

Forschungsbericht

Nr. 138

**Biofilter/Biowäscher an Tierhaltungsanlagen als
relevante Quelle von Lachgas durch
Ammoniakabscheidung?**

Verfasser:

Dr. Manfred Trimborn

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES)

Fachbereich Pflanzenernährung

Herausgeber: Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn
Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Bonn, April 2006

ISSN 1610-2460

Projektleitung: PD Dr. Joachim Clemens

Projektbearbeiter: Dr. agr. Manfred Trimborn
Dr. Sebastian Wulf

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES)
Lehr- und Forschungsbereich Pflanzenernährung
Karlrobert-Kreiten-Str. 13,
D-53115 Bonn

Zitiervorschlag:

TRIMBORN, M. (2006): Biofilter/Biowäscher an Tierhaltungsanlagen als relevante Quelle von Lachgas durch Ammoniakabscheidung? Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 138, 59 Seiten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Gründe für die biologische Abluftreinigung an Tierhaltungsanlagen.....	1
1.2	N-Dynamik am Biofilter	3
1.3	Prozesse der NO- und N ₂ O-Bildung	5
2	Fragestellung, Zielsetzung und Durchführung	7
3	Material und Methoden	8
3.1	Freiland Untersuchungen	8
3.1.1	Untersuchte Anlagen	8
3.1.2	Probenahme und Analytik	11
3.1.3	Datenauswertung	14
3.2	Laborversuch zu N ₂ O-Emissionen aus Gülle nach Einleitung von Wäscher- und Biofiltersickerwasser.....	16
3.3	Laboruntersuchungen zur Spurengasbildung und Abbauleistung von Biofiltern unter Berücksichtigung der Temperatur und anderer Einflussfaktoren	16
3.3.1	Aufbau der Biofilteranlage.....	17
3.3.2	Rohgaskonditionierung	19
3.3.3	Probennahme und Analytik.....	20
3.3.4	Bestimmung des NH ₄ -Sorptionsvermögens des Biofiltermaterials	21
4	Ergebnisse	22
4.1	Messungen an Abluftreinigungsanlagen an Ställen	22
4.1.1	VOC-Messung.....	22
4.1.2	NH ₃ -Messung	24
4.1.3	N ₂ O- und NO-Messung	26
4.2	N ₂ O-Emissionen aus Gülle nach Einleitung von Wäscher- und Biofiltersickerwasser ...	27
4.3	Untersuchungen an Laborbiofiltern	30
4.3.1	Einfluss der Temperatur und des Filtermaterials auf die Ammoniak-Sorption	30
4.3.2	Einfluss der Temperatur und des Filtermaterials auf die NMVOC-Sorption	32
5	Ausblick	35
6	Schlussfolgerungen für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis	39
7	Zusammenfassung	41
8	Literatur	43
9	Anhang	48
10	Veröffentlichungen, Vorträge, Posterpräsentationen	62
11	Kurzfassung	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Berechnete NH_3 -Emissionen aus der Tierhaltung je Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche bzw. Landkreisfläche.	1
Abbildung 2: Beziehung zwischen dem NH_3 -Abbau und der Produktion von N_2O bei Biofiltern an Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlungsanlagen und im Labormaßstab.	4
Abbildung 3: Biotische Prozesse der NO - und N_2O -Bildung im Zuge des NH_3 -Abbaus.	5
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Probenahmeeeinheit.	12
Abbildung 5: Vorgehensweise bei der Auswertung der aufgezeichneten VOC - und NO_x -Messwerte.	15
Abbildung 6: Einzelner Laborbiofilter mit Probenahmestellen in gestauchter Darstellung...	17
Abbildung 7: Labor-Biofilteranlage mit 16 Filtersäulen und Rohgaskonditionierung.	18
Abbildung 8: Prozess der Rohgaskonditionierung; dargestellt für eine Temperaturvariante.	20
Abbildung 9: VOC -Konzentrationen im Rohgas sowie VOC - und CH_4 -Konzentrationen im Reingas eines Biofilters mit Wurzelholzschüttung innerhalb eines einwöchigen Messzeitraumes.	22
Abbildung 10: NH_3 -Konzentrationen im Rohgas und Reingas eines Biofilters mit Wurzelholzschüttung innerhalb eines einwöchigen Messzeitraumes.	24
Abbildung 11: Korrelation zwischen den NH_3 - und den NMVOC -Abbauraten der untersuchten Abluftreinigungssysteme.	25
Abbildung 12: N_2O -Konzentrationen im Rohgas und Reingas eines Biofilters mit Wurzelholzschüttung innerhalb eines einwöchigen Messzeitraumes.	26
Abbildung 13: NH_3 -Abbau im Laborversuch in Abhängigkeit von der Filter-Temperatur.	31
Abbildung 14: Abhängigkeit des $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Gleichgewichtes von der Temperatur.	31
Abbildung 15: NH_3 -Abbau im Laborversuch in Abhängigkeit vom Filtermaterial.	32
Abbildung 16: NMVOC -Abbau im Laborversuch in Abhängigkeit von der Filter-Temperatur.	33
Abbildung 17: NMVOC -Abbau im Laborversuch in Abhängigkeit vom Filtermaterial.	33
Abbildung 18: Preisentwicklung für den CO_2 -Emissionshandel der Handelsplattform NORD POOL von Februar 2005 bis Juli 2006.	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Quellen der Ammoniak-Emissionen in Deutschland 1999.	2
Tabelle 2:	Übersicht der Versuchsansätze im Laborversuch zur Ermittlung der Spurengasemissionen nach Einleitung von Wasch- bzw. Sickerwasser in Gülle.....	16
Tabelle 3:	Abmessungen und technische Betriebsdaten der Laboranlage.....	18
Tabelle 4:	Eigenschaften der Trägermaterialien (bestimmt zum Zeitpunkt der Filterbefüllung).....	18
Tabelle 5:	Zieleigenschaften des synthetischen Rohgases und Komponenten zu dessen Herstellung.....	19
Tabelle 6:	VOC-Lösungsbedarf der Temperaturvarianten je Tag zur Erzielung einer rel. Luftfeuchte von 100 % im Rohgas.....	19
Tabelle 7:	Methan und NMVOC-Konzentrationen in der Stallabluft vor (Rohgas) und nach (Reingas) den untersuchten Abluftreinigungssystemen (in mg C /Nm ³) sowie deren NMVOC-Abbauleistung (in % der Rohgaskonzentration).	23
Tabelle 8:	NH ₃ -Konzentrationen in der Stallabluft vor (Rohgas) und nach (Reingas) den untersuchten Abluftreinigungssystemen (in mg N /Nm ³) sowie deren NH ₃ -Abbauleistung (in % der Rohgaskonzentration).	24
Tabelle 9:	N ₂ O- und NO-Bildung in den untersuchten Abluftreinigungssystemen (in mg N / Nm ³ und in % des abgeschiedenen Ammoniaks).	27
Tabelle 10:	N ₂ O-Bildung nach Einleitung von Wäscher- und Biofiltersickerwasser in Schweinegülle.....	28
Tabelle 11:	CH ₄ -Bildung nach Einleitung von Wäscher- und Biofiltersickerwasser in Schweinegülle in Abhängigkeit der zugeführten Nitrit-Menge.	29
Tabelle 12:	Mittlere potenzielle und effektive Adsorptionskapazitäten (AK _{pot} und AK _{eff}) der Trägermaterialien (<i>Miscanthus</i> und Holz).....	32
Tabelle 13:	Kalkulation der potentiellen N ₂ O-Bildung durch die Abluftreinigung an Tierhaltungsanlagen.....	35
Tabelle 14:	Anteil der einzelnen Treibhausgase sowie der Emittentengruppen an den Treibhausgasemissionen in Deutschland für das Jahr 2003.	36
Tabelle 15:	Bilanzierung der Kosten der durch Abluftreinigung verursachten N ₂ O-Emissionen und ihrer Vermeidungskosten durch Erweiterung von Abluftreinigungsanlagen mit Säurewäschern.	37

