungstemperatur (Vermeidung von Kondensatbildung auf dem Sensor und Sensorgehäuse). Dabei erwiesen sich Systeme wie PCB und Ahlborn als ungeeignet. Bereits verfügbare Gassensoren z.B. der Firma Ahlborn waren auf Grund ihrer Bauweise ungeeignet, wie auch gängige DIY/Opensource Lösungen. Die Auswahl fiel nach intensiver Markt- und Angebotssondierung auf Sensoren aus dem automotiv Bereich, da diese auf Grund ihrer Auslegung und den Anforderungen an Verbrennungsmotorabgassensoren die geforderten Merkmale erfüllen oder sogar übertreffen.

Die aggressive und korrosive Stallabluft bzw. ihrer Bestandteile verlangte nach einem korrosionsbeständigen Sensor und idealerweise auch nach korrosionsbeständigem Gehäuse/Einhausung bei entsprechender Staub- und Feststofflast (Abgedichteter Sensor, Reinigungsmöglichkeit/Regenerierung des Sensors). Bei hoher Luftfeuchtigkeit (Wasserdichtigkeit bzw. Temperatur höher als Umgebungstemperatur) spielte die Vermeidung von Kondensatbildung auf dem Sensor und Sensorgehäuse eine wichtige Rolle. Die Auswahl der Sensoren aus dem automotiv Bereich zeigten auf Grund ihrer Auslegung und den Anforderungen an Verbrennungsmotorabgassensoren die geforderten Merkmale. Sowohl der Automotive Sensor (hinsichtlich seiner Funktionsweise für NOx) als auch die Breitband- Lambdasonde auf Zirkoniumbasis für Sauerstoffgehalt/CO₂ konnten umfassend getestet werden. Hinsichtlich der starken Schwankungen der Schadgase über den Tagesverlauf ergibt sich dabei die Notwendigkeit des Livemonitorings mit Regelkreis. Umfangreiche Arbeiten erfolgten im Rahmen der Kalibrierung der Sensoren, Datenerfassung und ihrer -übertragung.

4.5 Strömungssimulation am Katalysator

Die Strömungssimulation für den Katalysator wurde durch die Firma Lynatox erstellt. Die bei Lynatox verwendeten Photokatalysatoren bestehen in der Grundstruktur aus einem Gewebe, welches aus folgenden Materialien bestehen kann:

- Glasfaser
- Edelstahl
- Kohlefaser

Um die Strömungseigenschaften eines großen Aufbaus zu ermitteln, aber dennoch die Rechenzeit im Rahmen zu halten, muss ein strömungstechnisches Äquivalenzmodell mit makroskopischen Eigenschaften erstellt werden, ohne die Strömung der Mikrostruktur jedes Mal erneut zu berechnen.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Sensortechnik und Weiterentwicklung der photokatalytischen Technik

Im Rahmen der Systemexploration hat sich die Firma Lynatox mit der Entwicklung weiterer Reaktorkonzepte befasst. Die *Abbildungen 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3* zeigen den Aufbau des Reaktorsystems inkl. Messtechnik und Lüfter bei den Feldmessungen. Die Weiterentwicklung des Helixreaktor stand dabei im besonderen Fokus. Die Reaktorgeometrie, die LED- Anordnung, Betrachtungen zur Luftströmung waren dabei von Bedeutung. Die Weiterentwicklung des Katalysators schloss insbesondere die Oberflächenvergrößerung ein. Das Messsystem des Reaktors ermöglichte den Vergleich von Abbaugeschwindigkeiten bei verschiedenen Lichtleistungen und Gasdurchflüssen.



Abbildung 5.1.1: Aufbau des Katalysatorsystems inkl. Peripherie und Messtechnik



Abbildung 5.1.2: Peripherie und Messtechnik am Katalysatorsystem



Abbildung 5.1.3: Lüfter mit Abluftschlauch (links) und Rohabluft(Zuluft)schlauch (rechts) inkl. mikrobiologischer Probenahmetechnik (rechts)

Sensorevaluierung

Eine der Grundlagen einer energetisch sinnvollen Abluftreinigung jeglicher Form, bei der es zu einem Energieverbrauch kommt, ist die Bestimmung des optimalen Arbeitspunktes mit dem niedrigsten spezifischen Energieverbrauch pro gereinigter (behandelter) Menge Luft.

Somit war es notwendig, die Abluftreinigungsanlage (in diesem Fall Titandioxidphotokatalysatoren der Lynatox GmbH mit Anregung der Photokatalyse durch UVA-LED Beleuchtung) in verschiedenen Betriebszuständen (Luftmenge und Lichtintensität) zu betreiben und dabei mittels geeigneter Sensorik die Änderung in der Zusammensetzung der Abluft (Messung am Eingang und Ausgang des Luftreinigers) in Relation zu der aufgewendeten Energiemenge zu betrachten und zu analysieren.

Auf diese Weise wird ermöglicht, später in einer kommerziellen Anlage jeder Zeit auf Änderungen in der Zusammensetzung der Abluft zu reagieren als auch die geforderte Abbauleistung zu gewährleisten; dies immer im Hinblick auf die für den Abbau benötigten Energie.

Durch die korrosiven Eigenschaften der Schweinestallabluft (z.B. die Bestandteile Ammoniak und NO_x in Kombination mit H₂O), war es im Entwicklungs- und späteren Evaluationsprozess von großer Wichtigkeit, geeignete robuste und nicht zu Kontamination oder Passivierung neigende Messprinzipien und somit Sensoren im Rahmen der Marktsondierung zu finden. Dies war notwendig, da im Dauereinsatz ein Abdriften der Sensormesswerte nur bedingt kompensiert werden kann, und eine kurze Einsatzdauer mit kurzen Austauschintervallen nicht praktikabel ist.

Dies hat zu der Auswahl beheizter Sensoren aus dem automotive Bereich (mit hoher Toleranz gegen Witterungseinflüsse und Abweichungen in der Gaszusammensetzung) zur Erfassung von Sauerstoffkonzentration und NO_x-Konzentration geführt welche so einer Kondensation der Abluft auf dem Sensor und somit der Verschmutzung und Passivierung entgegenwirken.

Für den Parameter Staubbelastung der Luft, wurde ein optisches Messverfahren gewählt. Die Erfassung der durch die Versuchsanlage geleiteten Luftmenge erfolgt mittels eines Heißdrahtanemometer. Dieses stammt ebenfalls aus dem Bereich Automotive und zeichnet sich ebenfalls durch Robustheit und gute Verfügbarkeit aus.

Vor dem Einsatz im Feldversuch im Agrarbetrieb kam es zu einer Kalibrierung und Kreuzsensitivitätsbestimmung der ausgewählten Sensorsysteme. Diese erfolgte in einem separaten Labormessaufbau an der MFPA in Weimar. In einer geschlossenen Messkammer und mit Hilfe geeigneter Normgase mit bekannten Konzentrationen der zu detektierenden Stoffe konnte so eine Evaluation der Sensoren hinsichtlich Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit der Ergebnisse umgesetzt werden (vgl. auch Abb. 5.1.4).

Abwechselnde Test Begasung mit Ammoniak und NO₂ zur Bestimmung der Kreuzsensitivität

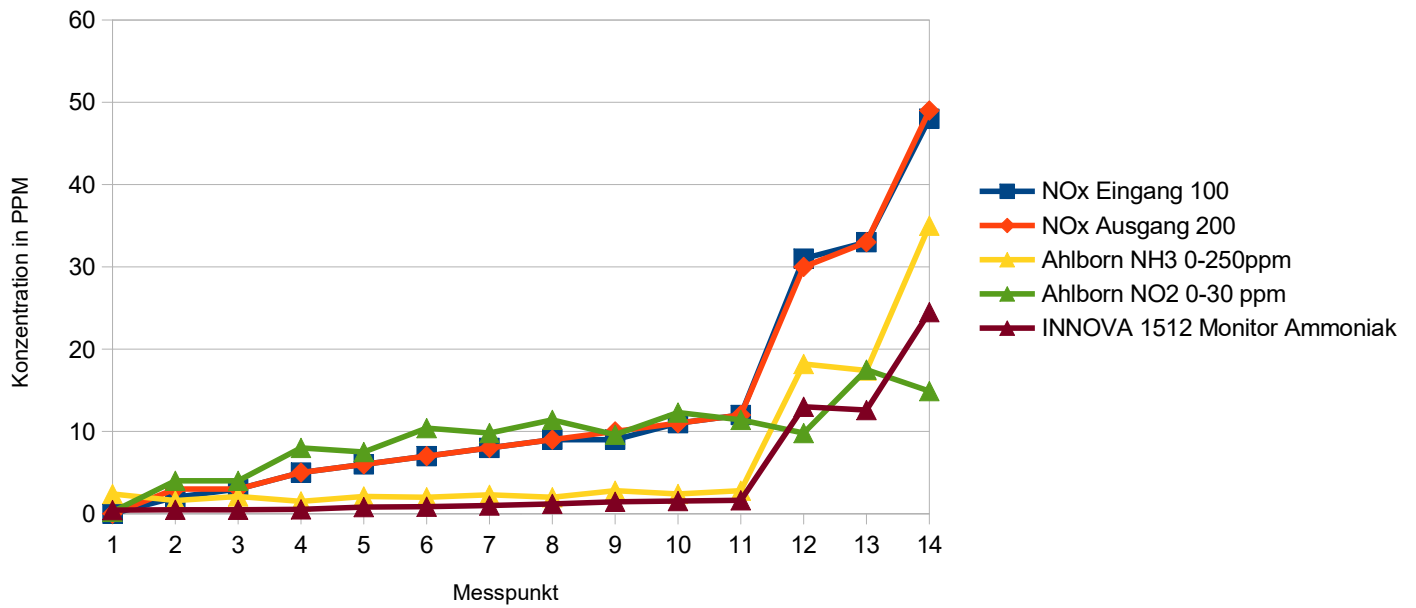


Abbildung 5.1.4: Testmessungen zu Abluftkomponenten

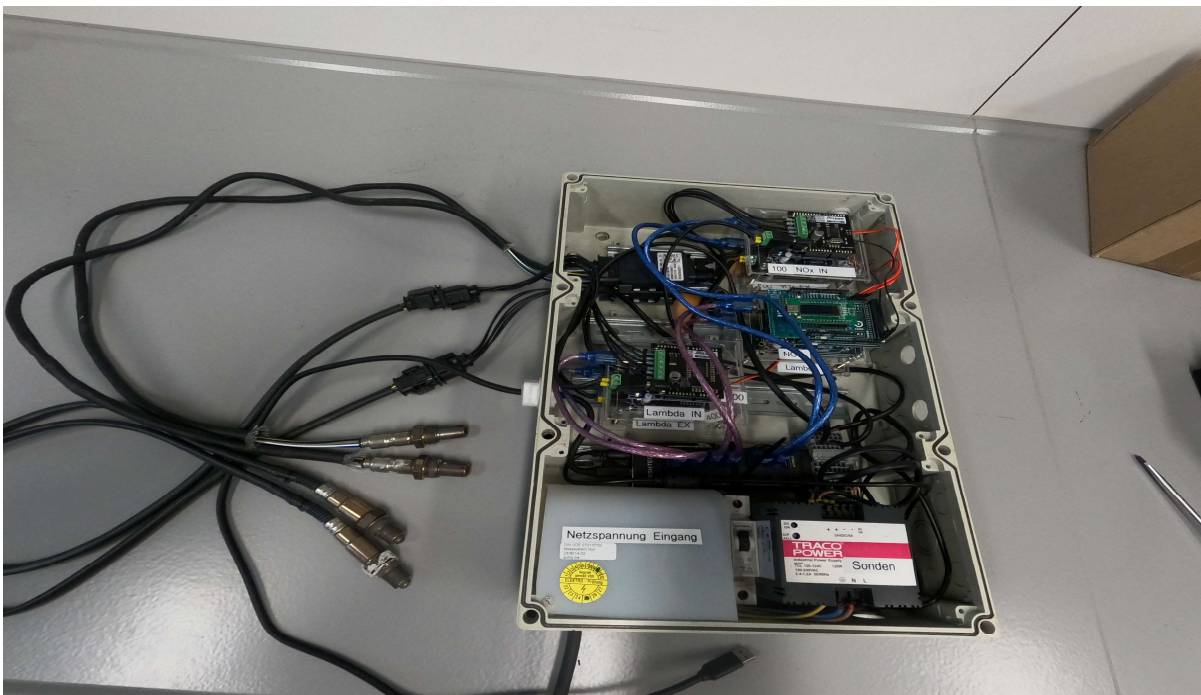


Abbildung 5.1.5: Entwickelte Messbrücke bestehend aus Lambdasonden und NO_x-Sensoren für die zeitgleiche Messwerterfassung an Eingang und Ausgang

Um für den Einsatz im Feldversuch ein ausreichend robustes Messsystem zu realisieren, wurde eine entsprechende voll integrierte Messbrücke konstruiert (vgl. Abb. 5.1.5). So konnten Spannungsversorgung, Sensorrohdatenerfassung, Messwertauswertung und Datenübertragung in ein kompaktes wetterfestes Gehäuse integriert werden. Dies auch im Hinblick auf eine spätere kommerzielle Nutzung des Systems im Produktiveinsatz.

Tabelle 5.1 Übersicht den verwendeten Sensoren und Messprinzipien

Sensorbezeichnung	Messprinzip	Detektierte Messgröße	Einsatzzweck im Messaufbau
LumaSense INNOVA 1512 Photoakustischer Gasmonitor	Photoakustischer Gasmonitor	CO ₂ , N ₂ O, NH ₃ , CH ₄ und TOC Konzentration in PPM	Kalibriertes Messgerät zur Evaluation der für den Dauereinsatz gedachten Gassensormesswerte
Infineon CO ₂ PAS Sensor	Photoakustischer Gasmonitor	CO ₂ -Konzentration in PPM	Evaluation des Einsatzes im Dauerbetrieb einer Pilotanlage
Bosch LSU 4.9 Breitbandlambdasonde	Keramik Sensor (beheizt)	O ₂ Sauerstoffkonzentration in %	Evaluation des Einsatzes im Dauerbetrieb einer Pilotanlage
Bosch EGS-NX2 NOx Sensor	Keramik Sensor (beheizt)	NOx in PPM	Evaluation des Einsatzes im Dauerbetrieb einer Pilotanlage
MAF-Sensor	Heißdrahtanemometer	g/s Luftmasse	Evaluation des Einsatzes im Dauerbetrieb einer Pilotanlage
Sensirion SEN55	Laserlicht Ablenkung (Staub)	PM, RH/T, VOC	Evaluation des Einsatzes im Dauerbetrieb einer Pilotanlage

Der Automotive Sensor wurde hinsichtlich seiner Funktionsweise für NO_x umfassend getestet, ebenso die Breitband- Lambdasonde auf Zirkoniumbasis für Sauerstoffgehalt/CO₂. Aufgrund der starken Schwankungen der Schadgase über den Tagesverlauf ergibt sich die Notwendigkeit des Livemonitorings mit Regelkreis. Weitere Überlegungen und Arbeiten umfassten die Differenzmessung mit 2 Sensoren je Typ, Möglichkeiten der Differenzmessung mit 3 Sensoren je Typ, die Parameter Steuerung LRG, die Nitratbildung (relevant für Langlebigkeit der Katalysatoroberfläche), die Steuerung einer möglichen Katalysatorregeneration und Katalysatorlebensdauer. Umfangreiche Arbeiten erfolgten im Rahmen der Kalibrierung der Sensoren und Datenerfassung. Die Betrachtung des Gesamtsystems Schweinestall äquivalent dem Verbrennungsprozess eines Ottomotors stellte dabei einen innovativen Entwicklungsschritt im Projekt dar, insbesondere die Anwendung der Kenntnisse der katalytischen Abgasreinigung und der damit einhergehenden Regelung als möglicher Ansatz zur Steuerung des Photokatalysators (Gleichsetzung Verbrennung zur "kalten Verbrennung").

Durch die Kombination dieser verschiedenen Messprinzipien und Sensoren wurden erfolgversprechende Grundlagen für die kommerzielle Umsetzung eines durch Anwendung von Mess- und Regeltechnik Arbeitspunkt gesteuerten Luftreinigungssystems geschaffen.

5.2 Abluftreinigung und Abbau der Schadgase im Feldversuch

Zur Testung des Upscaling-Reaktors sowie den Sensorentwicklungen wurden im drei umfangreiche Feldtests vorbereitet und im Agrarbetrieb durchgeführt. Dabei ging es um die Parameter Ammoniak, Staub, N₂O, NO_x, CO₂, CH₄, VOC, O₂ und Temperatur.

Die Messkampagne im Juli 2024 diente der Erprobung und Evaluierung von Messregime und –system. Im November 2024 ging es um weitere Optimierungen, Anpassungen und Testung der Sensorik- und Messsysteme. Bei beiden Messkampagnen war der Photokatalysator mit Kohlenstofffasern als Basismaterial bestückt. Für beide Messkampagnen werden im Bericht nur die gesetzlich geforderten Parameter Ammoniak und Staub grafisch dargestellt.

Im März 2025 arbeitete der Photokatalysator auf Glasfaserbasis. Bei dieser Messkampagne kamen sämtliche bisherige Optimierungsschritte und Innovationen zum Tragen, so dass diese Ergebnisse als wesentlich und abschließend relevant betrachtet werden können.

5.2.1 Messkampagne Juli 2024

Die Abbildungen 5.2.1 - 5.2.3 veranschaulichen die Messergebnisse für Staub bei großen und kleinen Partikelgrößen sowie Ammoniak für die Messkampagne im Juli 2024.

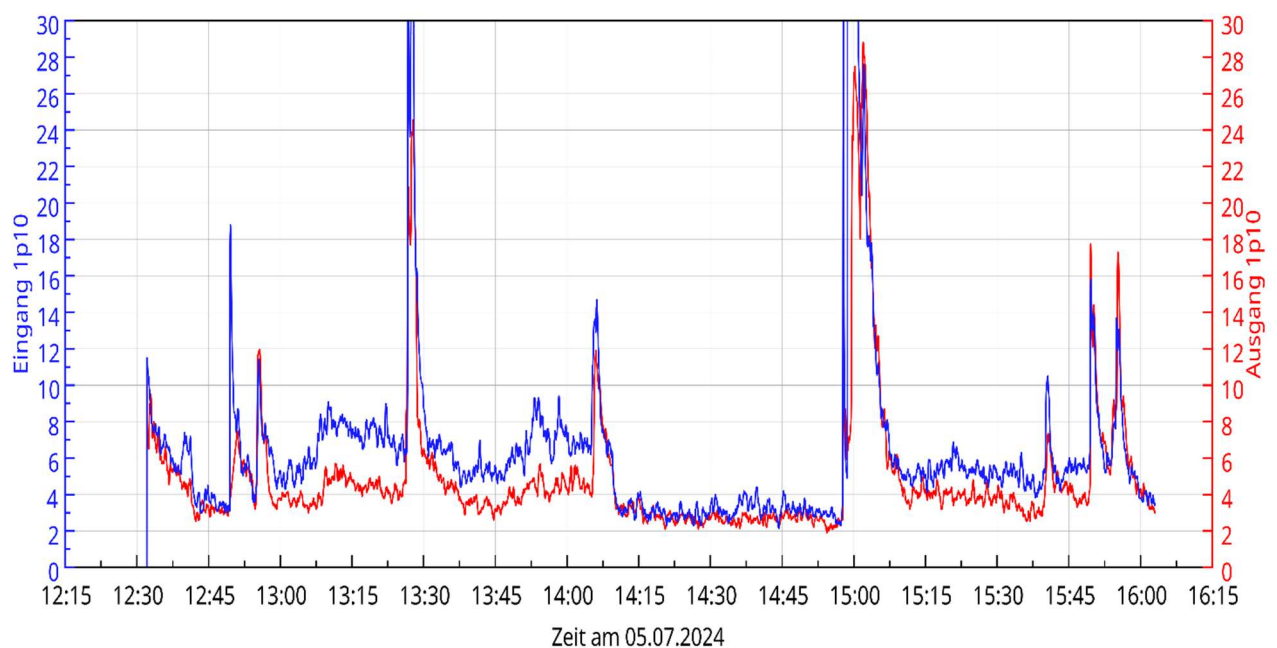


Abbildung 5.2.1: Staubpartikel grob im Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und –ausgang am Katalysator; Messkampagne Juli 2024

Bezüglich der Grobpartikel zeigten sich partiell auffällige Differenzen zwischen Ablufteingang und –ausgang (vgl. Abb. 5.2.1), die nicht auf mögliche Undichtigkeiten am Vorfilter zurückzuführen sind, sonst hätten sie durchgängig festgestellt werden müssen, sondern ursächlich weisen sie auf ein Freibrennen des Katalysators nach Inbetriebnahme hin. Dieser Effekt war beim Feinstaub nicht bzw. kaum festzustellen (vgl. Abb. 5.2.2).