1 Einleitung

1.1 Gründe für die biologische Abluftreinigung an Tierhaltungsanlagen

Die moderne Tierhaltung ist mit der Bildung von mehr oder weniger belasteter Abluft verbunden. Diese Abluft kann durch ihren Geruch, hervorgerufen durch flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen (Volatile organic compounds, VOC), bei der Bevölkerung zu erheblichen Belästigungen führen. Probleme für den Menschen können aber auch durch Staub und Keime entstehen, weshalb eine Abluftreinigung besonders in Ortslagen erforderlich werden kann. Als weitere Komponenten finden sich in der Stallabluf Ammoniak, Methan, Lachgas und natürlich CO_2 aus der Atmung der Tiere.

Neuerdings wird verstärkt der Umweltbelastung durch NH_3 -Emissionen Rechnung getragen (Eutrophierung, Versauerung etc.), was z.B. in den Abstandsregelungen der neuen TA-Luft zum Ausdruck kommt. Hierbei richtet sich das Ziel weniger auf den Menschen, sondern es soll der Schutz vor erheblichen Nachteilen durch Schädigung empfindlicher Pflanzen (Kulturpflanzen, Baumschulen) und Ökosysteme durch die Einwirkung von Ammoniak gewährleistet werden. Mit dem sog. Göteborg-Protokoll (in Verbindung mit der Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstgrenzen für bestimmte Luftschadstoffe (NEC-RL)) hat sich die Bundesregierung dazu verpflichtet, die NH_3 -Emissionen bis zum Jahr 2010 auf 550.000 t zu reduzieren.

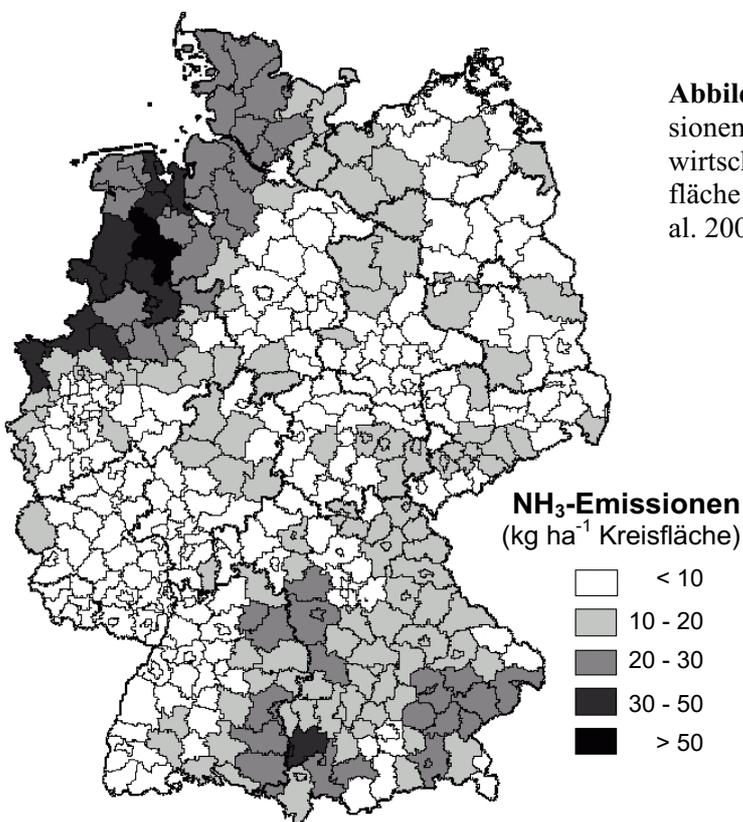


Abbildung 1: Berechnete NH_3 -Emissionen aus der Tierhaltung je Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche bzw. Landkreisfläche (WERNER 2005, nach DÄMMGEN et al. 2002, ergänzt von OSTERBURG 2005).

Der größte Anteil der bundesweiten NH₃-Emissionen ist direkt mit der Tierhaltung verbunden und vor allem in den viehhaltungstarken Gegenden Nordwestdeutschlands ein Problem. So werden in den Landkreisen Vechta und Cloppenburg über 50 kg NH₃ pro ha Kreisfläche emittiert (Abbildung 1).

Insgesamt ist die Landwirtschaft zu über 95 % an den bundesweiten NH₃-Emissionen beteiligt. Davon entstammen rund 30 % direkt aus den Tierställen. Schweine und Hühnerställe, die in der Regel mit einer geschlossenen Abluftführung betrieben werden, sind zusammen für 96 kt NH₃-Emissionen verantwortlich (Tabelle 1).

Tabelle 1: Quellen der Ammoniak-Emissionen in Deutschland 1999.

	kt NH ₃	Anteil %
Gesamt ¹⁾ :	596	100
Landwirtschaft ¹⁾ :	567	95
Tierhaltung ¹⁾ :	466	78
Stall: ²⁾	171	29
davon: Schweine: ²⁾	72	12
Hühner: ²⁾	24	4

¹⁾ Quelle: UMWELTBUNDESAMT (2003)

²⁾ Quelle: DÖHLER et al. (2002)

Um mögliche schädliche Auswirkung für Mensch und Natur zu vermeiden, wird die Abluft aus den Ställen über Abluftreinigungssysteme geleitet. Im Landkreis Cloppenburg werden Neubauten von Schweineställen in der Regel nur noch genehmigt, wenn sie mit einem geeigneten Abluftreinigungssystem ausgestattet sind. Um festzustellen welche Anlagen für die Tierhaltung geeignet sind, wurde vom Landkreis der sog. Cloppenburger Leitfaden (HAHNE et al. 2002) entwickelt. Seit 2005 wird die Prüfung der Abluftreinigungsanlagen von der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (DLG) im Rahmen eines DLG-Signum-Tests durchgeführt. Hierfür wurde von der DLG ein Prüfrahmen „Abluftreinigungssysteme für Tierhaltungsanlagen“ entwickelt.

1.2 N-Dynamik am Biofilter

Verschiedene Untersuchungen an Labor-Biofiltern zeigten NH_3 -Abscheideleistungen von über 90 % bis hin zu einer vollständigen NH_3 -Abscheidung aus der behandelten Luft (HARTIKAINEN et al. 1996, CHUNG & HUANG 1998, LIANG et al. 2000, JOSHI et al. 2000, KIM et al. 2002, SHERIDAN et al. 2002, LEE et al. 2002, CHOI et al. 2003). Die NH_3 -Abscheidung im Biofilter beruht zunächst auf der Lösung des NH_3 im Biofilm des Filtermaterials. Hier steht das NH_3 in Abhängigkeit vom pH-Wert im Gleichgewicht mit NH_4^+ (vergl. Abbildung 14 S. 31). Durch Nitrifikation werden die NH_3 - und NH_4^+ -Konzentration im Biofilm gering gehalten, ansonsten wäre die Sorptionskapazität des Biofilms für NH_3 rasch erschöpft (SMET et al. 2000). Durch die Nitrifikation reichert sich im Biofilter zunächst Nitrat an. Während des weiteren Betriebs des Biofilters kann es auch zu einer Anreicherung von Nitrit kommen, wobei die Nitritkonzentrationen zum Teil deutlich über den Nitratkonzentrationen liegen (JOSHI et al. 2000, KIM et al. 2000, CHUNG et al. 2001).