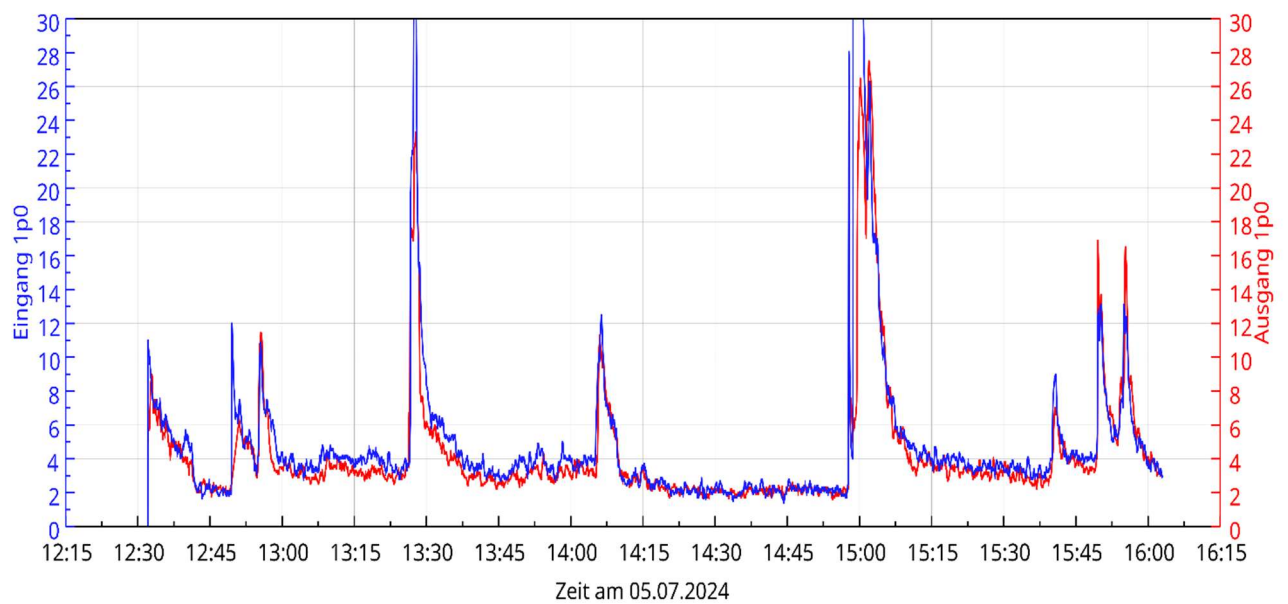


Abbildung 5.2.2: Feinstaubpartikel im Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und – ausgang am Katalysator, Messkampagne Juli 2024

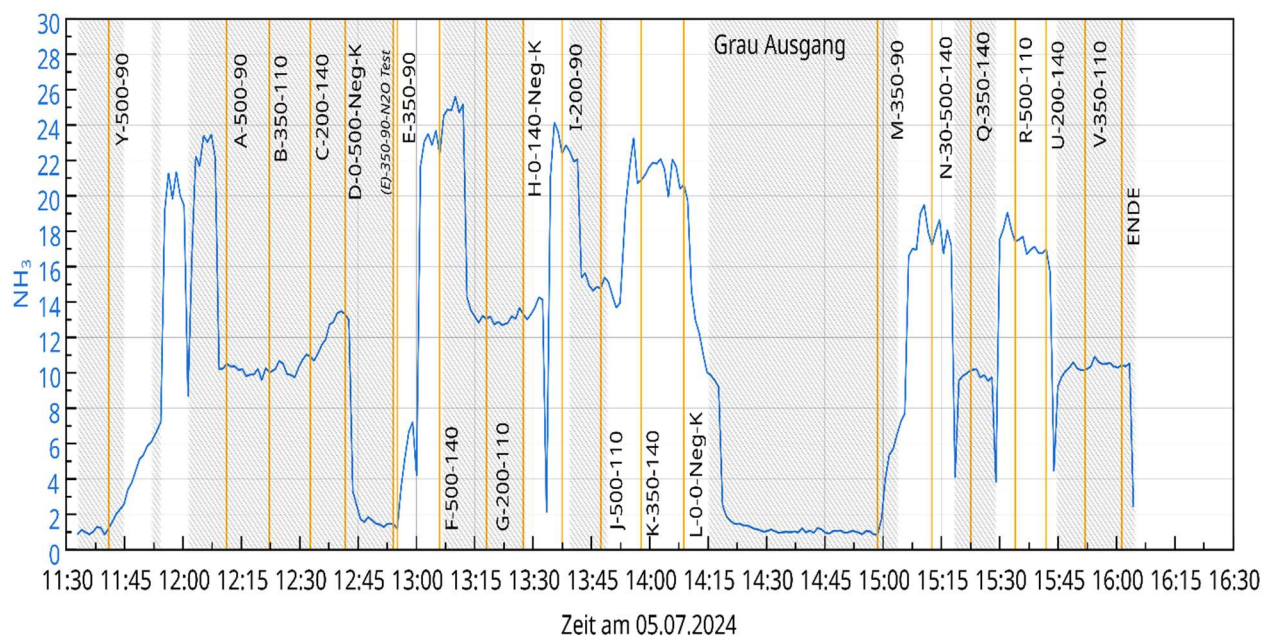


Abbildung 5.2.3: Ammoniakabbau: Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und – ausgang am Katalysator bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (90, 110 und 140 m³/h) in den Messstufen A - Y

Die Abbildung 5.2.3 veranschaulicht den Ammoniakabbau in den einzelnen Messphasen. Beim Ammoniakabbau wurde deutlich, dass bei hoher Lichtleistung und relativ niedrigen Abluftvolumina die höchsten Effekte erzielt werden konnten. Eine detailliertere Darstellung und Diskussion erfolgt im Zusammenhang mit Messkampagne 3 im März 2025.

5.2.2 Messkampagne November 2024

Die Abbildungen 5.2.4 - 5.2.6 veranschaulichen die Messergebnisse für Staub bei großen und mittleren Partikelgrößen sowie Ammoniak für die Messkampagne im November 2024.

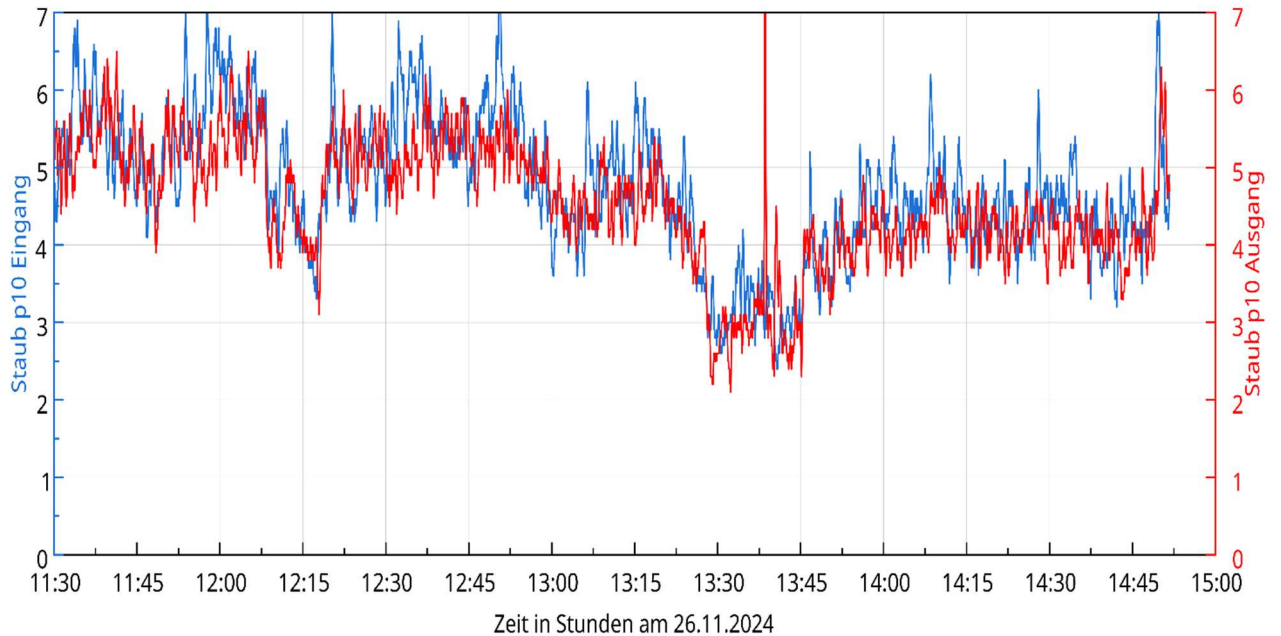


Abbildung 5.2.4: Staubpartikel grob im Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und – ausgang am Katalysator; Messkampagne November 2024

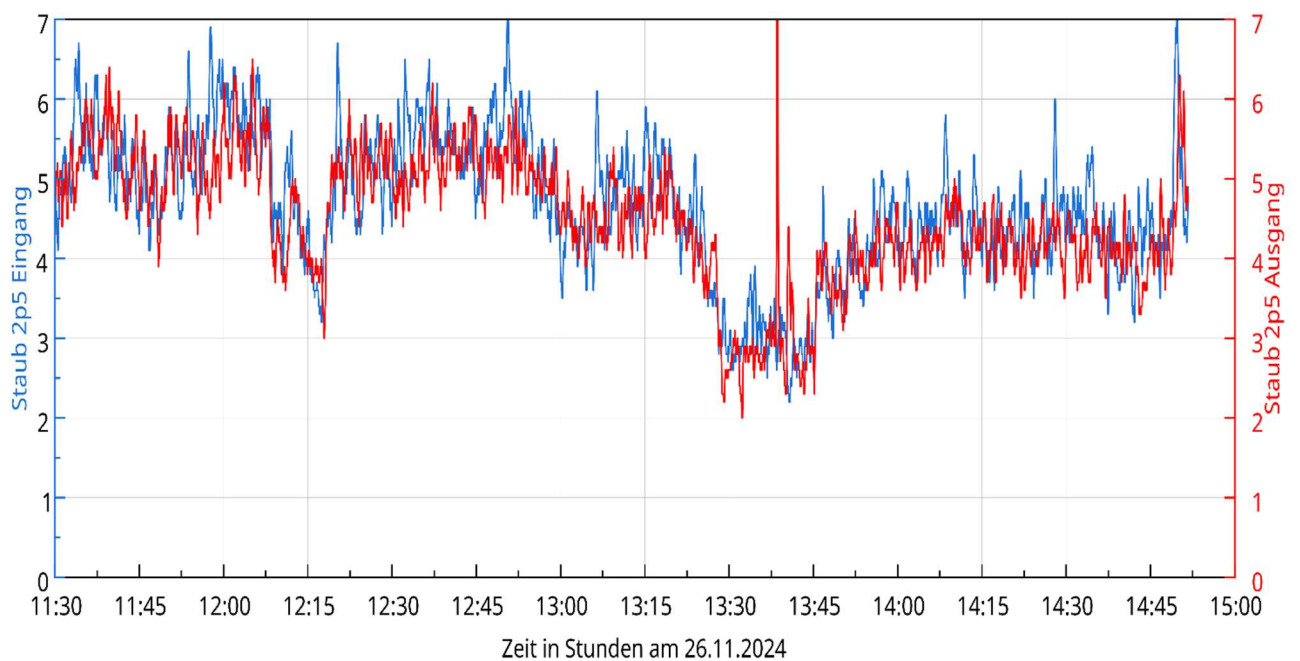


Abbildung 5.2.5: Staubpartikel grob im Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und – ausgang am Katalysator; Messkampagne November 2024

Für die verschiedenen Partikelgrößen bei Staub zeigten sich in der Messkampagne November 2024 nahezu identische Werte für den Ablufteingang und –ausgang, was auf eine stabile und sehr gute Vorfilterung hinweist, die eine Voraussetzung dafür ist, dass die Katalysatoroberfläche geschützt wird und somit keine Einbußen beim Wirkungsgrad aufgrund einer Staubbelastung herrühren können. Mit dem Einfahren und Betrieb des Vorfilters kommt es zu Einlagerungen von Staub im Filter und damit zu höheren Filterleistungen. Dies bestätigt die Erfahrungen mit dem mechanischen Vorfilter, die bereits in CLEAN AIR I gemacht werden konnten. Dabei wurden deutlich mehr als 70% Staub reduziert wie auch die mikrobiologischen Daten belegen konnten.

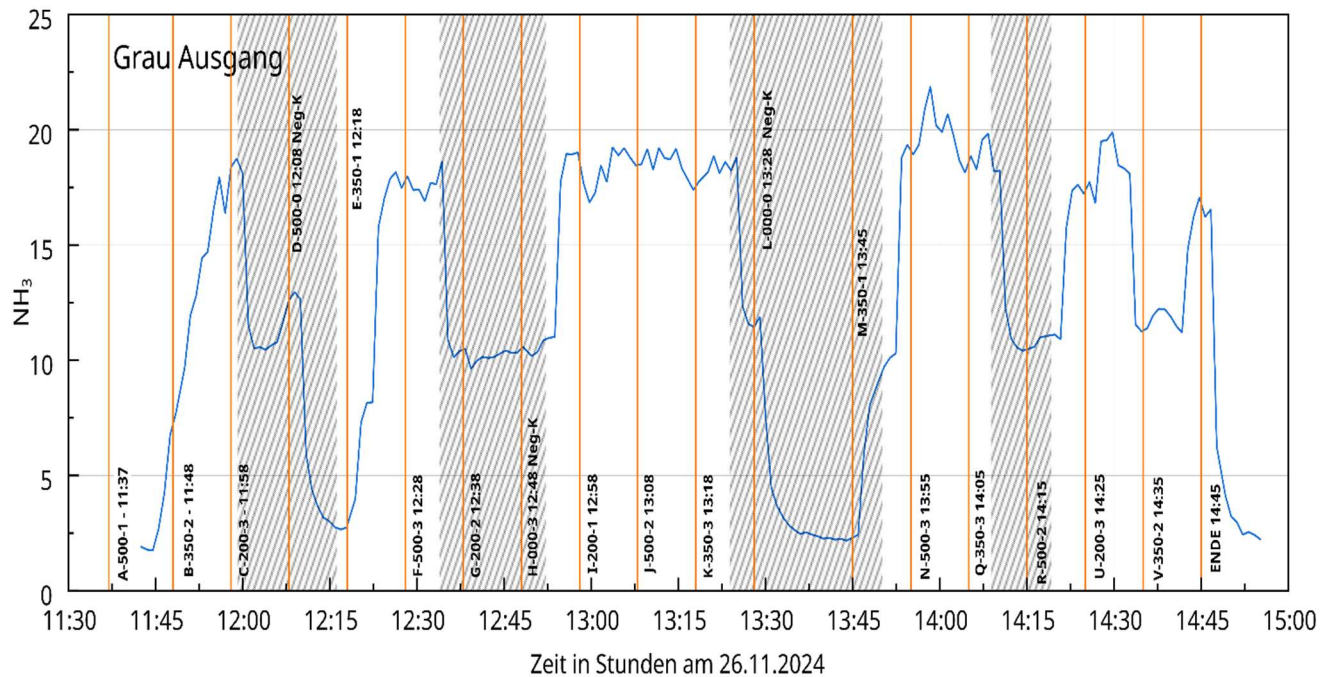


Abbildung 5.2.6: Ammoniakabbau: Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und –ausgang am Katalysator bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (1: 90, 2: 110 und 3: 140 m³/h) in den Messstufen A - V

Die Messkampagne im November 2024 stellte eine optimierte Wiederholung der Julimessungen innerhalb der dargestellten Messstufen A – V dar. Dabei bestätigten sich grundlegend die Juli-Ergebnisse, andererseits konnten wichtige Erfahrungen und Erkenntnisse umgesetzt und das Messsystem und –prozedere insgesamt weiter optimiert werden.

5.2.3 Messkampagne März 2025

Die Abbildungen 5.2.7 - 5.2.17 veranschaulichen die Messergebnisse für die gesetzlich relevanten Parameter Staub bei großen und kleinen Partikelgrößen und Ammoniak sowie weiteren Parametern wie NO_x, CO₂, CH₄, VOC, O₂ und Temperatur für die Messkampagne im März 2025 am Glasfaser(GF)-Katalysator. Dabei ging es insbesondere auch um die Funktionalität der eingesetzten Sensorik.

Die verschiedenen Partikelgrößen bei Staub zeigten sich in der Messkampagne März 2025 in nahezu identischen Werten für den Ablufteingang und –ausgang, was die stabile und sehr gute Filterleistung des Vorfilters erneut bestätigte (vgl. Abb. 5.2.7 und 5.2.8).

Staub

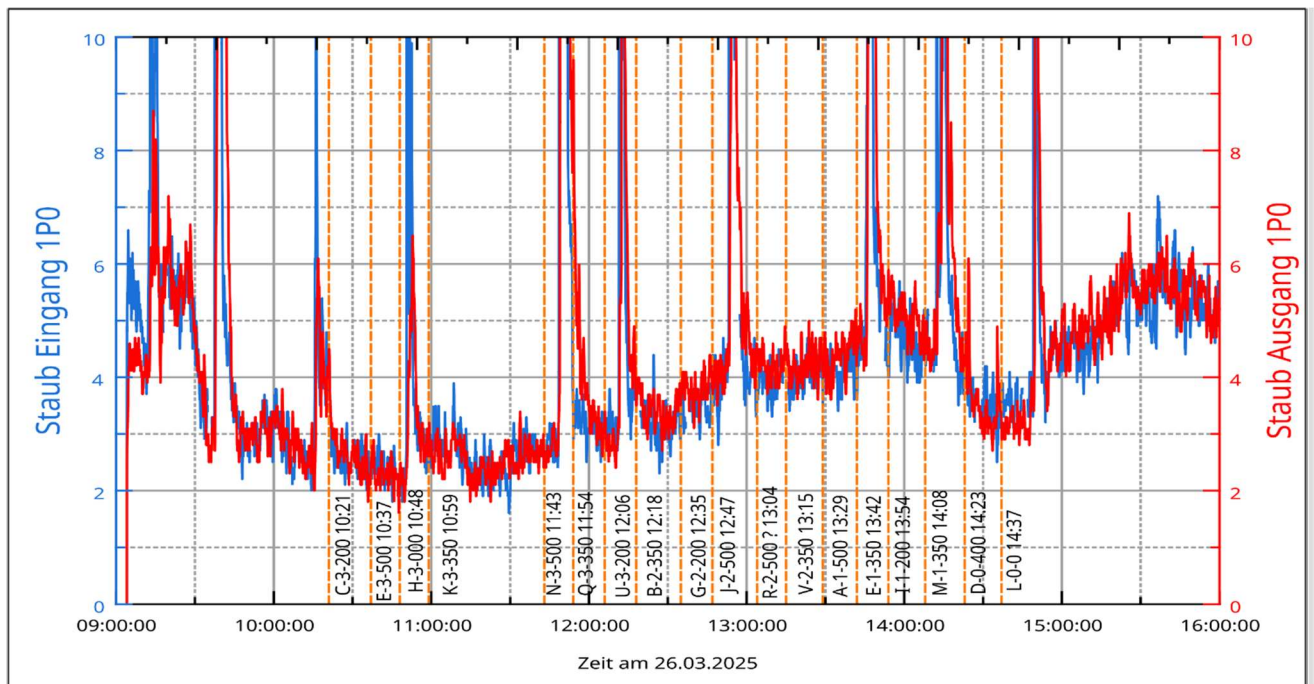


Abbildung 5.2.7: Feinstaubpartikel im Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und –ausgang am GF-Katalysator; Messkampagne März 2025

Im Dauerbetrieb des Vorfilters kommt es zu höheren Filterleistungen durch „Zusetzen“ bzw. Verengung von Grobporen, so dass erwartete Unterschiede bei der Sensorik von Fein- bzw. Grobstaubpartikeln verwischen wie die Abbildungen 5.2.7 und 5.2.8 veranschaulichen.

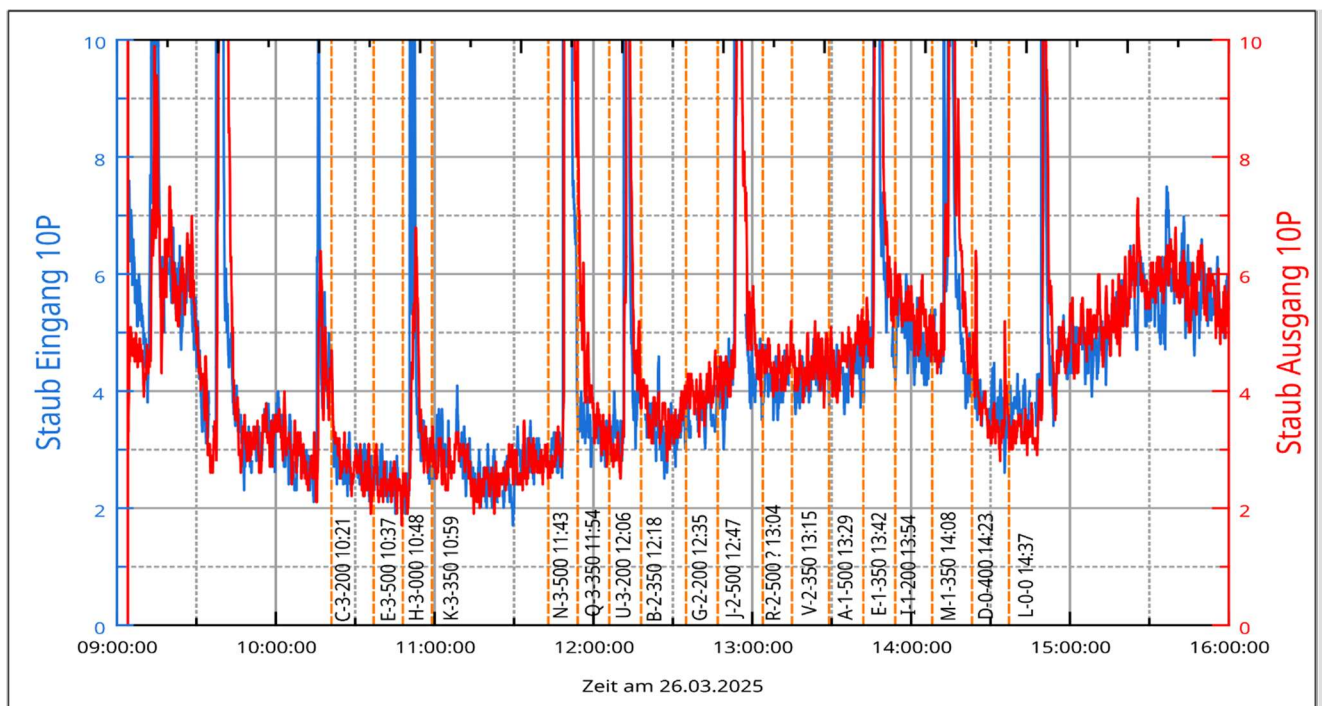


Abbildung 5.2.8: Grobstaubpartikel im Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und –ausgang am GF-Katalysator; Messkampagne März 2025

Ammoniak

Die Abbildungen 5.2.9 und 5.2.10 zeigen gemeinsam und ergänzend den Ammoniakabbau während der Messkampagne im März 2025. Dabei konnten in einzelnen Messphasen Abbauleistungen zwischen < 30 – 42% erreicht werden.