Die hohen Nitrit-Konzentrationen sind auf eine unvollständige Nitrifikation zurückzuführen (Hemmung der *Nitrobacter*, bzw. der Oxidation des Nitrits zu Nitrat), wobei noch nicht eindeutig geklärt ist, wodurch diese Hemmung hervorgerufen wird. Während SMET et al. (2000) die Hemmung der Nitrifikation auf osmotische Effekte des NH_4^+ und NO_3^- zurückführen und selbst bei Rohgaskonzentrationen von bis zu 400 ppm keinen Einfluss von NH_3 auf die Nitrifikation fanden, gehen HARTIKAINEN et al. (1996) und WECHHUYSSEN et al. (1994) von einem toxischen Effekt des freien NH_3 im Biofilm bei einer zu hohen NH_3 -Konzentration im Rohgas aus, ein Effekt, der auch bei Biofiltern im Bereich der Abwasserreinigung zu erhöhten Nitritkonzentrationen führt (VILLAVERDE et al. 2000, HWANG et al. 2000). So fanden ANTHONISEN et al. (1976), dass *Nitrosomonas* (Oxidation von NH_3 zu NO_2^-) bei Konzentrationen an freiem NH_3 von 10 - 150 mg $\text{NH}_3\text{-N/l}$ gehemmt werden, *Nitrobacter* (Oxidation von NO_2^- zu NO_3^-) aber schon bei 0,1 - 1,1 mg $\text{NH}_3\text{-N/l}$.

Nach Bilanzierung der Stickstoffflüsse im Biofilter wurden nur etwa 60 – 80 % des abgebauten NH_3 im Biofilter wiedergefunden (JOSHI et al. 2000, SMET et al. 2000, DEMEESTERE et al. 2002). MALHAUTIER et al. (2003) vermuteten, dass diese geringen Wiederfindungsraten auf gasförmige Verluste im Zuge von Denitrifikationsvorgängen im Biofilter zurückzuführen sind. JOSHI et al. (2000) konnten im Reingas N_2O und NO nachweisen, diese Gase aber nicht bilanzieren. HAHNE & VORLOP (2001) fanden hohe N_2O - und NO -Konzentrationen im Reingas eines Biofilter unter O_2 -reduzierten Bedingungen, weshalb sie diese Gasverluste ebenfalls auf Denitrifikationsvorgänge zurückführten. Sie fanden, dass bis zu 6 % des NH_3 zu NO und bis 20 % zu N_2O abgebaut werden. Untersuchungen von CLEMENS & CUHLS (2000) an Biofiltern von mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) zeigten, dass diese Biofilter generell eine relevante Quelle von NO und N_2O darstellen. Im Mittel wurden etwa

26 % des im Biofilter abgebauten NH_3 -Stickstoffs als N_2O emittiert (Abbildung 2). In Laboruntersuchungen (TRIMBORN et al. 2003) wurden sogar noch höhere Transferraten ermittelt. Hier wurden 28 % des abgebauten $\text{NH}_3\text{-N}$ als N_2O und 10 % als NO vom Biofilter emittiert. Ungeklärt ist bislang, ob und in welchen Mengen NH_3 im Biofilter auch bis zum N_2 abgebaut wird.

Die Transferraten, mit denen der zugeführte Stickstoff zu NO und N_2O umgesetzt wird, sind im Biofilter viel höher als im Boden. Nach IPPC (2000) werden die N_2O -Emissionen aus der N-Düngung mit dem Faktor 1,25 % des eingesetzten Dünger-N berechnet. Für NH_3 , welches durch atmosphärische Deposition in Böden eingetragen wird, geben MOSIER et al. (1998) einen Transferfaktor von 1,0 % an. Auch im Bereich der Abwasserreinigung werden viel geringere Transferraten erreicht. Untersuchungen von WICHT & BEIER (1995) an kommunalen Kläranlagen ergaben, dass hier die N_2O -Emissionen im Mittel nur etwa 0,6 % des N-Eintrags im Zulauf ausmachen.