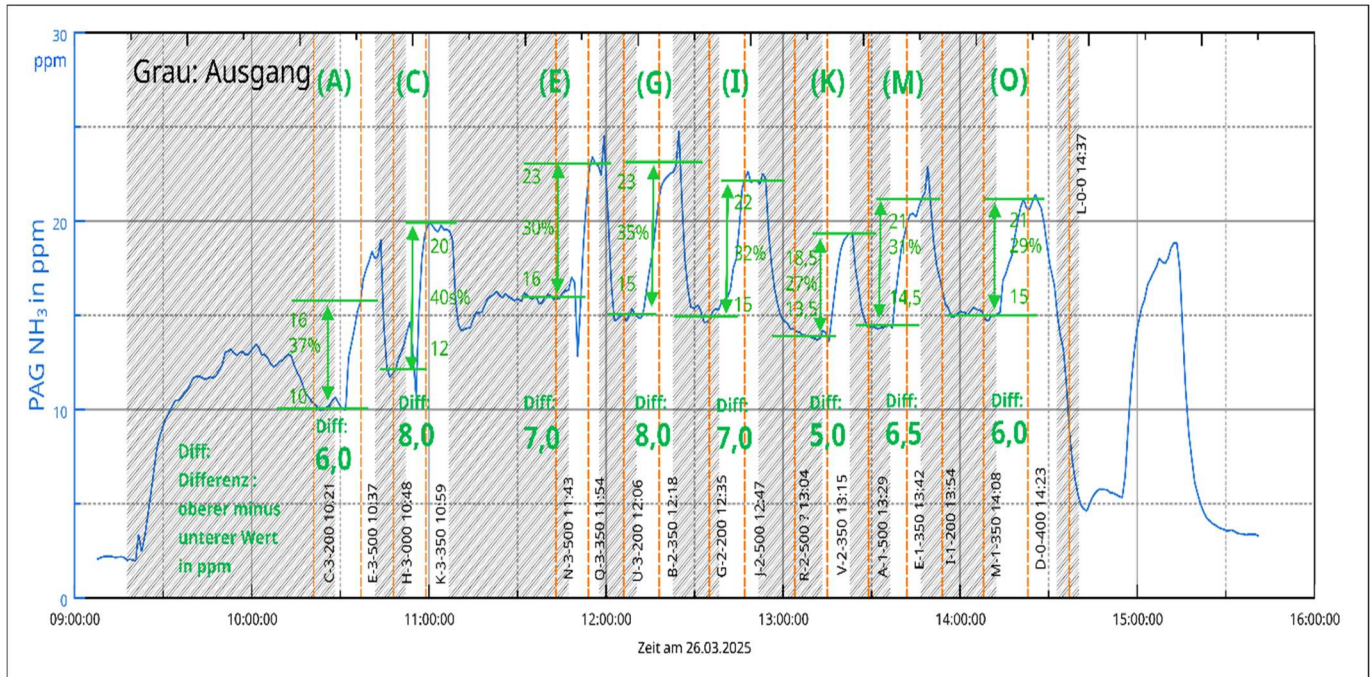


Abbildung 5.2.9: Ammoniakabbau I: Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und – ausgang am Katalysator bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (1: 90, 2: 110 und 3: 160 m³/h) in den Messstufen A - V

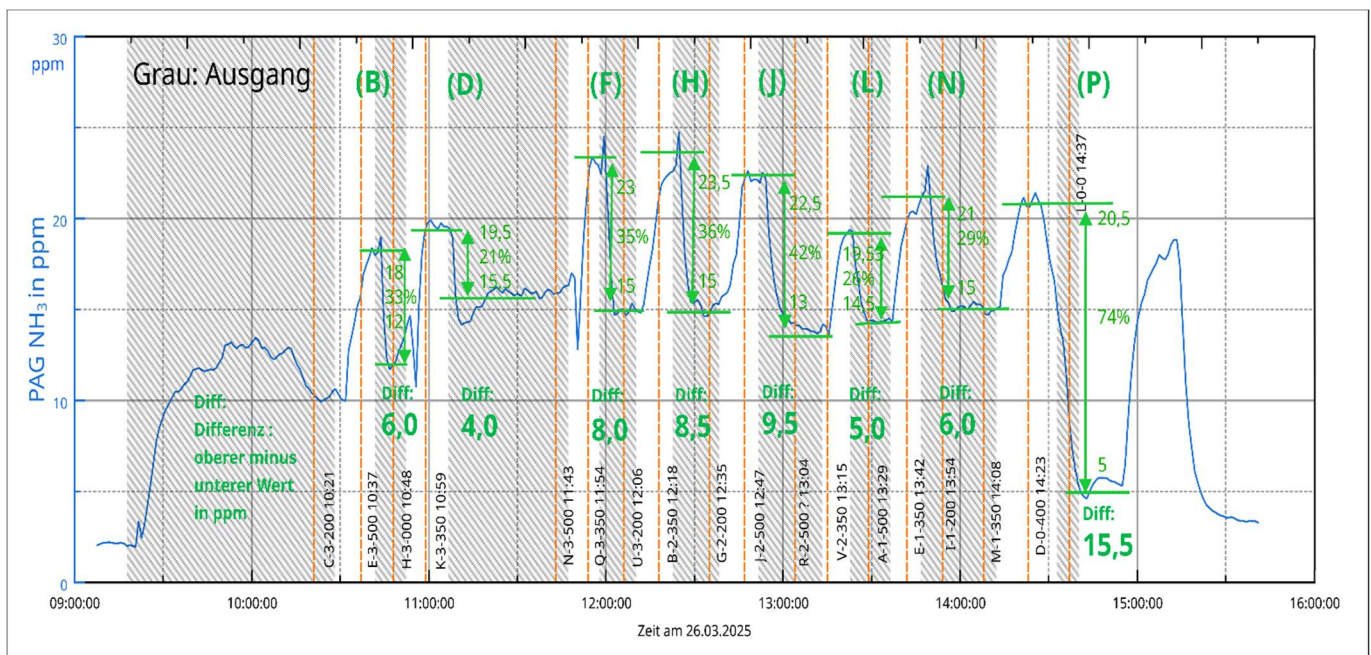


Abbildung 5.2.10: Ammoniakabbau II: Vergleich zwischen Ablufteingang (nach Vorfilterpassage) und – ausgang am Katalysator bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (1: 90, 2: 110 und 3: 160 m³/h) in den Messstufen A - V

Optimale Abbauraten, der sog. ideale Arbeitspunkt, von ca. 35% lagen bei 200 mA und 160 m³/h behandelter Abluft bei einer Katalysatorkaskade. Für die Reihenschaltung von zwei weiteren Katalysatorkaskaden oder eine Abgasrückführung dürften > 70% Ammoniakabbau zu erwarten sein, was den gesetzlichen Anforderungen genügen würde. Es ist davon auszugehen, dass das Gerät bei 500 mA bereits den maximalen Wirkungsgrad erreicht hat, wodurch keine Abbausteigerungen über höheren Energieeintrag möglich sind.

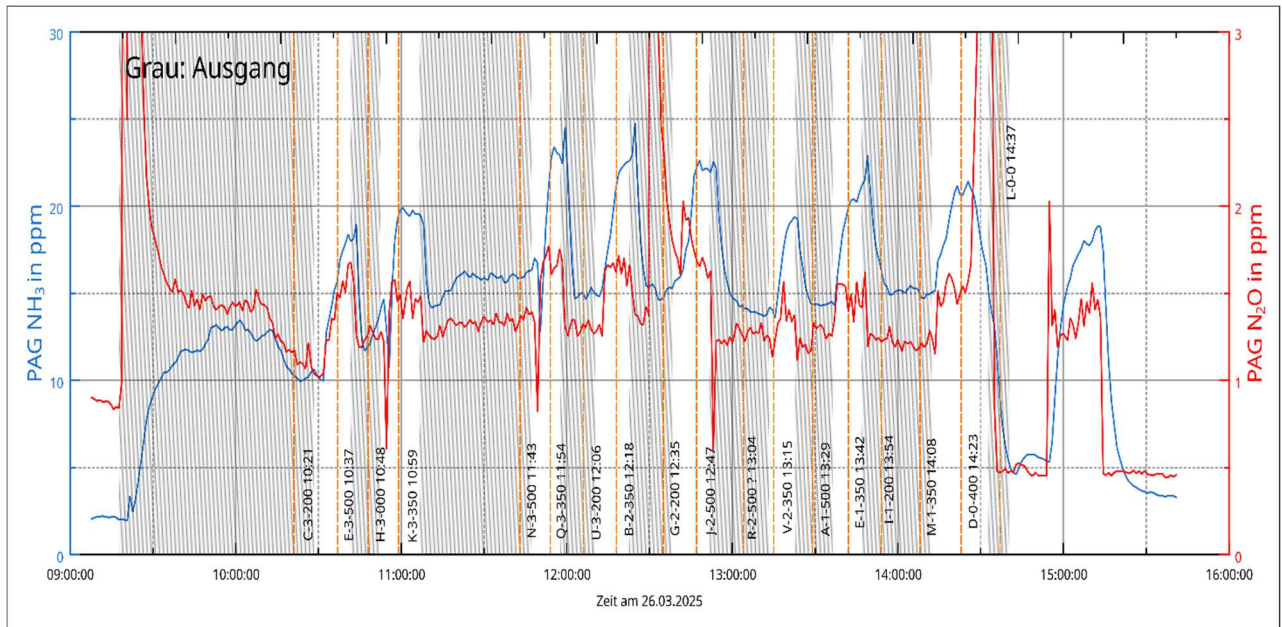


Abbildung 5.2.11: Vergleich zwischen Ammoniak- und N₂O- Abbau bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (1: 90, 2: 110 und 3: 160 m³/h) in den Messstufen A - V, Messkampagne März 2025

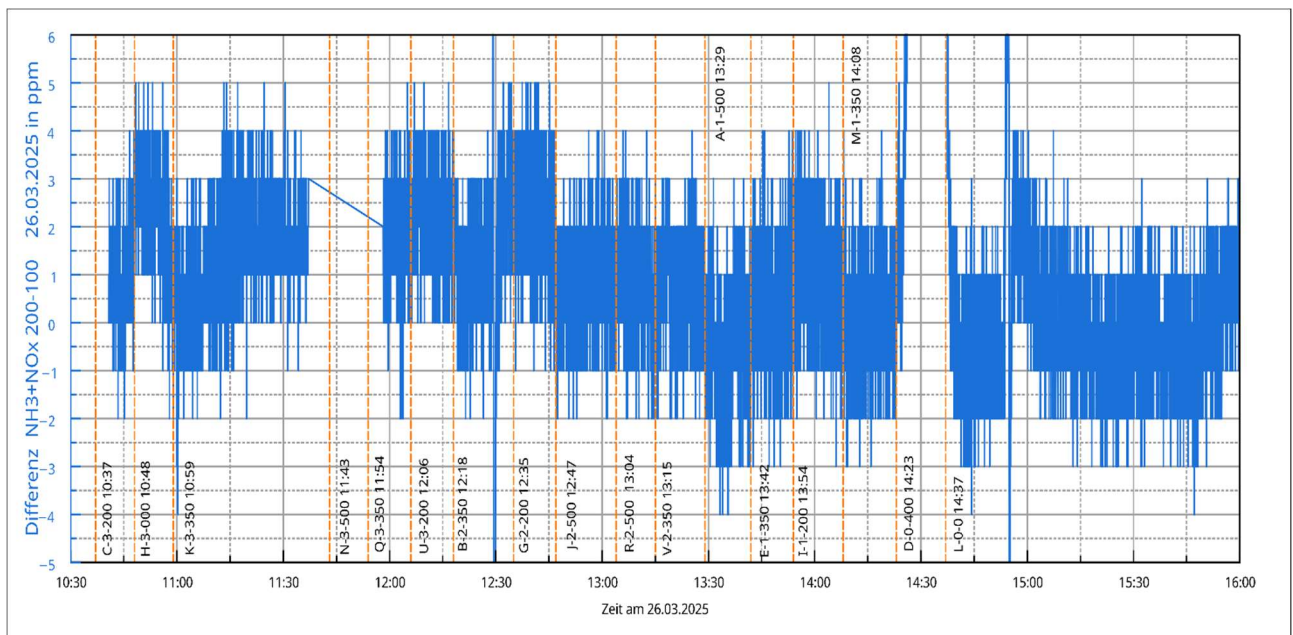


Abbildung 5.2.12: Differenz zwischen NO_x, NH₃ und N₂O in der Eingangs- und Ausgangsabluf bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (1: 90, 2: 110 und 3: 160 m³/h) in den Messstufen A – V; Messkampagne März 2025

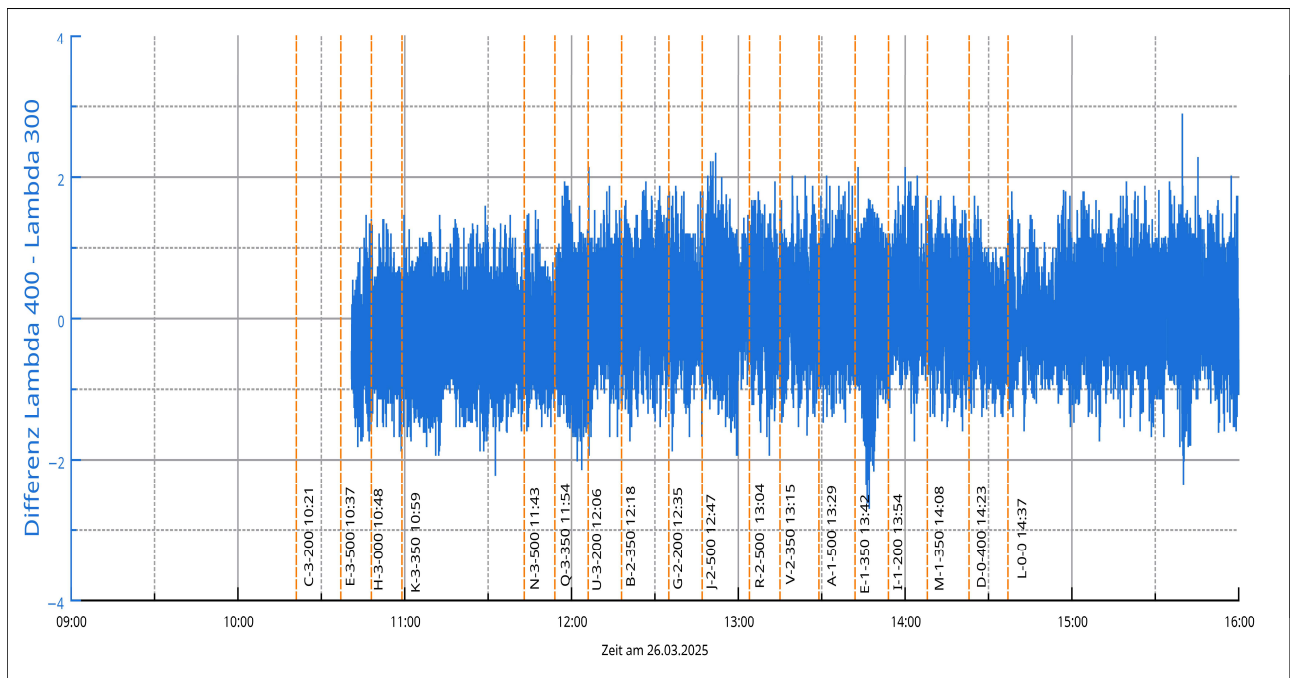


Abbildung 5.2.13: *O₂-Verbrauch während Messkampagne März 2025 bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (1: 90, 2: 110 und 3: 160 m³/h) in den Messstufen A - V*

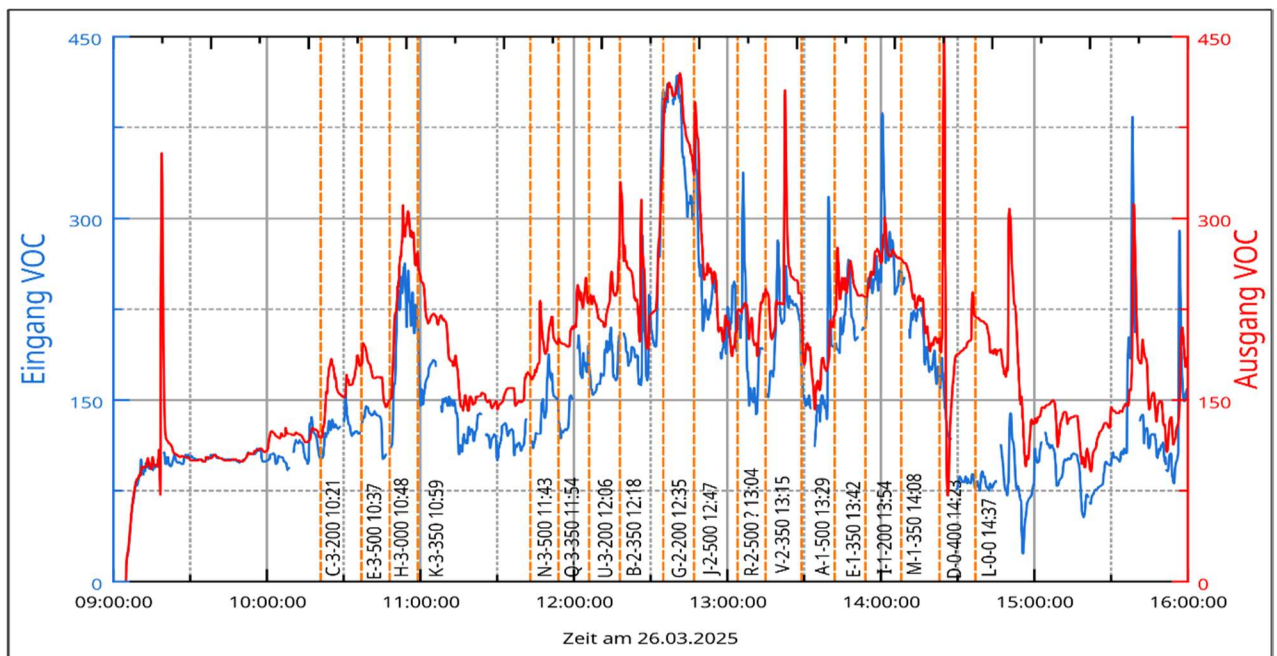


Abbildung 5.2.14: *VOC-Gehalte der Stallabluft vor und nach der photokatalytischen Behandlung bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (1: 90, 2: 110 und 3: 160 m³/h) in den Messstufen A - V, Messkampagne März 2025*

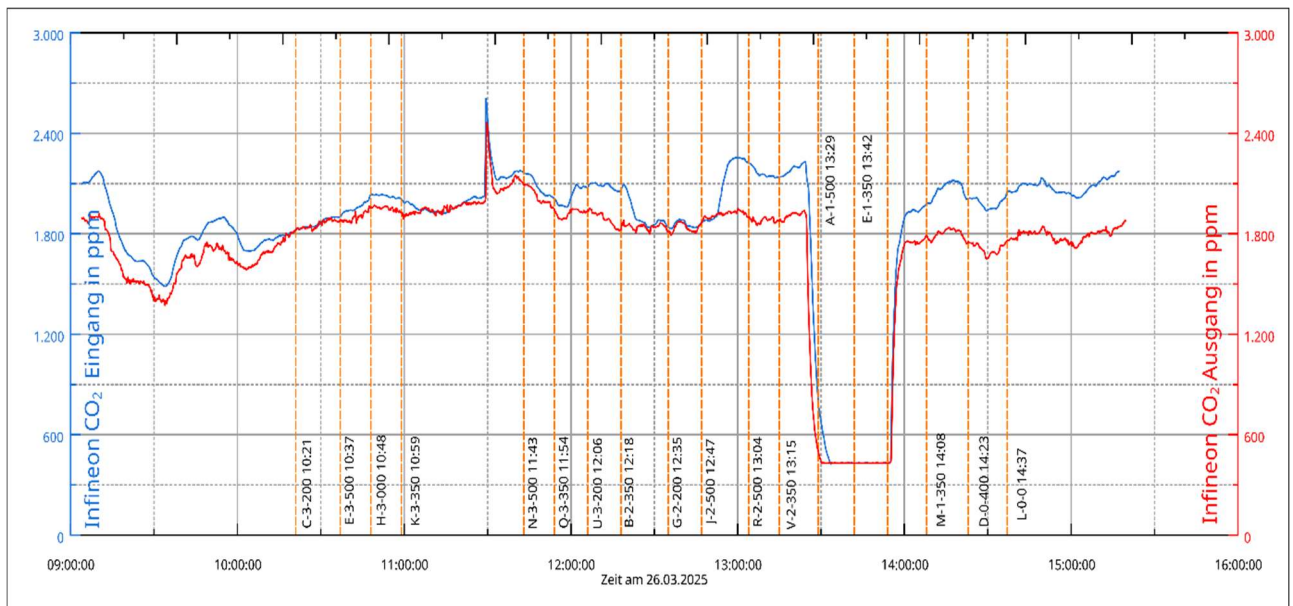


Abbildung 5.2.15: Kohlendioxidgehalte der Stallabluft vor und nach der photokatalytischen Behandlung bei unterschiedlichen Lichtleistungen (200, 350 und 500 mA) und Abluftvolumina (1: 90, 2: 110 und 3: 160 m³/h) in den Messstufen A - V, Messkampagne März 2025

Die zu beobachtende Reduktion des CO₂- Gehalts der Abluft resultiert aus der Kondensation von Luftfeuchtigkeit zu Wasser und damit der Bindung von CO₂ im Kondenswasser.

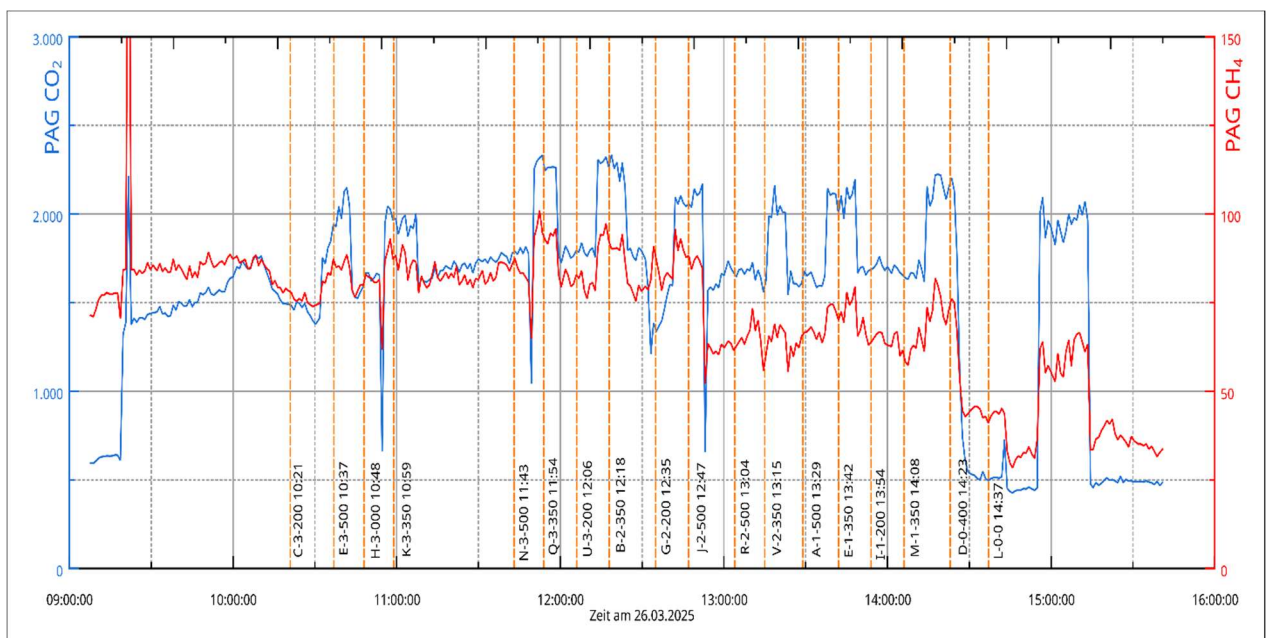


Abbildung 5.2.16: Gehalte an CO₂ in der Stallabluft und Methan- (faktoriert und höher skaliert) Abbau

Die im Projekt eingesetzte bzw. entwickelte, sehr heterogene Sensorik hat sich in den Messkampagnen insgesamt bewährt und kann über die grafischen Darstellungen die wesentlichen Prozessparameter und darüber hinaus abbilden. Die Basis für eine online- Übertragung sowie eine direkte Regelung ist damit gegeben. Die Mess- u. Regelgrößen zur Prozessüberwachung werden damit sicher erfasst.

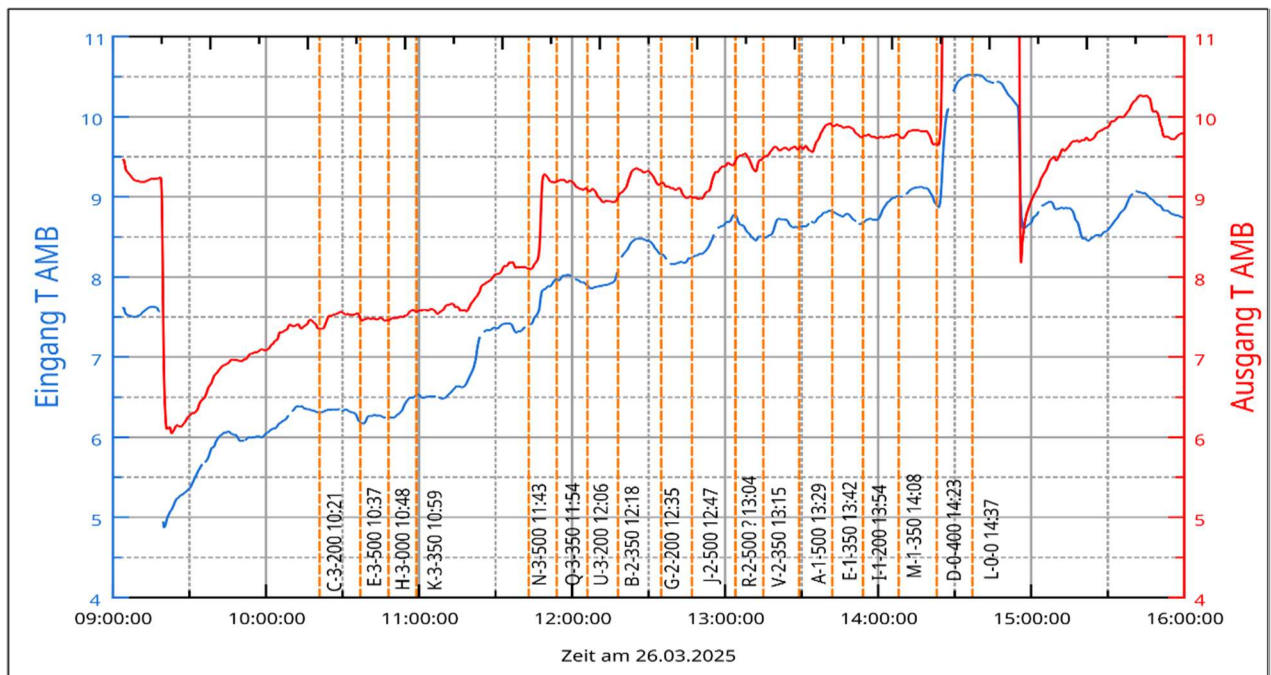


Abbildung 5.2.17: Temperaturerfassung der Eingangs- und Ausgangsabluf während der Messphasen

5.3 Strömungssimulation und entwickelte Elektronik

Strömungssimulation

Im Rahmen der Projektarbeiten wurde durch die Firma Lynatox ein sehr anspruchsvolles Simulationsprogramm erstellt. Um die Strömungseigenschaften eines großen Aufbaus zu ermitteln, aber dennoch die Rechenzeit im Rahmen zu halten, muss ein strömungstechnisches Äquivalenzmodell mit makroskopischen Eigenschaften erstellt werden, ohne die Strömung der Mikrostruktur jedes Mal erneut zu berechnen. Dazu muss diese Mikrostruktur jedoch mindestens einmal intensiv betrachtet werden. Dafür wurde eine Elementarzelle des Gewebes wie im Folgenden definiert:

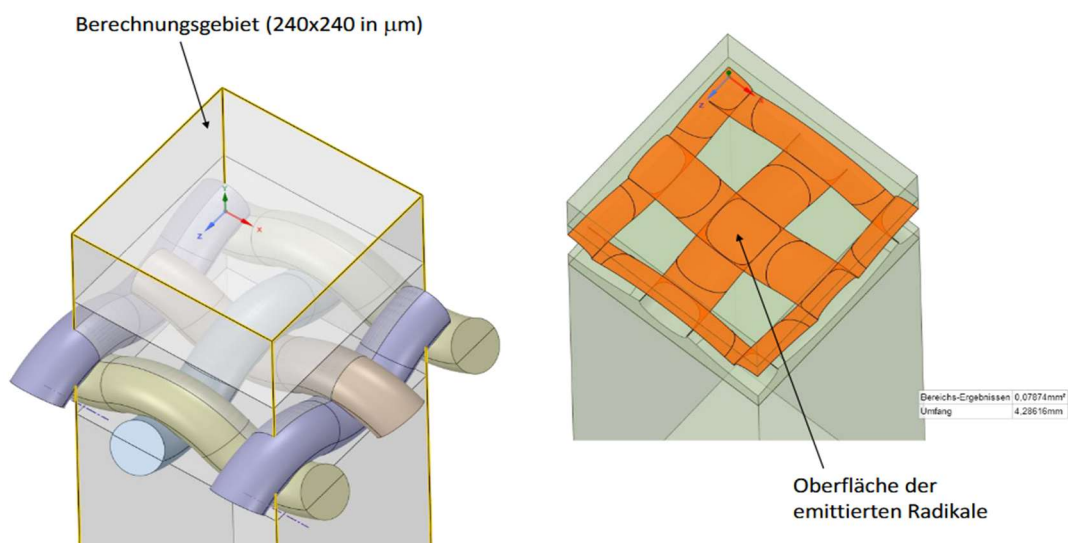


Abbildung 5.3.1: Schema Elementarzelle des Gewebes

In diese Zellen werden die photochemischen Erkenntnisse (z.B. lichtinduzierte Radikalbildungsprozesse) einbezogen. Als erstes Ergebnis erhält man eine Art Dichteverteilung der erzeugten Hydroxylradikale und kann somit auf die Behandlungswirkung zurückschließen. Weiterhin ist das entsprechende Geschwindigkeitsprofil zu erkennen. Auch bei so kleinen Abständen ist eine Verringerung der Geschwindigkeit zur Faser hin deutlich zu erkennen, was eine Herausforderung entsprechender Kontaktzeiten der zu behandelnden Moleküle aufzeigt.

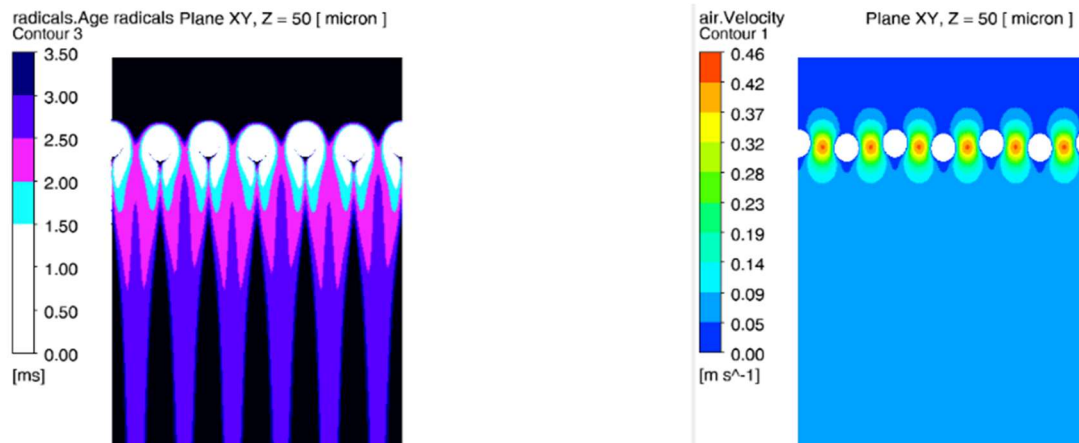


Abbildung 5.3.2: Schemata Radikalbildung und -dichte (links) und Geschwindigkeitsprofil (rechts)

Im nächsten Schritt wurde das Gewebe in einer Makrostruktur gefaltet, um die Oberfläche zu vergrößern und damit die Strömungsgeschwindigkeit zu reduzieren. Dies soll die Kontaktzeit erhöhen und gleichzeitig den Luftwiderstand reduzieren.

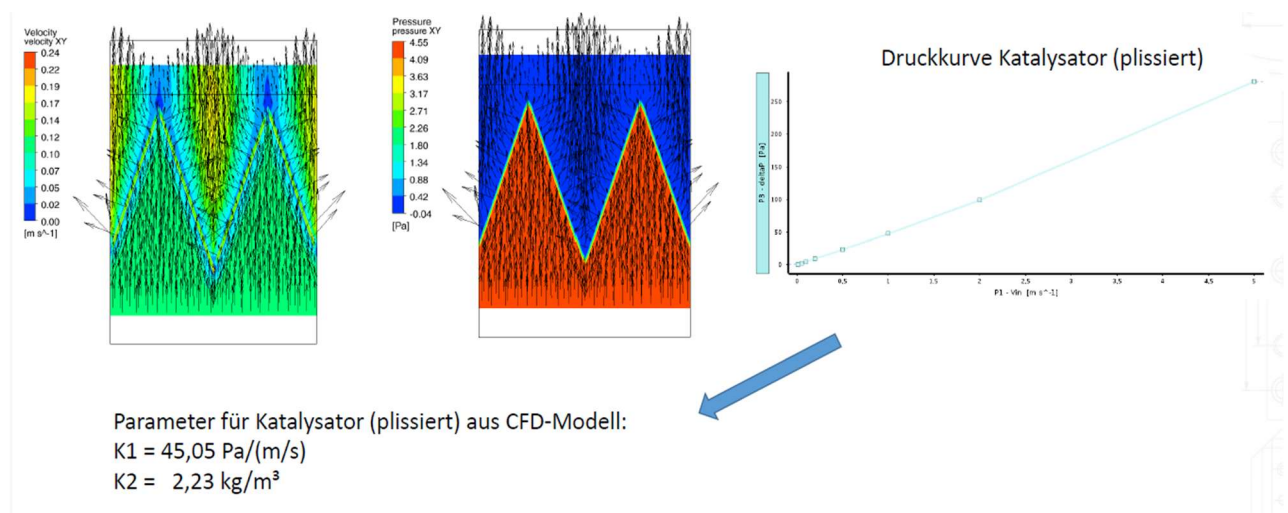


Abbildung 5.3.3: Schemata Oberflächenvergrößerung des Gewebes durch Faltung (Makrostruktur)

Um die modularen Baugruppen entwickeln zu können, muss der Innenwiderstand einer Konstruktion mit den Kennlinien der Lüfter verglichen werden. Die Schnittpunkte der Kennlinien ergeben die entsprechenden Arbeitspunkte des Systems.

Betriebspunkte für Noctua Lüfter 120 mm industrial NF-F12 2000/3000 rpm

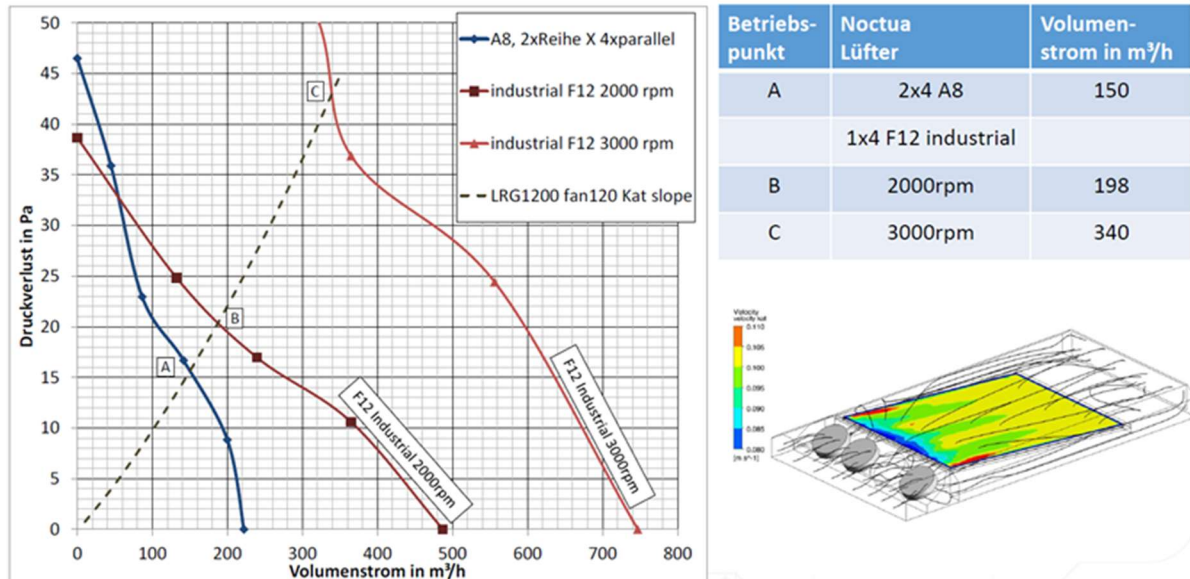


Abbildung 5.3.4: Betriebspunkte für Noctua Lüfter

Nach einer Vielzahl an Simulationen und angepassten Konstruktionen sind im Folgenden die Ergebnisse der besten konstruktiven Lösung zu sehen. Diese Finale Konstruktion wurde baulich als Stack im Technologiedemonstrator eingesetzt.