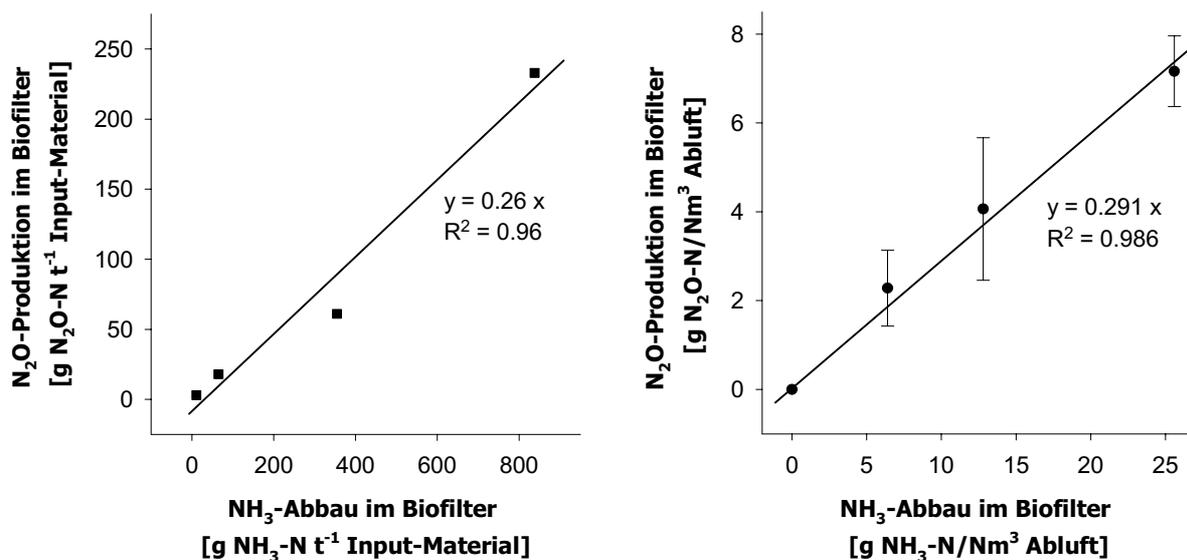


Abbildung 2: Beziehung zwischen dem NH_3 -Abbau und der Produktion von N_2O bei Biofiltern an Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlungsanlagen und im Labormaßstab (nach Clemens & Cuhls (2003) und Trimborn et al. (2003)).

1.3 Prozesse der NO- und N₂O-Bildung

Grundsätzlich können die Spurengase NO und N₂O aufgrund biotischer Prozesse (Nitrifikation, Nitrifikanten-Denitrifikation, Denitrifikation; Abbildung 3) oder durch abiotische Prozesse (Chemodenitrifikation) gebildet werden (GRANLI & BØCKMAN 1994, PAUL & CLARK 1989, NELSON & BREMNER 1970). Diese Prozesse sind als Komponenten des N-Turnovers im Boden oder bei der Abwasserreinigung intensiv untersucht worden. Eine Darstellung der entsprechenden Literatur würde daher an dieser Stelle zu weit führen.

Es gibt derzeit noch keine Hinweise, wie die Faktoren, die im Boden die Bildung von NO und N₂O fördern, im Biofilter wirken. Es ist aber anzunehmen, dass die Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften von Böden und Biofiltern sich direkt auf die Spurengas-Bildung und -Freisetzung auswirken. So wurde seit längerem vermutet, dass NO ein Intermediärprodukt der Denitrifikation ist, obwohl Untersuchungen mit ¹⁵N-Tracern (SICH 1997, WOLF & RUSSOW 2000) gezeigt haben, dass das aus dem Boden emittierende NO nur bei der Nitrifikation gebildet wird. RUSSOW et al. (2001) konnten schließlich nachweisen, dass das bei Denitrifikation gebildete NO nicht schnell genug in die Gasphase diffundieren kann und somit am Ort der Entstehung weiter zu N₂O und N₂ reduziert wird. Im Biofilter sind die Diffusionswege durch die mikrobiell aktive Zone im Gegensatz zum Boden sehr kurz. Es wäre also durchaus möglich, dass NO im Biofilter auch im Zuge der Denitrifikation freigesetzt werden kann.

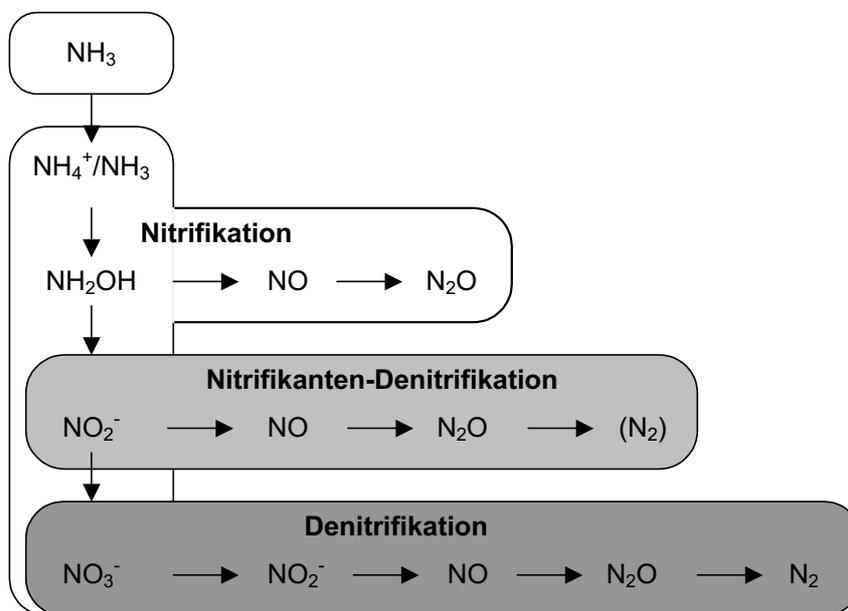


Abbildung 3: Biotische Prozesse der NO- und N₂O-Bildung im Zuge des NH₃-Abbaus.

Ausgangssubstrat der meisten abiotischen Reaktionen, die zur Bildung von NO und N₂O führen (Chemodenitrifikation), ist undissoziierte Salpetrige Säure (HNO₂), welche in Abhängigkeit vom pH-Wert im Gleichgewicht mit Nitrit (NO₂⁻) steht (VANCLEEMPUT & BAERT 1984, VANCLEEMPUT & SAMATER 1996, BREMNER 1997, YAMULKI 1997, VENTEREA & ROLSTON 2000). Im Boden spielt die Chemodenitrifikation nur eine untergeordnete Rolle, da hier in der Regel die pH-Werte zu hoch und die Nitrit-Konzentrationen zu gering sind, um nennenswerte HNO₂-Konzentrationen entstehen zu lassen. Im Biofilter kann aber, bedingt durch hohe Nitrit-Konzentrationen, auch bei höheren pH-Werten HNO₂ vorliegen und somit hier die Chemodenitrifikation von Bedeutung sein.

Ergebnisse an bestehenden Biofiltern deuten darauf hin, dass die NO- und N₂O-Bildung unabhängig vom verursachenden Prozess (biotisch oder abiotisch) durch Unterbindung der NH₃-Zufuhr mittels saurer Wäsche gestoppt werden kann (WALLMANN et al. 2001, TRIMBORN et al. 2002) bzw. durch N-Düngergaben, die für einen ausreichenden VOC-Abbau in der Rohluft notwendig sind (WECHHUYSSEN et al. 1993, MORGENROTH et al. 1996, DESHUSSES & COX 1999, JORIO et al. 2000, DELHOMENIE et al. 2002, PRADO et al. 2002), wieder induziert wird (TRIMBORN et al. 2003). Weitere Untersuchungen zum Spurengasbildungspotenzial von Biofiltern, die kein NH₃ im zu reinigenden Rohgas aufweisen, dafür aber zur Förderung des VOC-Abbaus mit Stickstoff gedüngt werden, stehen bisher noch aus.

2 Fragestellung, Zielsetzung und Durchführung

Aus diesen Ergebnissen bisheriger Untersuchungen an Biofilter so wie dem Kenntnisstand zu den N-Umsetzungen ließen sich für den Bereich der Tierproduktion folgende Fragestellungen ableiten:

- Werden in den Abluftreinigungsanlagen im Bereich der Tierproduktion ebenfalls klimarelevante Spurengase gebildet?
- In welcher Größenordnung findet diese Bildung statt?
- Gibt es Unterschiede bei den verschiedenen, in der Tierproduktion eingesetzten Abluftreinigungs-Systemen?
- Worauf lassen sich Unterschiede gegebenenfalls zurückführen?
- Lässt sich die Spurengasbildung durch gezielte Maßnahmen reduzieren?

Diese Fragenstellungen sollten mit den hier berichteten Freiland- und Laboruntersuchungen beantwortet werden. Während der Arbeiten wurde enger Kontakt gepflegt zu Forschungseinrichtungen und Wissenschaftler die sich ebenfalls mit dem Thema Abluftreinigung in der Tierhaltung beschäftigen. Hierzu gehört vor allem der Kontakt zu der KTBL-Arbeitsgruppe „Stand der Verfahrenstechnik und Kosten der Abluftreinigung in der Nutztierhaltung“ sowie zur DLG-Expertenkommission „Abluftreinigung“, welche beteiligt war an der Entwicklung des DLG-Prüfrahmen „Abluftreinigungssysteme für Tierhaltungsanlagen“ und welche die DLG bei der Prüfung von Abluftreinigungssystemen im Rahmen eines DLG-Signum-Tests unterstützt.

Ebenfalls wurde versucht mit den Herstellern der verschiedenen Abluftreinigungssysteme Kontakte zu pflegen. Zum Teil waren die Hersteller jedoch nicht an einer Zusammenarbeit interessiert oder sie lehnten diese sogar ab.

3 Material und Methoden

3.1 Freiland Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden an verschiedenen Abluftreinigungssystemen durchgeführt. Es standen drei verschiedene Biofiltertypen, ein Rieselbettreaktor (Biowäscher) sowie ein zwei-stufiges und ein drei-stufiges Kombinationssystem zur Verfügung. Da leider kein Abluftreinigungssystem zu finden war, das über längere Zeit (über die Zulassungsperiode hinausgehend) mit Säure betrieben wurde, musste auf Messungen an Säurewäschern unter Praxisbedingungen im Rahmen dieser Studie verzichtet werden. Hier können nur die Ergebnisse einer Messung aufgeführt werden, die im Rahmen eines Zulassungsverfahrens ermittelt wurden.

3.1.1 Untersuchte Anlagen

Typ 1: (Flächen-)Biofilter mit Holzhackschnitzel

Dieser Filtertyp wurde als Flächenbiofilter konzipiert (Baujahr 1994). Die 1,2 m hohe Einfassung des Filters bestand aus zwei Schichten Leitplanken, deren Zwischenraum mit Erde verfüllt war. Das Filtermaterial lag 60 cm über dem Boden auf einer Baustahlmatte welche von Holzpaletten getragen wurde. Den unteren Teil des Filters bildete eine etwa 60 cm dicke Schicht gewebeartig verlegter Buchenschwartenbrettern. Darüber folgte eine ca. 25 cm starke Schicht aus Weichholzhäcksel (Weide). Im November 2001 erfolgte erstmalig eine Nachschüttung von 15 cm Holzhäcksel. Der Filter wurde mit Wasser aus einem eigenen Brunnen stündlich bewässert. Es wurde eine Bewässerungsmenge von etwa $10 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ gemessen. Bei nasser Witterung wurde die Bewässerung zeitweise abgestellt. Sickerwasser fiel nicht an, auf dem Boden des Filters sammelte sich der bereits verrottete Teil der Weichholzhäcksel.