Ergebnisse – Strömungsfeld

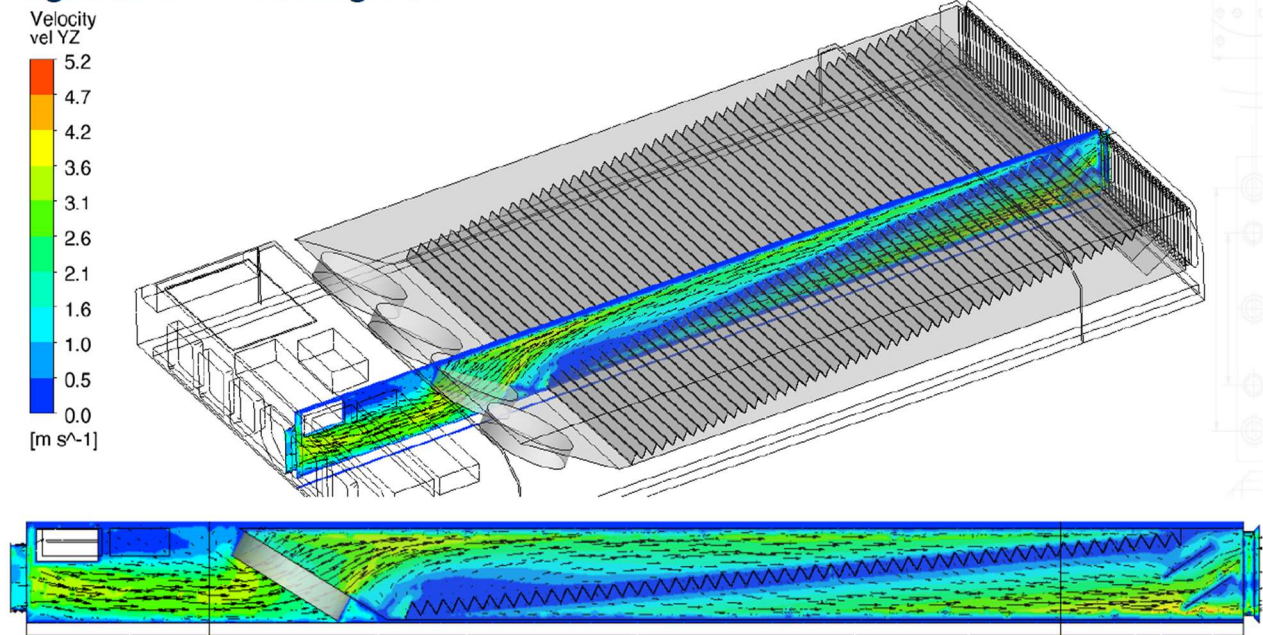


Abbildung 5.3.5: Schema Strömungsfeld

Ergebnisse – Geschwindigkeitsvektoren am Katalysator

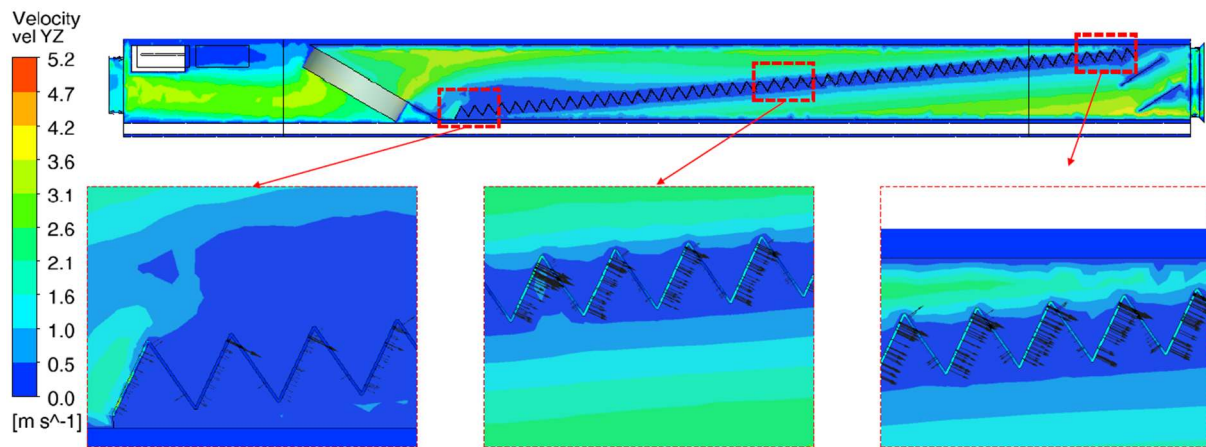


Abbildung 5.3.6: Schema Geschwindigkeitsvektoren am Katalysator

Ergebnisse – Druckverlauf

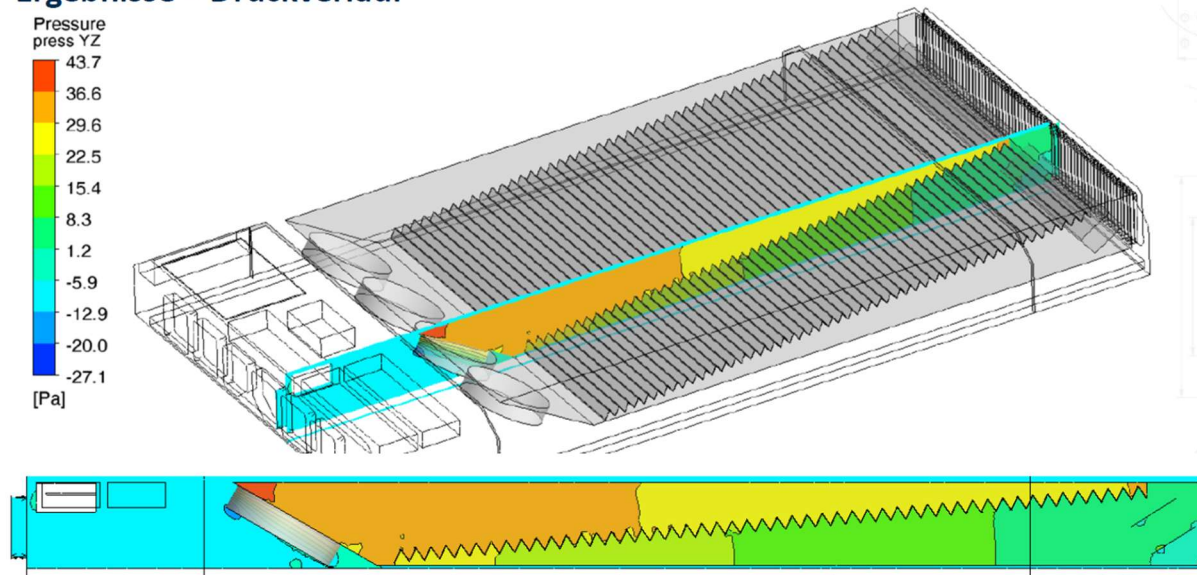


Abbildung 5.3.7: Schema Druckverlauf

Entwickelte Elektronik

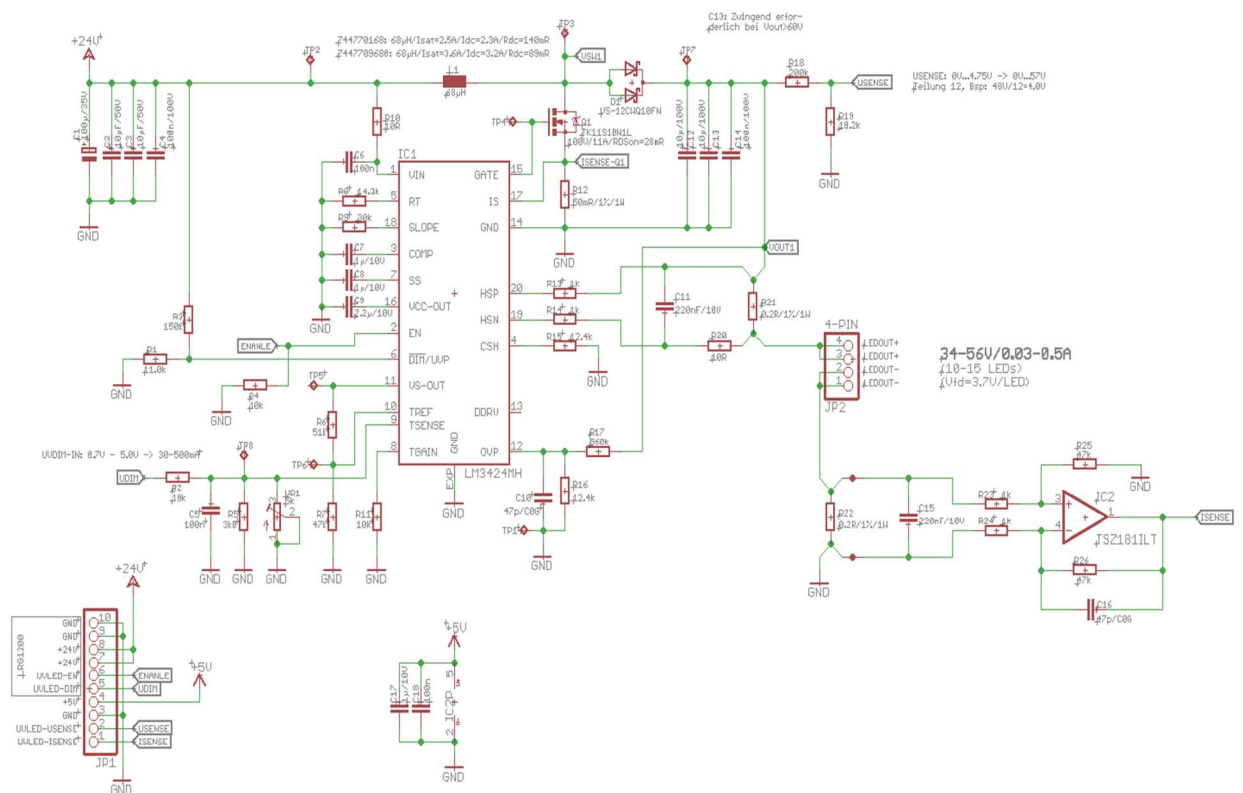


Abbildung 5.3.8: Schaltung LED-Treibermodul

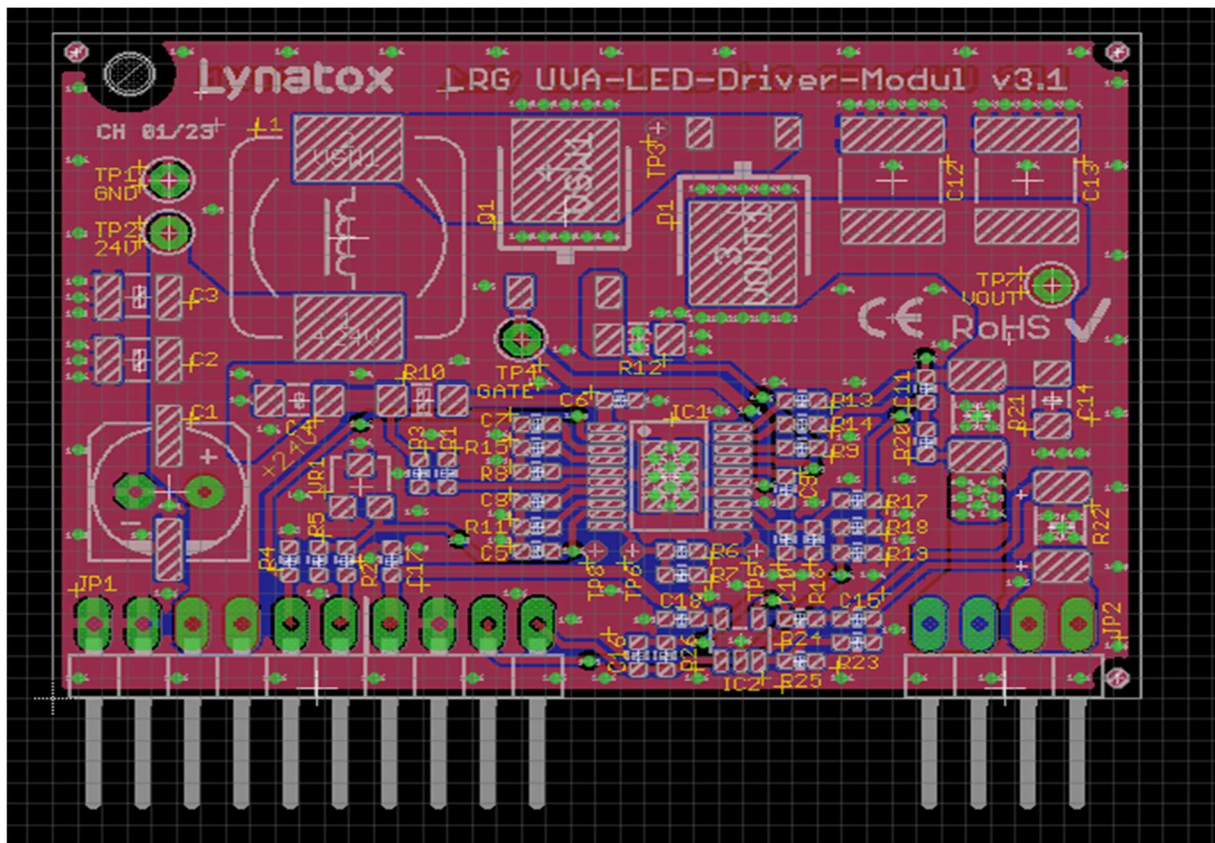


Abbildung 5.3.9: Layout LED-Treibermodul

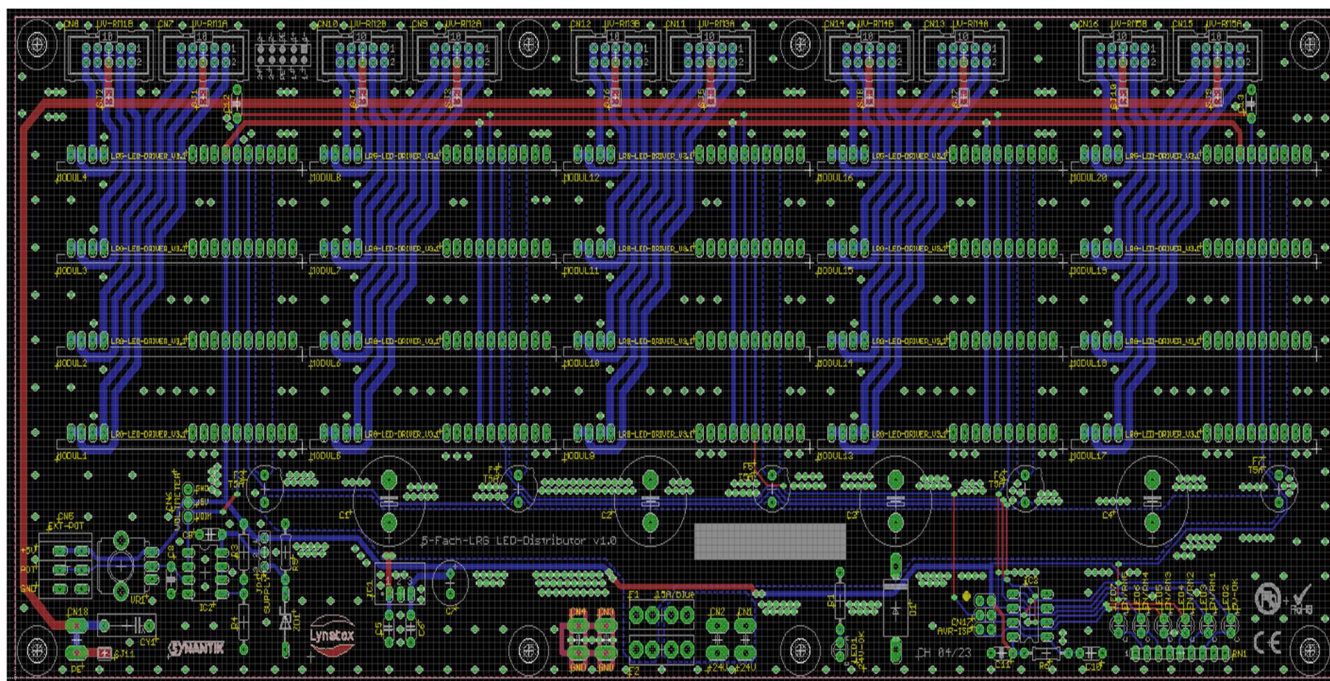


Abbildung 5.3.10: Sammelplatine

5.4 Mikrobiologisch-hygienische Untersuchungen

5.4.1 Mikrobiologisch-hygienische Leistungen des Demonstrators

Am Demonstrator aus CLEAN AIR I wurden abschließende Untersuchungen vorgenommen. Die sowohl mit Impaktion als auch Impingement erfassten Bioaerosolbelastungen der Original- Stallabluft in Reinholterode wiesen im Vergleich sehr ähnliche Ergebnisse auf. Bei hohen bakteriologischen Belastungen wie z.B. der Gesamtbakterienzahlen (GKZ) war die Impaktion nicht geeignet, da sie zu einer nicht auszählbaren Überbesiedlung der Nähragarplatten führte. Die Ergebnisse sind zusammenfassend in *Tabelle 5.4.1a* gegenüber verfügbaren Literaturdaten dargestellt. Hier bestätigten sich die Ergebnisse aus CLEAN AIR I. Während die Bakterien- GKZ und die Staphylokokkenzahl in Reinholterode etwas niedriger waren als die in der Literatur geführten Daten, waren die Belastungen bei den Enterokokken, Enterobakterien, inkl. *E. coli*, und Schimmelpilzen erhöht.

Tabelle 5.4.1a: Roh- Stallabluft, gemessen mit Impaktor und Impinger, im Vergleich zu Literaturdaten

Übersicht	Messungen Impinger / Impaktor	
	LITERATUR	CLEAN AIR
<i>[KbE / m³]</i>		
Gesamtkeimzahl	$7,6 \times 10^4 - 2,2 \times 10^7$	$6,1 \times 10^4 - 6,8 \times 10^6$
Intest. Enterokokken	$2,8 \times 10^2 - 2,1 \times 10^4$	$1,1 \times 10^3 - 1,0 \times 10^5$
Staphylokokken	$8 \times 10^2 - 5,5 \times 10^5$	$2 \times 10^2 - 7,1 \times 10^3$
Enterobacteriaceae	0	10 - $2,2 \times 10^4$
E. coli	0	0 - $3,5 \times 10^3$
Schimmelpilze	40 - $4,8 \times 10^2$	45 - 1×10^4

Tabelle 5.4.1b: Daten zu Impinger- (teilweise Impaktor-) Messungen der Rohstallabluft sowie nach Passage des mechanischen Vorfilters und der Behandlung mittels solarer (aus CLEAN AIR I) bzw. artifizierter Photokatalyse (aus CLEAN AIR I und II) am Demonstrator (MW – Mittelwert; KbE Kolonie bildende Einheiten)

Übersicht	Messungen mit Impinger und Impaktor						
Parameter	Stallabluft roh	Mittlerer Wert	mech. Vorfilter	Photokatalyse	Photokatalyse	Photokatalyse	Photokatalyse
				solar (23 mW/m ²)	solar (> 65 mW/m ²)	solar (> 80 mW/m ²)	LED
<i>[KbE / m³]</i>	$\times 10^2$	$\times 10^2$	$\times 10^2$	$\times 10^2$	$\times 10^2$	$\times 10^2$	$\times 10^2$
Gesamtkeimzahl	610 - 68000	26570	125	110	8	11	1
Intest. Enterokokken	11 - 1000	262	8	27	0	0	0
Staphylokokken	2 - 71	23	4	0	0,5	0	0
Enterobacteriaceae	0,1 - 220	31	5	0	1	0	0
E. coli	0 - 35	10	0	0	0	0	0
Schimmelpilze	0,45 - 100	22	12	50	7	2	1

Die *Tabelle 5.4.1b* stellt die wesentlichen Rohabluftdaten der Bioaerosolparameter der Stallabluft den durch Photokatalyse- Abbauprozesse erreichten mikrobiologischen Konzentrationen zusammenfassend gegenüber. Dabei wurden nochmals die solare (aus CLEAN AIR I) wie auch die artifizielle Strahlung dargestellt. Die solare Strahlung > 80 mW/m² wie auch die artifizielle LED- Strahlung zeigten weitgehende, sehr ähnliche Keimreduzierungs- bzw. Hygienisierungseffekte sowohl bei 50, 75 wie auch 100 m³/h Volumenstrom. Dies ist durchaus überraschend. Die Keimreduktion lag dabei weit oberhalb der gesetzlich geforderten 70% Reduktion.

Die *Abbildung 5.4.1* veranschaulicht graphisch die effektive und sukzessive Reduktion der Bioaerosol-relevanten Parameter durch Photokatalyse bei steigender Strahlungsbelastung aus CLEAN AIR I und II. Einzelne „Ausreißer“ wie bei den Enterokokken und Schimmelpilzen bei einer Strahlungsleistung von 23 mW/m² sind einzelnen sehr hohen Werten (bei einer insgesamt zugleich geringeren Gesamtzahl an Daten als bei der Erfassung der Rohabluftbelastung) zuzuschreiben.

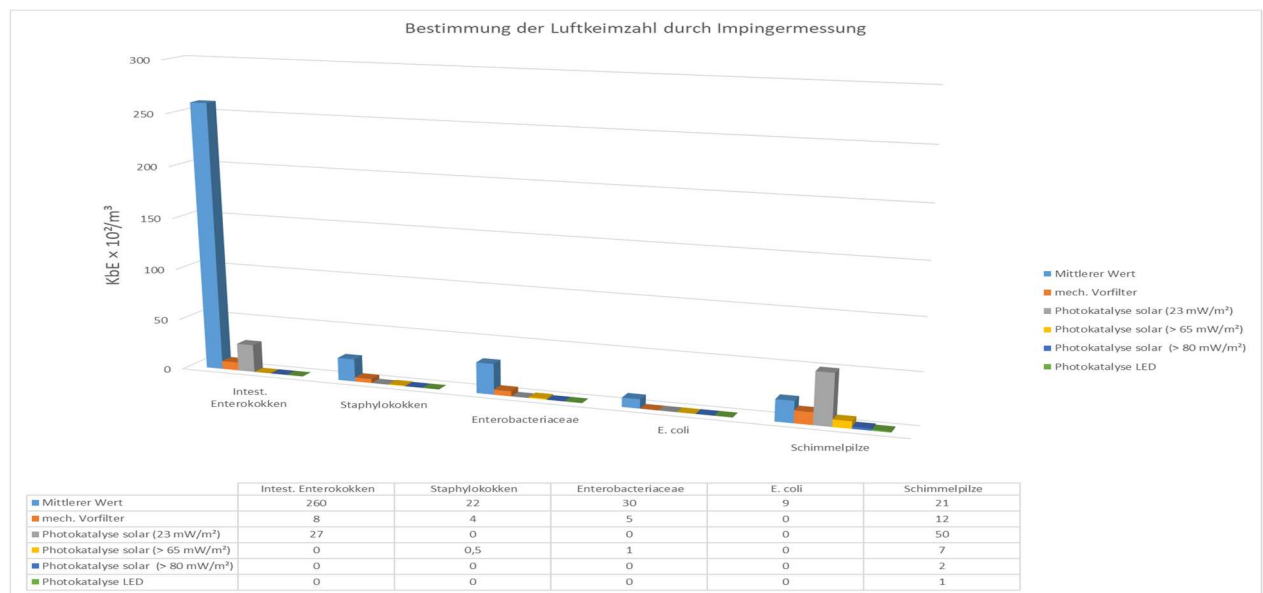


Abbildung 5.4.1: Reduktion der Bioaerosol- Luftbelastung mittels Vorfilter bzw. solarer und artifizieller Photokatalyse (im Vergleich Clean Air I)

Offensichtlich ist es technisch einfacher, eine mikrobielle Struktur wie z.B. ein Bakterium oder Pilzspore mit Photokatalyse zu immobilisieren oder zumindest so schädigen, dass sie nicht mehr vermehrungsfähig ist, als vergleichsweise ein kleines chemisches Molekül in relevanter Ausbeute zu oxidieren. Vor allem eine Mehrfachbelegung der Katalysatoroberfläche scheint hier relevant zu sein.

Bei der Vielzahl der bisher gefundenen Bioaerosolbestandteile stellt sich die Frage, welche davon besonders charakteristisch für Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung sind. Nach einhelliger Meinung vieler Autoren sind dies die *Staphylokokken*, da sie direkt von den Tieren stammen und in der Stallluft fast immer in großer Zahl nachgewiesen wurden.

Die Auswahl der Messparameter bei den Bioaerosolen hängt primär von der konkreten Fragestellung ab. Der Summenparameter „Gesamtbakterien“ wird sinnvollerweise zur Einordnung der eigenen Messungen und Prüfung der Plausibilität nahezu immer mit untersucht. Untersuchungen zu (fakultativ) „anaeroben Gesamtbakterien“ waren bisher im Zusammenhang mit Bioaerosolen von wenig Interesse.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass sie einen Großteil der aerogenen Mikroflora in Tierställen ausmachen. Sie werden in großer Zahl über die Fäkalien ausgeschieden.

Weltweit wurden in fast jeder zweiten Studie Impaktoren als Bioaerosolsammler eingesetzt. Mit 22 % folgen danach verschiedene Filtersysteme, die vor allem zur Sammlung von Endotoxinen und Schimmelpilzen benutzt wurden. 16 % der Autoren setzten Impinger ein, in den meisten Fällen den AGI-30 (englisch: *All Glass Impinger*). Dieser wird in Deutschland für die Sammlung von Bioaerosolen in der Immission empfohlen.

Immer häufiger werden sog. Zyklone benutzt, die einen Anteil von momentan ca. 5 % ausmachen. Aufgrund ihres hohen Luftdurchsatzes zur Sammlung von Viren, sowie Mikroorganismen, die nur in sehr geringen Konzentrationen in der Luft vorkommen, sind sie besonders geeignet (Clauß, 2016). In immerhin 6 % der wissenschaftlichen Studien wurde mit Beginn der 1960er Jahre noch die Sedimentation auf Nährbodenplatten als einfachste Sammelmethode eingesetzt.

In den Richtlinien VDI 4250 Blatt 3 (2016) und VDI 4253 Blatt 3 (2019) sind die allgemeinen Summenparameter („Gesamtbakterien“ und „Gesamtpilze“), in Tierställen spezifisch vorkommende Leitparameter sowie für besondere Fragestellungen relevante „spezielle Messparameter“ angegeben, inkl. der Kultivierungsverfahren und Bestätigungsreaktionen. Die Auswahl der hier geführten Leitorganismen scheint dabei rein medizinisch geprägt zu sein und spiegelt nicht unbedingt das tatsächliche Vorkommen der ausgewählten Mikroorganismen in nativen Bioaerosolproben wieder.