Die Abluft stammte aus einem Stall mit 185 nieder- bis hochtragenden Sauen und einem Flatdeckbereich mit etwa 700 Aufzuchtferkel. Zum Zeitpunkt der Messungen war der Stall voll belegt (76,5 GV). Die Sauen sowie die Ferkel werden in Gruppen gehalten. Der Boden des Stallbereichs bestand zu 50 % aus fester Fläche und zu 50 % aus Spalten. Die Gülle wurde unter dem Stall gelagert. Die Frischluft wurde unter dem First angesaugt und die Abluft wurde zentral durch vier Ventilatoren zunächst in eine Druckkammer und von dort unter den Biofilter geführt. Die Ventilatoren hatten eine Gesamtleistung von maximal $68000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Im Winter wurde die Leistung zeitweise auf 30 % der Maximalleistung heruntergeregelt, während der Messungen liefen die Ventilatoren auf Vollast.

Typ 2: (Flächen-)Biofilter mit Strohschüttung

Der Flächenbiofilter wurde 2002 in Betrieb genommen. Der Filter wurde von einer 1,5 m hohen Mauer eingefasst, den Boden des Filters bildeten zwei Baustahlmatten. Das Filtersubstrat bestand aus einer ca. 50 cm dicken Schicht Strohhäcksel mit einer etwa 2 cm dicken Holzhackschnitzelaufgabe. Das Filtermaterial wurde zuletzt im Oktober 2003 ausgetauscht. Die Rohluft wurde durch zwei Schächte unter den Biofilter geleitet. In diesen Zuluftschächten befanden sich jeweils eine Hochdruck-Sprühanlage mit der das Rohgas über einen feinen Nebel befeuchtet wurde. Hiermit wurde auch das Filtermaterial feucht gehalten. Die Sprühbefeuchtung wurde manuell geregelt und orientierte sich nach der Feuchte des Filtermaterials. Das im Filter anfallende Sickerwasser wurde in die Güllegrube geleitet. Die Rohgasbeprobung erfolgte vor der Befeuchtungseinrichtung.

Die Abluft stammte aus einem Sauenstall mit maximal 192 Plätzen (57,6 GV). Während der Messungen war der Stall nahezu voll belegt (185 bzw. 190 tragende Sauen). Die Tiere wurden in mehreren Abteilen in Gruppen gehalten. Der Boden dieser Abteile bestand zur Hälfte aus Betonspalten. Die Gülle wurde unter dem Stall gelagert. Frischluft wurde über den Dachraum des Stalls zugeführt, die Abluft wurde durch zwei Wandventilatoren aus dem Stall abgeführt. Die maximale Leistung der Ventilatoren betrug jeweils $23000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Im ersten Messzeitraum (23.-30.03.04) liefen die Ventilatoren mit 30 % der maximalen Leistung, was der üblichen Lüfrate im Winter entsprach. Im zweiten Messzeitraum (08.-15.09.04) liefen die Ventilatoren mit der maximalen Leistung (Sommerlüfrate).

Typ 3: (Flächen-)Biofilter mit Wurzelholz

Dieser Filtertyp war auf dem untersuchten Schweinezuchtbetrieb in dreifache Ausführung baugleich aber mit unterschiedlichem Alter vorhanden. Alle drei Filter hatten eine Betoneinfassung und einen Betonspaltenboden. Sie waren mit grobgerissenem Wurzelholz auf eine Schütthöhe von ca. 1,2 m gefüllt. Die Befeuchtung des Filtermaterials erfolgte von oben über eine periodische Beregnung mit Sprühdüsen.

Der älteste Filter (Typ 3a) wurde Ende 2000 mit dem Neubau eines Sauenstalls installiert. Dieser Stall hatte maximal 720 Stellplätze und war während der Messungen voll besetzt (216 GV). Es handelte sich um eine Kastenstand-Haltung auf Teilspalten mit 70 % Spaltenanteil. Das Güllelager befand sich unter dem Stall. Die Zuluftführung erfolgte über eine Schlitzdecke im Dachraum. Die Abluft wurde unterflur von acht Ventilatoren abgesaugt und dem Biofilter über Schächte von unten zugeführt. Die maximale Leistung je Ventilator betrug $20.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Das ergab eine maximale Sommerlüfrate von $160.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Messzeitraum: 18.-25.08.04). Im Winter waren die Ventilatoren abwechselnd geschaltet, so dass sich eine

Winterluftrate von 20-30 % der Sommerluftrate ergab, also ca. $40.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Messzeitraum: 05.-11.03.04).