Bestimmte Gruppen von Mikroorganismen werden weltweit immer wieder in großer Zahl in Tierställen gefunden. Diese Gruppen scheinen spezifisch für Tierhaltungen zu sein und sind als sogenannte „Leitparameter“ für die Tierhaltung geeignet. Unter Leitparameter versteht die VDI 4250 Blatt 3 „Bestandteile von Bioaerosolen, die für die Emission aus einer Anlage charakteristisch sind und mit derzeit zur Verfügung stehenden Probenahme- und Analysemethoden nachweisbar sind“. Letzteres ist besonders wichtig, da z. B. bei den Bakterien generell schätzungsweise nur etwa 0,01 % – 1 % mit den gängigen Standardmethoden über Kultivierung auf Nährmedien überhaupt nachweisbar sind (Oliver, 2005; Chi und Li, 2006).

Enterobacteriaceae sind vor allem Indikatoren für fäkale Verunreinigungen. Sie werden in großer Zahl über die Fäkalien ausgeschieden. Zur Familie der Enterobacteriaceae und zur Gattung *Escherichia* gehört das gramnegative Bakterium *Escherichia coli*. Es handelt sich hierbei um ein stäbchenförmiges Darmbakterium, welches keine Sporen bildet und auf Grund seiner Begeißelung beweglich ist. Da es im Darm von Menschen und Tieren vorkommt, gilt es in den verschiedenen Umweltmedien als wichtiger Fäkalindikator.

Staphylococcus spez. sind typische Hautbesiedler bei Tier und Mensch. *S. aureus* als wichtigster Vertreter ist ein grampositives Kugelbakterium, auch als Kokken bezeichnet. Die Kokken lagern sich meist haufen- oder traubenförmig zusammen. Innerhalb der Gruppe der Grampositiven sind nach Auffassung der meisten Autoren die Staphylococcaceae besonders spezifisch für die landwirtschaftliche Nutztierhaltung und gelten damit als einer der wichtigsten Leitparameter für mikrobielle Luftverunreinigungen aus Tierställen. Zudem sind Staphylococcaceae mit den gängigen Methoden der Kultivierung und den minimalen Laborstandards gut nachzuweisen. Innerhalb dieser Gruppe finden sich einige potentielle Krankheitserreger, die der Risikogruppe 2 zugeordnet werden. Am bekanntesten ist *Staphylococcus aureus*, dessen Anteil an der gesamten Staphylokokkenflora jedoch meist sehr gering ist.

In der Luft von Tierställen wurden Schimmelpilze besonders in den tropischen Ländern intensiv untersucht. Aufgrund der dort vorherrschenden klimatischen Verhältnisse mit i. d. R. ganzjährig hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit haben sie optimale Wachstumsbedingungen und stellen damit ein größeres Problem dar als in unseren gemäßigten Breiten.

Selbst Deutschland sind bisher mehr als hundert verschiedene Schimmelpilz- Arten in Tierställen nachgewiesen worden, jedoch sind die Konzentrationen vergleichsweise gering. Die Höhe der Konzentrationen und die Zusammensetzung der Schimmelpilzspezies in den Ställen sind meist abhängig vom Vorhandensein und der Qualität von Einstreu (Hartung, 2014). Die häufigsten nachgewiesenen Gruppen sind bei Rindern, Schweinen, Geflügel und Kaninchen die Schimmelpilze *Aspergillus sp.*, *Alternaria sp.*, *Cladosporium sp.*, *Penicillium sp.*, *Fusarium sp.*, *Scopulariopsis sp.*, sowie Hefen der Gattung *Candida* (Zhao, 2011; Miao et al., 2010). Gesundheitlich relevant sind dabei vor allem einige pathogene *Aspergillus*- Arten wie *A. flavus*, *A. fumigatus* und *A. niger* (Wang et al., 2007).

5.4.2 Mikrobiologisch-hygienische Leistungen des Upscaling- Demonstrators

Die drei verschiedenen Mess-Kampagnen 1=07/2024; 2=11/2024; 3=03/2025 ergaben deutlich voneinander abweichende Messwerte. In den beiden ersten Kampagnen mit Carbon-Material wurden insgesamt geringere Keimzahlen gemessen als in der dritten Serie mit Glasfaser-Material.

In der ersten Kampagne traten starke Schwankungen um mehr als drei Größenordnungen in den gemessenen Keimzahlen auf. Diese waren nicht mit den variierten Versuchsbedingungen (Luftströmung und photokatalytischen Leistung) zu korrelieren. Das sukzessive „Einfahren“ des Vorfilters kann zu disparaten Ergebnissen führen.

In den Kampagnen 2 und 3 waren die Werte jeweils konsistent. Im Folgenden wurden daher die Werte der Kampagnen 2 und 3 verwendet. Für die vergleichende Analyse der Einflussfaktoren wurden die Serien Carbonmaterial und Glasfasermaterial getrennt dargestellt.

Über alle Behandlungsvarianten gemittelt trat eine Reduktion der Gesamtkeimzahl auf. Diese betrug bei Bakterien 84 ± 11 % (Impingement) bzw. 75 ± 20 % (Impaktion), bei Pilzen 75 ± 20 % (vgl. Abb. 5.4.2).

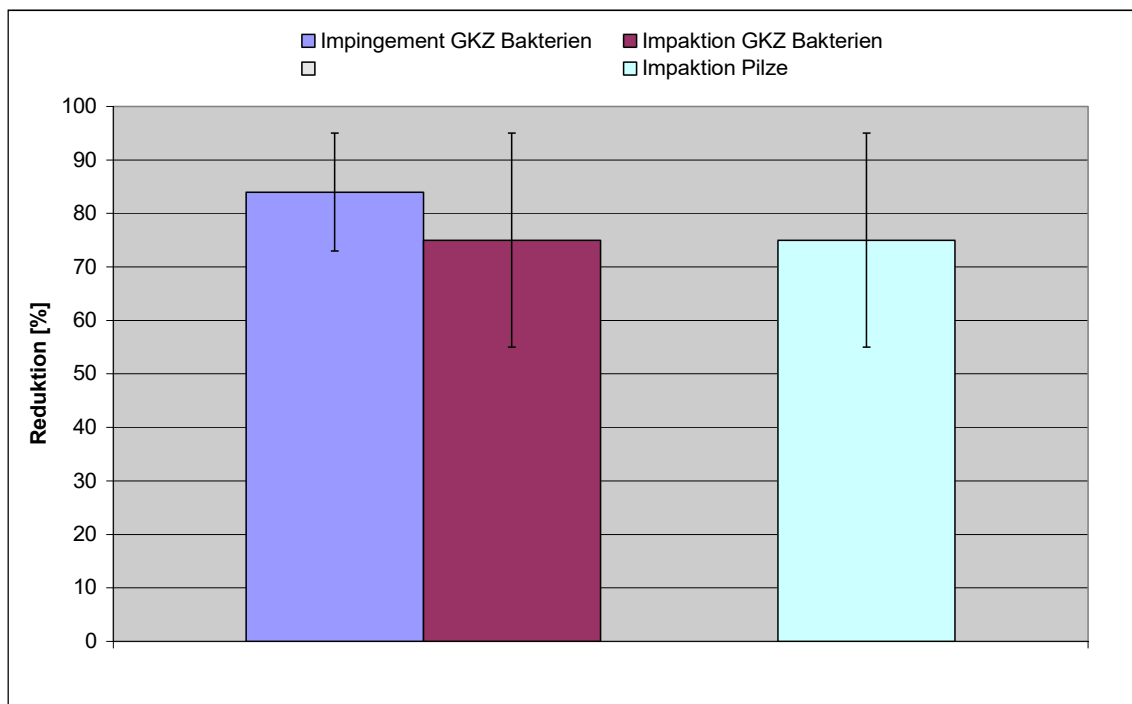


Abbildung 5.4.2: Keimzahlreduktion durch photokatalytische Behandlung, Messkampagnen gemittelt

Als potenziell pathogene Indikatoren für Hygienrisiken wurden *Enterobacteriaceae* als hauptsächliche Gruppe bestimmt. Diese traten in deutlich geringerer Menge (18 von 41 Proben mit einem Anteil von Anteil von 2,5 %) auf. Weiterhin wurde der Gehalt an *Enterococcus spp.* geprüft. Diese traten in 2 von 41 Proben mit einem Anteil von < 0,1 % auf.

Bis auf eine Ausnahme wurden diese Keimgruppen in allen Proben vollständig eliminiert.

Einflüsse der Bedingungen auf die Keimreduktion

Um verfahrensbedingte Effekte zu prüfen, wurden parallel Impingement und Impaktion durchgeführt. Dabei wurden beim Impingement geringere Koloniezahlen als mittels Impaktion gemessen: 940 ± 425 KbE/m³ vs. 2490 ± 1844 KbE/m³ (vgl. Abb. 5.4.3).

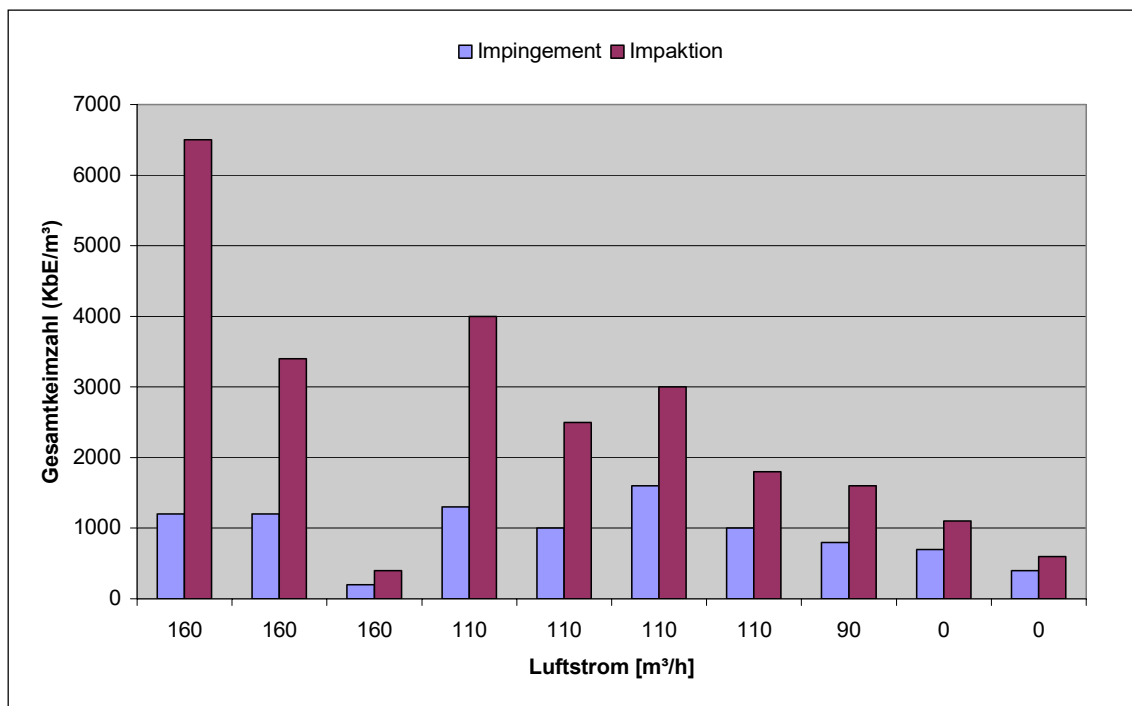


Abbildung 5.4.3: GKZ Bakterien mit unterschiedlichen Messverfahren und variablen Luftströmen; Messkampagne März 2025

Diese geringere Sammlungseffizienz variierte bei den unterschiedlichen aerodynamischen Bedingungen. Der Unterschied war gering bei schwacher Luftströmung, am stärksten ausgeprägt bei starkem Luftstrom. Dabei war jedoch jeweils eine Korrelation zwischen beiden Verfahren festzustellen. Bei den durchwegs kleineren Messwerten für Pilze sowie den Indikatorarten war eine größere Messunsicherheit zu verzeichnen. Dadurch ergab sich kein auswertbares Verhältnis.

Im Folgenden wurden nur die wesentlichen Ergebnisse der Impaktionsmessungen berücksichtigt.

Die Durchführung der Feldversuche zur Abluftbehandlung in mehreren Serien ermöglichte die halbquantitative Analyse von Indikatorparametern der Mikroflora in der Luft.

Dabei wurde die Wirksamkeit der verschiedenen Energie-/Luftstrom- Kombinationen geprüft. Dem lag die Annahme zugrunde, dass längere Verweildauer im Wirkungsbereich sowie höhere photo-katalytischen Leistung unterschiedlich starke Effekte auf die verbleibende Menge der kultivierbaren Mikroorganismen zeigen sollten.

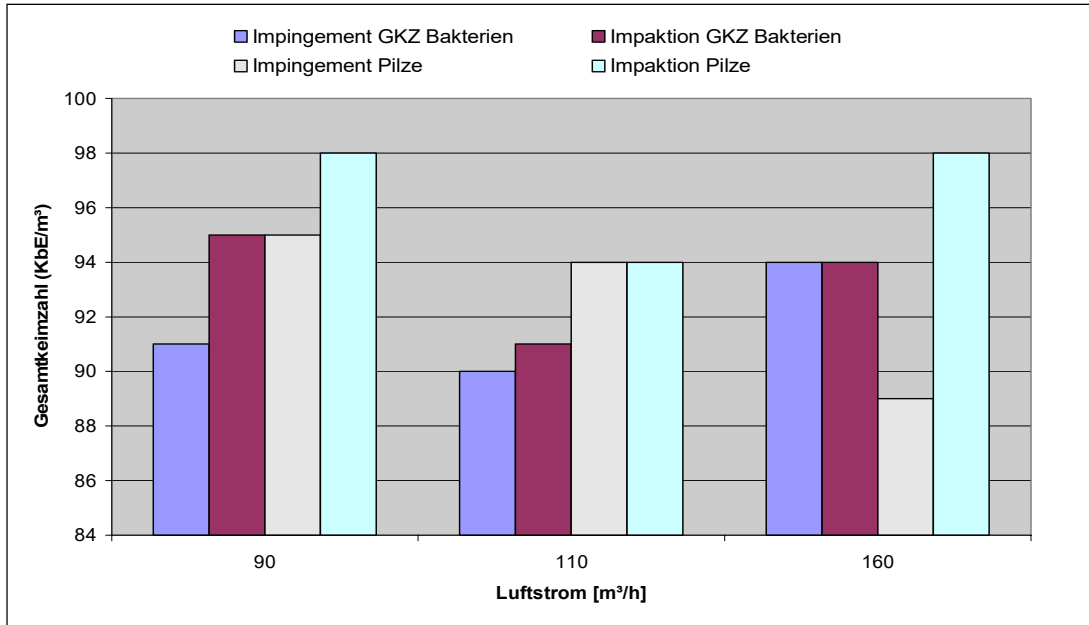


Abbildung 5.4.4: Relative Keimreduktion GKZ Bakterien und Pilze bei variablen Luftströmen; Carbonmaterial, Messkampagne November 2024

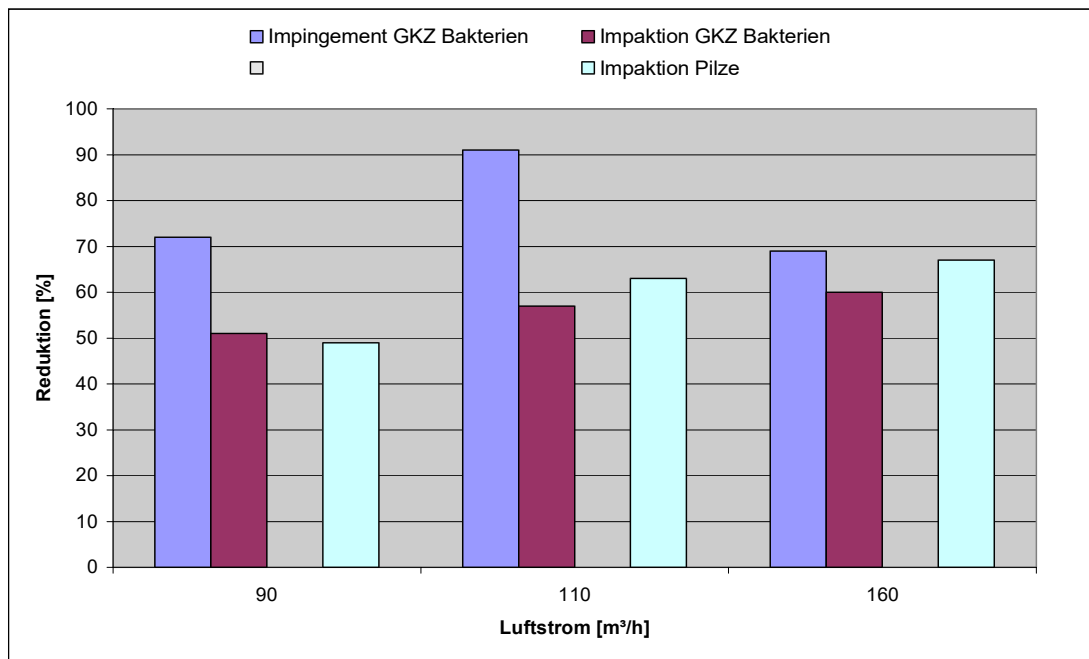


Abbildung 5.4.5: Relative Keimreduktion GKZ Bakterien und Pilze bei variablen Luftströmen; Glasfasermaterial, Messkampagne März 2025

Die Variation der Luftströmung ergab eine leichte Veränderung der Reduktionsrate sowohl bei Bakterien als auch bei Pilzen. Diese Ergebnisse unterlagen wiederum starken Schwankungen, so dass kein Zusammenhang messbar war.

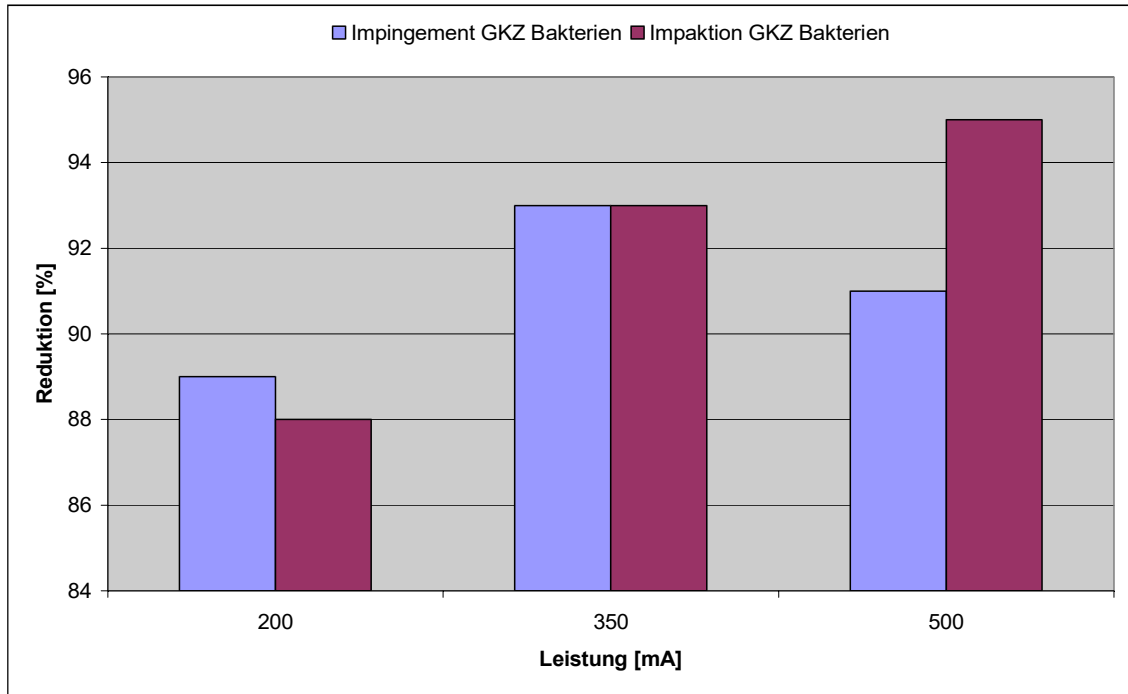


Abbildung 5.4.6: Relative Keimreduktion GKZ Bakterien bei variabler photokatalytischer Leistung; Carbon-material, Messkampagne November 2024

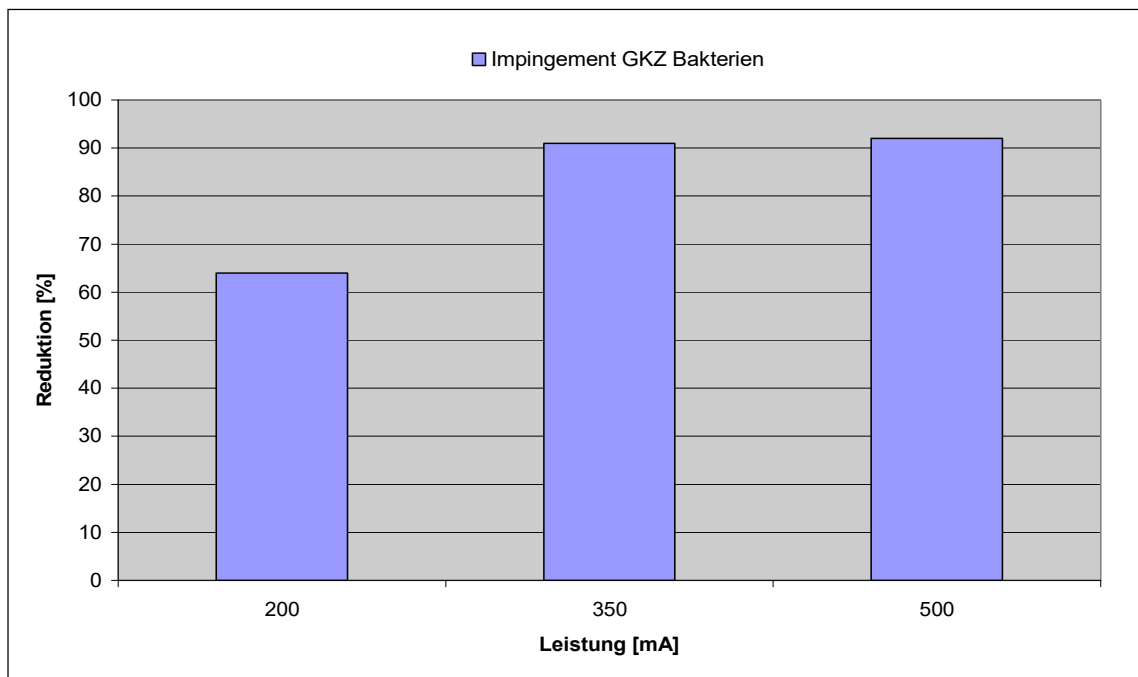


Abbildung 5.4.7: Relative Keimreduktion GKZ Bakterien bei variabler photokatalytischer Leistung, Glasfasermaterial, Messkampagne März 2025

Die Variation der photokatalytischen Leistung (angegeben in mA) ergab eine Steigerung der Reduktionsrate sowohl bei Bakterien als auch bei Pilzen.

In den Messkampagnen 2 (November 2024) und 3 (März 2025) wurden unterschiedlich hohe Werte (> 90 % vs. ca. 60 %) für die Keimreduktion gemessen. Ursachen dafür können im verwendeten Trägermaterial der Katalysatoren und Schwankungen in der Rohabluft des Stalls liegen.

Zum anderen wurde bei der Kampagne 3 infolge der Temperaturdifferenz zwischen Rohabluft und Messumgebung eine starke Kondensat- Bildung an den Wänden des Rohabluftschlauchs festgestellt. Dieses enthielt hohe Konzentrationen sowohl von Bakterien wie auch von Pilzen. Inwiefern ein ähnlicher Effekt in vorangegangenen Messungen auftrat, war nicht nachzuvollziehen. Eine visuelle Auffälligkeit war nicht gegeben.

Die summarische Entnahme am Ende der gesamten Messung ($t > 5$ h) ließ eine quantitative Zuordnung zu einzelnen Abschnitten nicht zu. Es ist aber wahrscheinlich, dass dadurch der Luft ein erheblicher Anteil der Keime entzogen wurde und damit die Messwerte geringer ausfielen.

Das angewandte Verfahren hat prinzipiell eine nachweisbar gute keimreduzierende Wirkung. Die Randbedingungen, vor allem unterschiedliche Kombinationen von Leistung und Luftstrom haben einen Einfluss auf die Wirksamkeit, der jedoch insgesamt gering und nicht sicher quantifizierbar war. Einen entscheidenden Einfluss hat die mittels Vorfilter einhergehende Staubreduktion, die mehr als 90% der mikrobiologischen Ausgangsbelastung der Stallabluft ausmacht wie am Demonstrator aus CLEAN AIR I gezeigt werden konnte.

Bei allen Messreihen (außer bei Probe: Stallprobe Roh. 2.0 mit 0,664 ng/ μ l) konnten keine aussagekräftigen DNA- Konzentrationen bestimmt werden.

5.5 Begleitende Materialuntersuchungen

Die begleitenden Materialuntersuchungen am Rasterelektronenmikroskop Zeiss Evo MA 15 an den Katalysatoroberflächen, inkl. EDX-System (Oxford Instruments) mit ausgewähltem Elementmapping zeigten keine Auffälligkeiten hinsichtlich Ablagerungen bzw. Erosionsprozessen oder ggf. Undichtigkeiten des Vorfilters bzw. im Partikelspektrum (vgl. Abb. 5.1 – 5.8). Es ist davon auszugehen, dass bei größerer Nutzungsdauer Nitratablagerungen auf den Katalysatoroberflächen nachzuweisen sind.

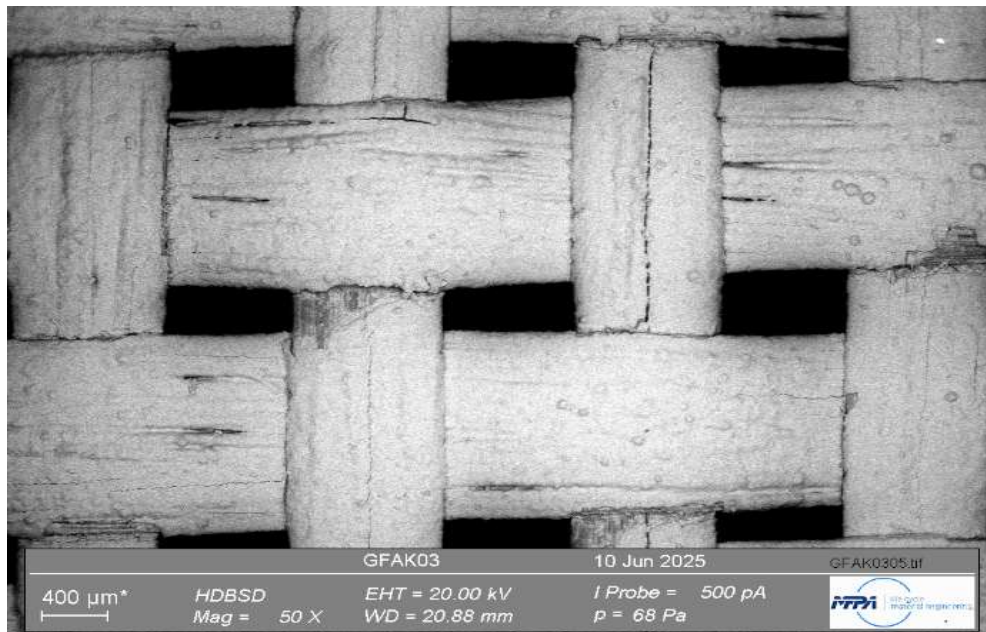


Abbildung 5.5.1: Glasfaserkatalysatoroberfläche (benutzt) im Rasterelektronenmikroskop

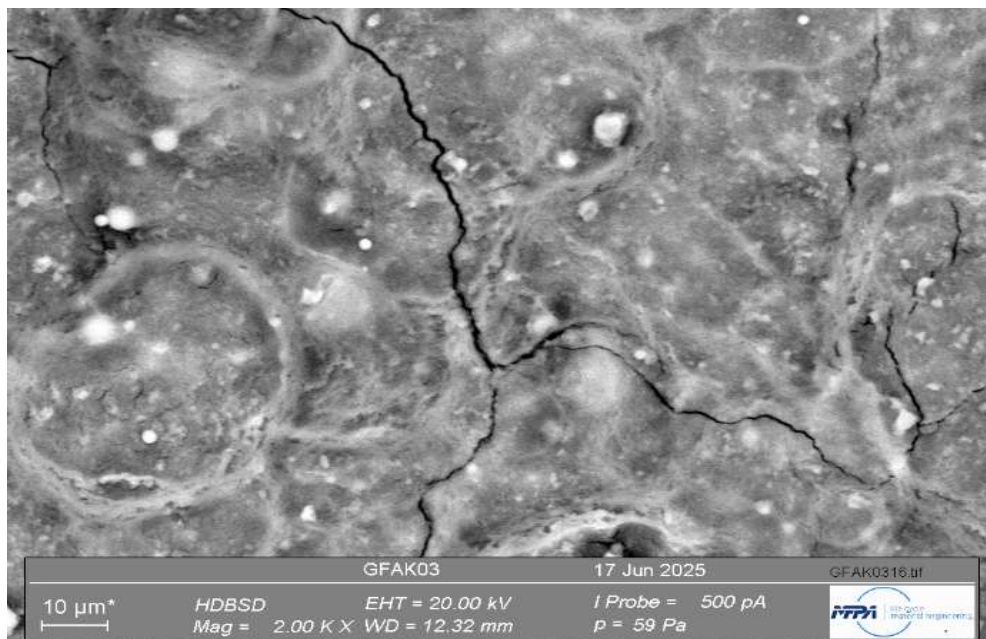


Abbildung 5.5.2: Glasfaserkatalysatoroberfläche (benutzt) im Rasterelektronenmikroskop

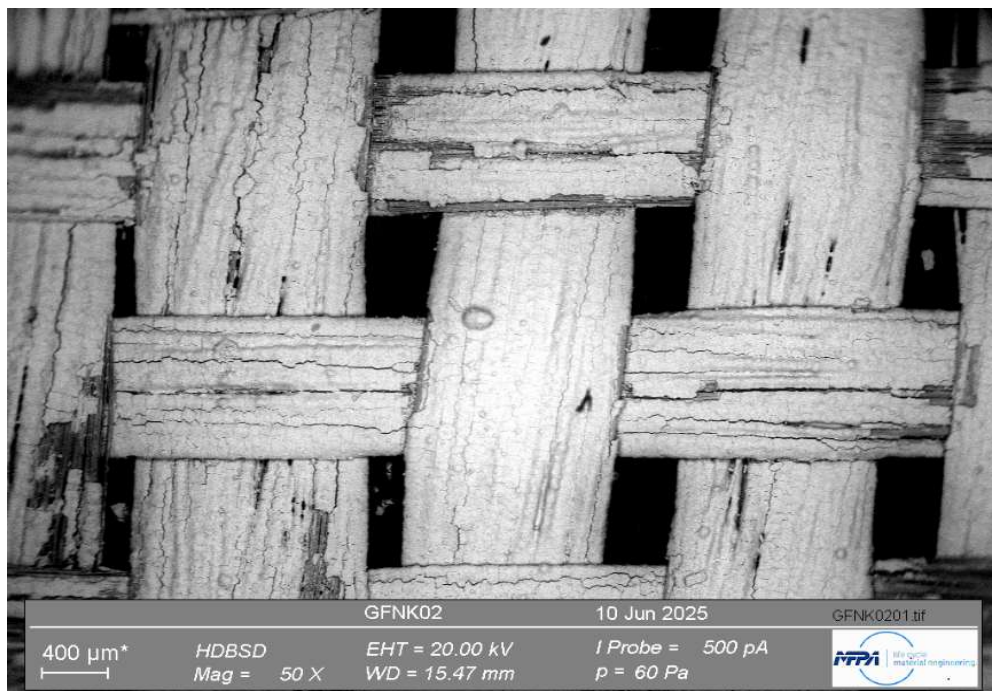


Abbildung 5.5.3: Glasfaserkatalysatoroberfläche (unbenutzt) im Rasterelektronenmikroskop

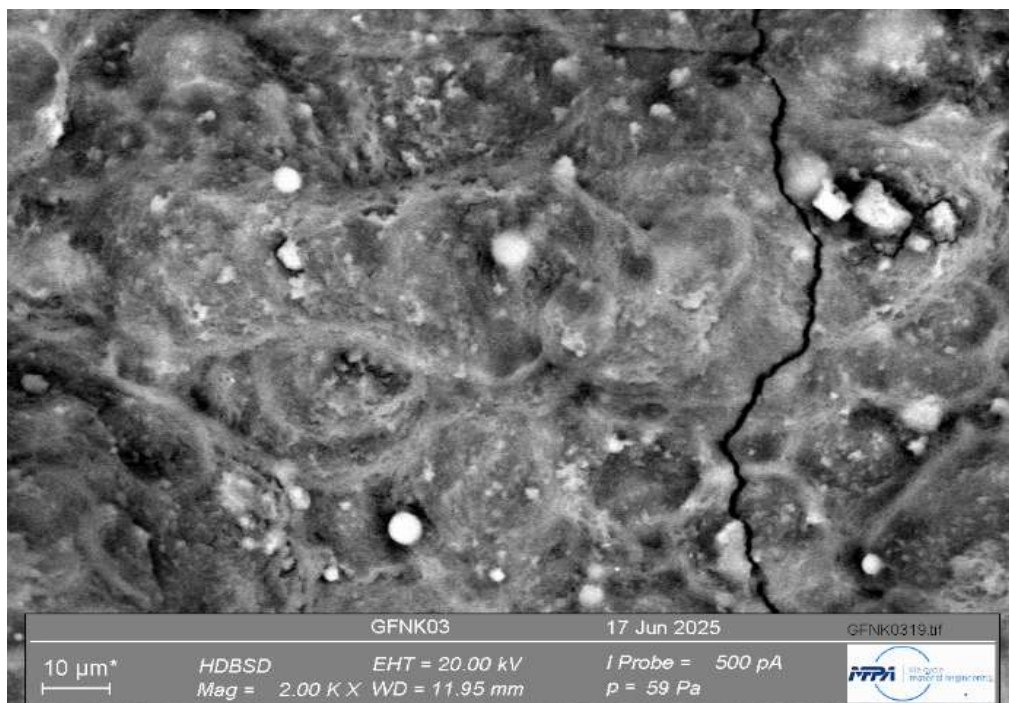


Abbildung 5.5.4: Glasfaserkatalysatoroberfläche (unbenutzt) im Rasterelektronenmikroskop

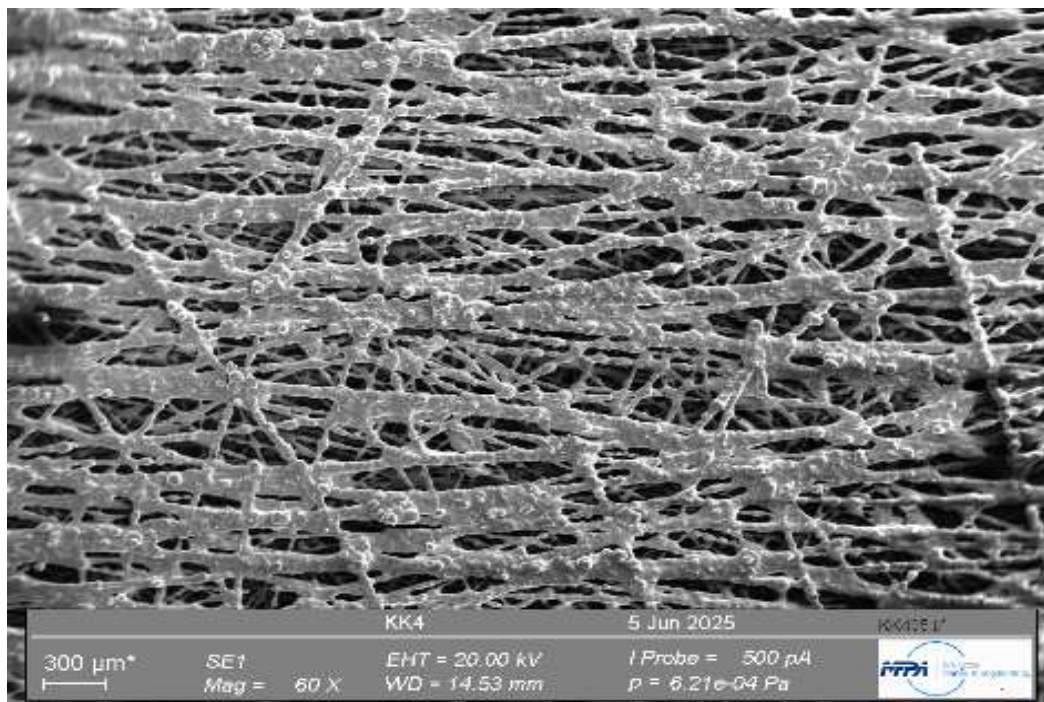


Abbildung 5.5.5: Kohlenstofffaser- Katalysatoroberfläche (benutzt) im Rasterelektronenmikroskop

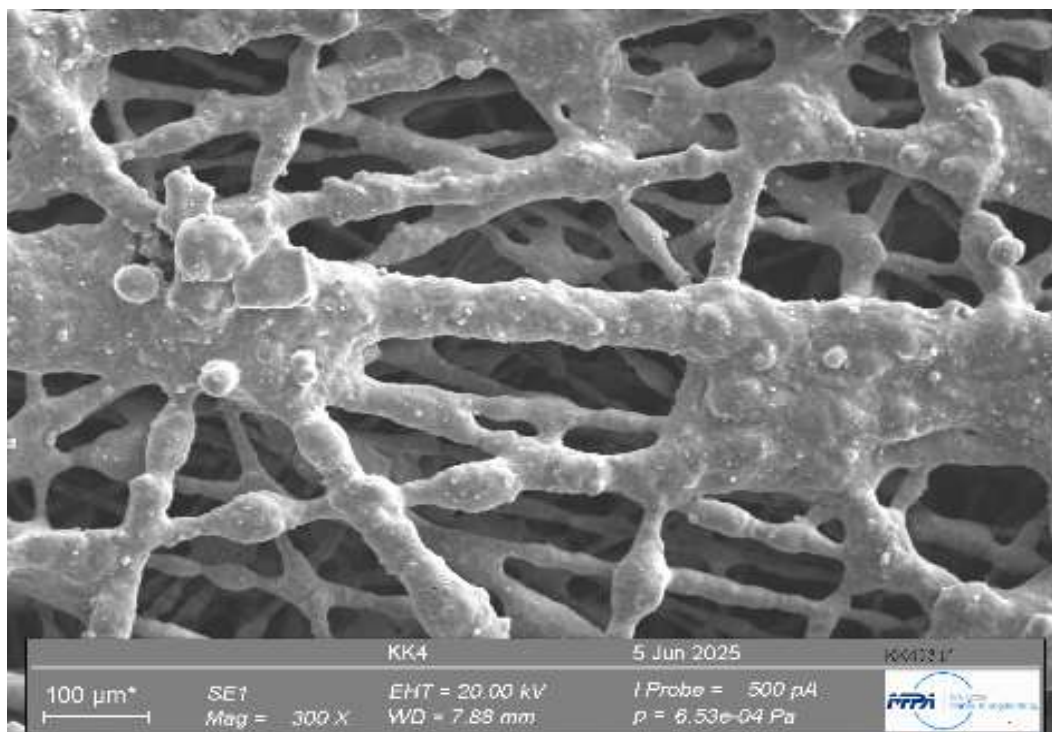


Abbildung 5.5.6: Kohlenstofffaser- Katalysatoroberfläche (benutzt) im Rasterelektronenmikroskop

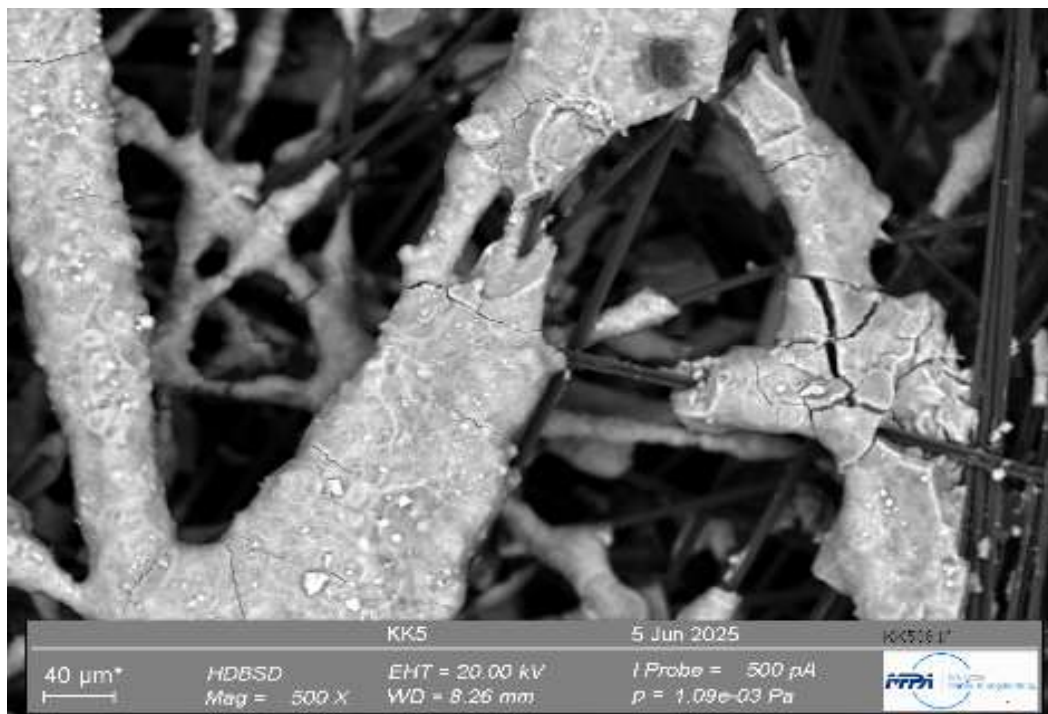


Abbildung 5.5.7: Kohlenstofffaser- Katalysatoroberfläche (benutzt) im Rasterelektronenmikroskop Beschichtungsschaden im 40µm - Bereich

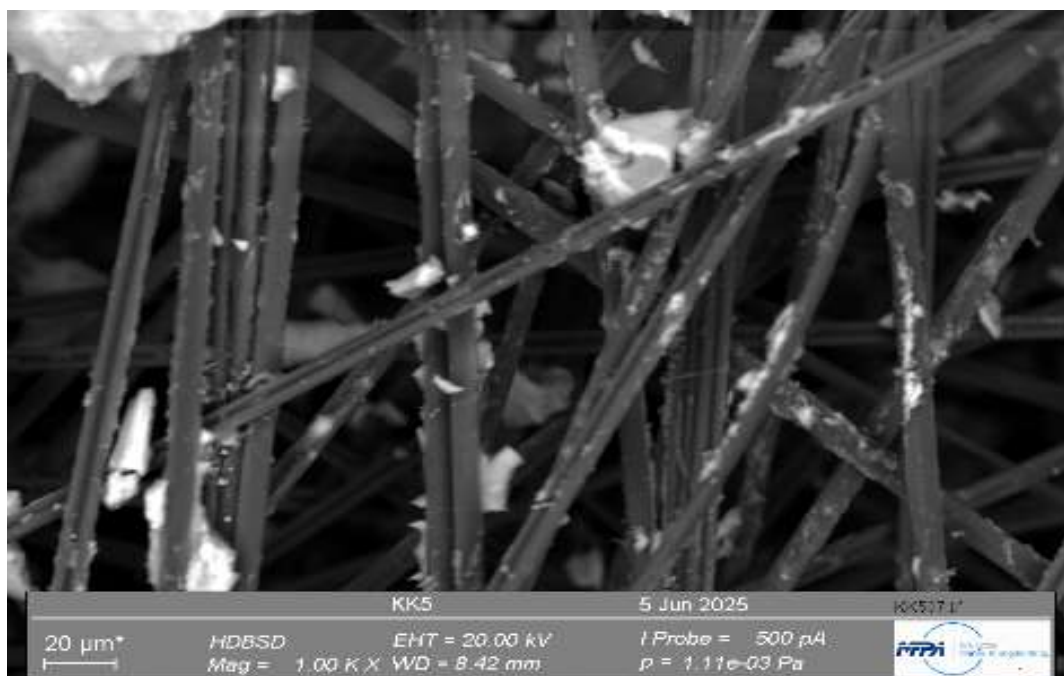


Abbildung 5.5.8: Kohlenstofffaser- Katalysatoroberfläche (benutzt) im Rasterelektronenmikroskop Beschichtungsschaden im 20µm - Bereich

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die weltweit wachsende Erzeugung von tierischen Nahrungsmitteln geht seit Jahren mit einer Intensivierung der Nutztierhaltung verbunden und einer Ausweitung der Stallhaltung einher. Damit verbundene Schadstoffemissionen aus zwangsbelüfteten Großställen gelangen über Lüftungsanlagen in teilweise hoch konzentrierter Form in die Umwelt. Deutschland ist u. a. gefordert, bis 2030 eine Reduzierung der Ammoniakemissionen von 29% gegenüber Bezugsjahr 2005 sicherzustellen. Das Bundeskabinett hat mit 2021 die Novellierung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) beschlossen.

Ein von der MFPA Weimar gemeinsam mit der Firma Lynatox GmbH entwickeltes Photokatalysatorsystem für Wasser/Abwasser wurde für den geplanten Anwendungsfall der Reinigung von hochbelasteter (Stall)Abluft verfahrenstechnisch weiterentwickelt und im Projekt genutzt.

Zur Bestimmung der realen Belastungssituation in der Abluft aus dem Schweinestall des Kooperationspartners sowie zur Untersuchung des Abbauverhaltens der Luftschadstoffe, insbesondere Ammoniak, sowie ggf. mikrobiologisch-hygienisch relevanter Parameter wurden Messkampagnen vor Ort im Agrarbetrieb durchgeführt. Dabei standen Probenahmen am/im Stall mit anschließender Analytik im Labor, umfangreiche Abbauprobversuche der typischen Stallabluftbestandteile mittels photokatalytischer Oxidation, Testung verschiedener Katalysator-Materialien im Upscaling- (halbtechnischen) Demonstrator zur Behandlung großer Volumenströme, Aufbau und Testung eines mikrobiologisch-hygienischen Abluftprobenahmesystems mittels Impingement bzw. Impaktion sowie Messungen zur realen mikrobiellen Ausgangsbelastung der Stallluft im Mittelpunkt der Projektarbeiten. Hierzu war es notwendig, eine robuste Sensortechnik zu entwickeln, die spätere sichere und steuerungsrelevante online- Übertragungen zulässt. Der halbtechnische Demonstrator wurde durch Upscaling bzw. Weiterentwicklung der Prototypen inkl. Demonstrator aus CLEAN AIR I durch die Firma Lynatox bereitgestellt.

Die Stallluftproben wurden mittels photo-akustischer Gasmesstechnik, angepasster automotive Sensorik und partiell FTIR-Messtechnik untersucht, um die Belastungssituation und den Abbau der relevanten Gase zu ermitteln. Eine umfangreiche Strömungssimulation wurde durch die Firma Lynatox erarbeitet und steht abschließend zur Verfügung. Die Feldmessungen erfolgten bei verschiedenen Luftvolumenströmen und energetischen Leistungsparametern, ausgedrückt in [mA].

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass sich alle relevanten Gase photokatalytisch abbauen lassen. Für zukünftige Messungen wäre ein zweiter Gasmonitor für synchrone Messungen zu Eingangs- und Ausgangsabluf am Photokatalysator notwendig. Mittels der eingesetzten Sensorik konnte eine ausreichende Selektivität und Sensitivität für online- Messungen und Steuerung bereitgestellt werden. Für eine sachgemäße Bemessung eines zukünftigen technischen Systems für die Anwendung im Stall müssen weitere Entwicklungsarbeiten und Untersuchungen im Rahmen eines weiteren Upscalings durchgeführt werden, um ein energetisches Optimum zu finden.

Die mit Impaktion und Impingement erfassten Bioaerosolbelastungen der Stallabluft in Reinholterode wiesen im Vergleich untereinander wie auch mit Literaturdaten ähnliche, teils sehr schwankende Ergebnisse auf. Die artifizielle Photokatalyse am Upscaling- Demonstrator führte bei steigender Strahlungsbelastung zu einer effektiven und sukzessiven Reduktion der Bioaerosol- relevanten Parameter um >> 70%.

Nachdem die prinzipielle Eignung des Abluftreinigungssystems für reale Abluftkomponenten nachgewiesen wurde, ist als nächster Entwicklungsschritt die weitere Maßstabsvergrößerung inkl. Optimierung notwendig, um den Ansprüchen für die Behandlung realer und größerer Abluftmengen gerecht zu werden. Alle bisherigen Messungen an dem halbtechnischen Upscaling- Demonstrator bedürfen damit **weiterer technischer Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten**.

Durch Reihenschaltung zusätzlicher Kat- Stufen dürften hierbei Abbauraten bei Ammoniak von >70% erreichbar sein (Kaskadeneffekt). In diesem Zusammenhang gilt es, für entstehendes NO_x und ggf. Nitrat umweltfreundliche, im Technikkontext bezahlbare Lösungen zu entwickeln. Eine sinnvolle Kopplung der Photokatalyse mit bestehenden Reinigungsverfahren könnte der „Königsweg“ sein.

Die bisherige Eingrenzung der Untersuchungen auf Abluft aus einem Schweinestall mit Spaltenböden ist um Untersuchungen an Einstreu- Haltung und Geflügelhaltung zu ergänzen. Da die Haltung auf Einstreu immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist zukünftig mit höheren Belastungen der Stallabluf mit Stäuben (und Bioaerosolen) zu rechnen. Erst danach können Auslegungskriterien für unterschiedliche Stalltypen abgeleitet werden.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt muss der Energiebedarf als noch ‚zu hoch‘ eingeschätzt werden. Über fortführende Prozessmodellierung und Simulationsrechnung ist der zukünftige Energiebedarf zu ermitteln und Wege für eine Minimierung zu finden. Es muss erreicht werden, dass die notwendige Energiemenge für die UV A Bestrahlung des Katalysators möglichst niedrig bleibt, um einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz des Systems zu gewährleisten. Deshalb ist es zweckmäßig, die Abbaueffizienz des Photokatalysesystems weiter zu steigern. Dies kann ggf. auch durch geeignete Vorbehandlungsverfahren, wie z.B. Ozonierung, Vakuum-UV, Hochspannung oder ein Luftwäscheverfahren erreicht werden.

Die Auslegung der aktiven Katalysatoroberfläche in der Demonstrationsanlage ist so zu gestalten, dass die Verweilzeit des durchströmenden Gases möglichst geringgehalten wird, da über diesen Parameter die notwendige Anlagengröße bestimmt wird. Die zu behandelnde Abluftmenge sollte praxisnah über Module anpassbar sein. Eine Einbindung in Systeme zur Erzeugung von erneuerbaren Energien wie Solaranlagen auf dem Stalldach oder benachbarte Biogasanlagen ist dabei sinnvoll. Da noch keinerlei Erfahrungswerte auf dem Gebiet der photokatalytischen Behandlung der Stallabluf vorliegen, kann dieser energetische Anspruch bisher noch nicht mit Leistungsdaten unteretzt werden.

Vor diesem Hintergrund ist die Bearbeitung eines Fortsetzungsprojektes CLEAN AIR im Rahmen der experimentellen Forschung zielführend und notwendig. Der ökologische und Kostendruck auf dem europäischen wie auch globalen Agrarmarkt wird weiter steigen und sich verschärfen (Globalisierung, Freihandelsabkommen). Das innovative, technologisch neuartige Verfahren zur Abluftbehandlung und die verfahrenstechnische Umsetzung sollten nicht nur über die Ansprüche der TA Luft hinausgehen, sondern auch insbesondere in Ausführung und Betrieb kostengünstig und robust sein. Die Agrarbetriebe selbst, inklusive die Orientierung auf das Tierwohl (interne Stallluft) wie auch die Umwelt (im weitesten Sinne) könnten unmittelbar, mittel- und langfristig profitieren.

Am 05.05.2022 fand im Agrarbetrieb ein Workshop der Operationellen Gruppe CLEAN AIR II mit Vertretern der lokalen Behörden, Kommune und Thüringer Aufbaubank statt. Dabei konnten die Ergebnisse des Projekts CLEAN AIR I diskutiert und die Notwendigkeit und Sinnfälligkeit einer Fortsetzung der innovativen Neuentwicklungen evaluiert und bestätigt werden. Bei der Zukunftswerkstatt zur Förderung von Innovationen und Zusammenarbeit in der Thüringer Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft am 10.05.2022 in Jena kam es zu einem intensiven Erfahrungsaustausch von Operationellen Gruppen in Thüringen. Veranstalter waren das (damalige) Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (TMIL), das Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR) sowie die Thüringer Aufbaubank. Im Juli 2022 erfolgte eine umfangreiche Darstellung des Projekts im TBV Journal. Ein Höhepunkt war in diesem Zusammenhang der Besuch von Frau Ministerin Karawanskij im Agrarbetrieb in Reinholterode. Anlässlich der Grünen Tage Thüringen Ende September 2022 und 2024 in der Messe Erfurt sowie bei verschiedenen EIP Agri Workshops wurde das Projekt einem breiten wie auch Fachpublikum vorgestellt. Insbesondere die Teilnahme an einem EIP-agri online Workshop zum Thema Tierwohl und der Thüringer Innovationstag im November 2023 in Weimar sind in diesem Zusammenhang zu nennen.



Abbildung 6.1: Präsentation des Demonstrators; Workshop am 05.05.2022 in Reinholterode anlässlich des Besuchs von Ministerin Karawanskij (TMIL)



Abbildung 6.2: Daniel Martschoke, Geschäftsführer Lynatox, beim Vortrag; Workshop am 05.05.2022 in Reinholterode anlässlich des Besuchs von Ministerin Karawanskij (TMIL)

7 Literatur

- Aarnink, A.J.A., Landman, W.J.M., Melse, R.W., Zhao, Y., Ploegaert, J.P.M., Huynh, T.T.T. (2011): Scrubber capabilities to remove airborne microorganisms and other aerial pollutants from the exhaust air of animal houses. *Trans. ASABE* 54(5): 1921-1930.
- Abdelaziz, A., T. Ishijima, N. Osawa, T. Seto (2019): *Plasma Chem. Plasma Process.* 39, 165-185.
- Ahmad, I. K., A. E. Wallis, J. C. Whitehead (2003): *High Temp. Mat. Processes* 7, 487-499.
- Asenjo, N. G., Santamaría, R., Blanco, C., Granda, M., Álvarez, P., R. Menéndez (2013): Correct use of the Langmuir–Hinshelwood equation for proving the absence of a synergy effect in the photocatalytic degradation of phenol on a suspended mixture of titania and activated carbon. *Carbon* 55: 62–69. 10.1016/j.carbon.2012.12.010.
- Bosch (2003): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Chi, M.-C.; C.-S. Li (2006): Analysis of bioaerosols from chicken houses by culture and non-culture methods. *Aerosol. Sci. Technol.* 40 (12): 1071 – 1079.
- Clauß, M. (2015): Particle size distribution of airborne microorganisms in the environment – a review, *Landbauforschung, Appl. Agricultural Forestry Res.*
- Dutschke, M., T. Schnabel, F. Schütz, and C. Springer (2022): Degradation of Chlorinated Volatile Organic Compounds from Contaminated Ground Water Using a Carrier-Bound TiO₂/UV/O₃-System. *Journal of Environmental Management* 304 (February): 114236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114236>.
- Eckhof (2017): Hygiene ist Sicherheit. Vortrag auf Thüringer Geflügeltag; Lehesten.
- FAO Datenbank (2018): „New food balances“ (Fleischverbrauch pro Kopf), „Live Animals“ (Tierhaltung), „Livestock Primary“ (Fleischerzeugung).
- FAO Food Outlook (2020): Daten zur Fleischproduktion.
- Hahne, J. (2016): Vortrag „Wissenschaftliche Erkenntnisse zur Abluftreinigung für die Nutztierhaltung“, 12. Informationsveranstaltung „Umweltverträgliche Landwirtschaft“, Mai 2016.
- Hahne, J. (2013): Verlauf und Umfang von Spurengasemissionen aus der Geflügelhaltung als Grundlage zur Ableitung von Vermeidungs- und Verminderungsstrategien. In: 11. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, 24.-26. September in Vechta. Darmstadt: KTBL, S. 312-317.
- Hahne, J. (2022): Die Situation in der Schweinehaltung. Thünen-Institut, Braunschweig.
- Hartung, J., Habig, C., M. Clauß (2014): Minderungsmaßnahmen für Bioaerosol-Emissionen aus Nutztierställen. *Umweltmed. Hygiene Arbeitsmed.* 19(4): 326.
- Jahne, M.A.; Rogers, S.W.; Holsen, T.M.; Grimberg, S.J.; Ramler, I.P.; S. Kim (2016): Bioaerosol deposition to food crops near manure application: quantitative microbial risk assessment. *J. Environ. Qual.* 45: 666 – 674.
- Kisch, Horst (2015): *Semiconductor Photokatalysis- Principles and Applications*. Wiley VCH.
- Kleinschmidt, Olaf (2001): Photokatalytische Oxidation von Alkenen Und Alkanen Mit Sauerstoff an Belichtetem Titandioxid. Universität Hannover.

Kumar, K. V., Porkodi, K., F. Rocha (2008): Langmuir–Hinshelwood kinetics – A theoretical study. *Catalysis Communications* 9 (1): 82–84. 10.1016/j.catcom.2007.05.019.

Kupper, T., S. Vuille, A. Valach (2022): Abluftwäscher zur Reduktion von Ammoniakemissionen aus Schweine- und Geflügelställen. Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen.

LfULG Sachsen (2017): Innovative Abluftreinigung in der Tierhaltung. Machbarkeitsstudie, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Eds.: D. Grahn, T. Puritz, F. Rebbe, A. Köhler; Schriftenreihe, Heft 2, ISSN 1867-2868; Dresden.

Lindner, M. (1997): Optimierung Der Photokatalytischen Wasserreinigung Mit Titandioxid: Festkörper- und Oberflächenstruktur Des Photokatalysators. Universität Hannover.

Mehling, S., T. Schnabel, J. Londong (2021): Photocatalytic Ozonation in an Immersion Rotary Body Reactor for the Removal of Micro-Pollutants from the Effluent of Wastewater Treatment Plants. *Water Science and Technology*, 10 (December), wst2021617. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.617>.

Miao, Z.; Chai, T.; Qi, C.; Cai, Y.; Liu, J.; Yuan, W.; M. Yao (2010): Composition and variability of airborne fungi in a closed rabbit house in China. *Aerobiologia* 26: 135 – 140.

Murayama, M.; Kakinuma, Y.; Maeda, Y.; Rao, Y.R.; Matsuda, M.; Xu, J.; Moore, P.J.; Millar, B.C.; Rooney, P.J.; Goldsmith, C.E.; Loughrey, A.; Ann, M.; McMahon, S.; McDowell, D.A.; J-E. Moore (2010): Molecular identification of airborne bacteria associated with aerial spraying of bovine slurry waste employing 16S rRNA gene PCR and gene sequencing techniques. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 73: 443 – 447.

Oliver, J.D. (2005): The viable but non-culturable state in bacteria. *J. Microbiol.* 43: 93 – 100.

Peñafiel Ayala, Ródney (2002): Photokatalytische Behandlung von Biologisch Schwer Abbaubaren Wasserverunreinigungen Mit Titandioxid Und Simuliertem Sonnenlicht. Technischen Universität Berlin.

Pfoertner, K.-H., T. Oppenländer (2012): Photochemistry. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, edited by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, a19_573.pub2. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a19_573.pub2.

Pichat, P. (2013): Photocatalysis and Waterpurification. Wiley VCH. *Römpf Chemie Lexikon*. 10th ed. Thieme, 1999.

Rheume, J. M. (2010): Solid state electrochemical sensors for Nitrogen Oxide (NO_x) detection in lean exhaust gases. University of California, Berkeley.

Schnabel, T., N. Jautzus, S. Mehling, C. Springer, J. Londong (2021): Photocatalytic Degradation of Hydrocarbons and Methylene Blue Using Floatable Titanium Dioxide Catalysts in Contaminated Water. *Journal of Water Reuse and Desalination* 11, no. 2 (June): 224–35. <https://doi.org/10.2166/wrd.2021.118>.

Schnabel, T., S. Mehling, M. Dutschke, C. Springer (2022). Determination of Photocatalytic Properties of Supported Catalysts with Low-Cost NO_x Sensors and the Arduino Platform. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 424 (February): 113611. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113611>.

Schnabel, T., S. Mehling, J. Londong, C. Springer (2020): Hydrogen Peroxide-Assisted Photocatalytic Water Treatment for the Removal of Anthropogenic Trace Substances from the Effluent of Wastewater Treatment Plants. *Water Sci Technol*, (October), wst2020481. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.481>.

Schnabel, T., C. Springer, S. Hörnlein, S. Mehling, S. Beier, J. Londong (2020): Titandioxid basiertes photokatalytische Material für den Abbau von Pharmaka aus dem Kläranlagenablauf, 9.

Schnabel, T. (2021): <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113611>

Steinmetz, M. (2014): „Aktuelle solare UV-Situation in Deutschland“, UMID 1.

TA-Luft (2021): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft, Berlin.

Tesseraux (2013): Aktueller Sachstand VDI-Regelwerk zu Bioaerosolen; Fachsymposium Hannover.

UBA (2022): https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/uv-situation_11-17_0.pdf

UBA (2020): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/lachgas-methan-abgerufen-am-24.01.2022>

UBA (2016): Aktuelle Entwicklung Kosten-Nutzenanalyse und Vollzugsempfehlungen für den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen in der Tierhaltung. Eds.: J. Hahne, F. Arends, R. Beverborg, A.-L. Niehoff, S. Bönsch, A. Hortmann-Scholten; UBA- Texte 61, Dessau-Roßlau, ISSN 1862-4804.

UBA (2013): Klimaschutz und Emissionshandel in der Landwirtschaft. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4397.htm>; UBA-Heft 01/2013, Dessau-Roßlau. Eds.: B. Lünenbürger, A. Benndorf, M. Börner, A. Burger, H. Ginzky, C. Ohl, D. Osiek, D. Schulz, M. Strogies.

VDI 4250 Blatt 3 (2016): Bioaerosole und biologische Agenzien - Anlagenbezogene, umweltmedizinisch relevante Messparameter und Beurteilungswerte; VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss.

VDI 4253 Blatt 3 (2019): Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Verfahren zum quantitativen kulturellen Nachweis von Bakterien in der Luft - Verfahren nach Abscheidung in Flüssigkeiten; VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss.

Völker, G. (2000): Photokatalytisches Verfahren zur Reinigung NH₃- und NO- haltiger Abgase. Dissertation, FB Chemie Universität Hannover.

Wang, Y; Chai, T.; Lu, G.; Song, C.; M. Yao (2007): The airborne fungi from indoor air of animal houses. XIII. International Congress of Animal Hygiene, ISAH-Tartu, Estonia, 571 – 577.

Webb, J., Sommer, S.G., Kupper, T., Groenestein, C.M., Hutchings, N., Eurich-Menden, B., Rodhe, L., Misselbrook, T., B. Amon (2012): Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane during the management of solid manures. A review, in: Lichtfouse, E. (Ed.), Agroecology and Strategies for Climate Change. Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, Germany, pp. 67-108.

Wood, D.J., B.J. Van Heyst (2016): A review of ammonia and particulate matter control strategies for poultry housing. Trans. ASABE 59(1): 329-344.

Zhang, N., Z. Bai, W. Winiwarter, S. Ledgard, J. Luo, J. Liu, Y. Guo, L. Ma (2019): Reducing ammonia emissions from dairy cattle production via cost-effective manure management techniques in China. Environ. Sci. Technol., 53, pp. 11840-11848, [10.1021/acs.est.9b04284](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04284)

Zhao, Y. (2011): Effectiveness of multi-stage scrubbers in reducing emissions of air pollutants of pig houses. Trans ASABE 54 (1): 285 – 293.

Danksagung

Die Operationelle Gruppe CLEAN AIR (II) möchte dem Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TMWLLR) und dem Projektträger Thüringer Aufbaubank (hier nach Richtlinie zur Förderung der Zusammenarbeit in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft in Thüringen, LFE) für die großzügige Bereitstellung der finanziellen EU- und Landesmittel im Rahmen der Förderinitiative Ländliche Entwicklung in Thüringen, ELER, ganz herzlich Dank sagen. In besonderer Weise gilt dies Frau Beetz und ihren MitarbeiterInnen, die stets freundlich, geduldig und hilfsbereit den Projektverlauf begleiteten und unterstützten.

Ein besonderer Dank gilt dem Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR) für die sehr freundliche fachliche Begleitung, Förderung und Unterstützung. In diesem Zusammenhang sei ein großer Dank an Herrn Knape, dem Gutachterausschuss sowie den damaligen Innovationsdienstleistern Herrn Hildebrandt und Frau Bader für ihr Vertrauen und ihre Unterstützung gerichtet.

Nicht zuletzt wollen wir uns in besonderer Weise bei dem im Projekt integrierten Agrarbetrieb Agrar GmbH Reinholterode, ihrem Betriebsleiter Herrn Meise und den KollegInnen vor Ort für die immer sehr freundliche, offene und zuverlässige Mitarbeit, Unterstützung und nicht zuletzt Kulinarik vor Ort bedanken.