Der zweitälteste Filter (Typ 3b) wurde im Frühjahr 2003 ebenfalls an einem Sauenstall gebaut (500 Plätze; 150 GV). Allerdings befand sich hier der Biofilter nicht an der Längsseite des Stalls, sondern an der Stirnseite. Der jüngste Filter (Typ 3c) wurde im Sommer 2004 an der Längsseite eines Abferkelstalls gebaut. Dieser Stall besaß 256 Abferkelbuchten (115 GV) verteilt auf 8 Abteile, die separat über Ventilatoren mit einer maximalen Leistung von je $8.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ unterflur entlüftet wurden.

Typ 4: Rieselbettreaktor

Es wurden zwei Rieselbettreaktoren (Biowäscher, lt. Hersteller) beprobt. Der erste (Typ 4a; Messung im Februar 2004) wurde 2002 auf dem Dach eines Ferkelaufzuchtstalles gebaut. Die aus dem Stall abgesaugte Rohluft wurde dem 4,5 m hohen Wäscherturm von unten durch einen zentralen Abluftkanal zugeführt. Im Wäscherturm befand sich als Reinigungseinheit ein Füllkörperbett aus Kunststoff (Höhe 1,80 m, Fläche $2,88 \text{ m}^2$). Der Füllkörper diente als Trägermaterial für die Mikroorganismen. Die Berieselung des Füllkörpers mit Wasser erfolgte durch Düsen von oben. Insgesamt wurden ständig 2 m^3 Wasser im Kreislauf geführt, wovon täglich 250 l abgepumpt und in die Güllegrube geleitet wurden. Der Wäscher lief normalerweise im Intervallbetrieb (5 Minuten/15 Minuten), wurde jedoch während der Messungen auf Dauerbetrieb umgestellt.

Der Flatdeck-Stall war in 4 Abteile eingeteilt und umfasste 600 Plätze (etwa 18 GV). Zum Messzeitraum waren 530 Tieren aufgestellt (etwa 16 GV). Das Haltungsverfahren entsprach der Rein-Raus-Methode, mit etwa 7,5 Durchgänge pro Jahr. Die Güllelagerung erfolgt unter dem Stallboden. Die Gülle wurde nach jedem Durchgang in ein größeres Güllelager abgepumpt. Die Zuluftführung erfolgte durch eine Türganglüftung, die Abluft wurde durch zwei Ventilatoren aus dem Stall abgesaugt und dem Reinigungssystem zugeführt. Die maximale Ventilatorleistung betrug $20.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, zur Messung wurde die Abluftabsaugung mit etwa 30 % dieser Sommerluftrate betrieben.

Der zweite Rieselbettreaktor (Typ 4b) wurde im Frühjahr 2004 auf dem Dach eines Maststalles mit 550 Plätzen gebaut. Zum Zeitpunkt der Messung im Juli 2004, waren hier 530 Tiere mit einem Alter von 120-130 Tagen aufgestellt (etwa 70 GV). Die maximale Lüfterleistung betrug $52.500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Während der Messung betrug die Lüfterleistung 76 %, d.h. rund $40.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Die Füllmenge des Wäschers betrug hier $6,4 \text{ m}^3$ Wasser.

Typ 5: 2-stufige Kombinationsanlage

Das Reinigungssystem war seit November 2001 an einem Maststall in Betrieb. Es bestand aus zwei hintereinander stehenden, von oben mit Wasser berieselten Tropfkörper-Wänden aus imprägnierten Celluloselamellen und einer Biofilterwand aus gestapelten, mit Wurzelholz gefüllten Kunststoffkörben. Das für die Berieselung notwendige Wasser befand sich in zwei getrennten Becken mit 9 m³ und 3 m³ Inhalt. Das Wasser wurde zweimal im Mastdurchgang gewechselt, d.h. im Schnitt alle zwei Monate. Das abgepumpte Wasser wurde in die Güllegrube geleitet. Der Maststall war zum Zeitpunkt der Messung mit 600 Tieren (96 GV) voll besetzt. Der Boden der Abteile bestand zu 60 % aus Vollspalten und zu 40 % aus sogenannten Ökospalten, deren Spaltenanteil 5 % betrug. Das Güllelager des Stalls befand sich 1,20 m unter dem Stallboden. Nach jedem Mastdurchgang (120-130 Tage, Rein-Raus-Methode) wurde die Gülle in ein größeres Güllelager abgepumpt. Frischluft wurde über die Traufe zugeführt. Die Abluftführung erfolgte zu 75 % ober- und zu 25 % unterflur durch vier Ventilatoren mit einer maximalen Gesamtleistung (Sommerlüftrate) von 66.000 m³ h⁻¹. Zum Zeitpunkt der Messung (25.11.-02.12.03) liefen die Ventilatoren mit 25 % der maximalen Leistung.

Typ 6: 3-stufige Kombinationsanlage

Dieser Filtertyp war eine Kombination aus einem physikalischen Wäscher, einem chemischen Wäscher und einem Biofilter. Die erste Filterwand bildete eine von oben mit Wasser berieselte Tropfkörper-Wand aus imprägnierten Celluloselamellen. Sie wurde zusätzlich in kurzen Zeitabständen von vorne mit Wasser besprüht und diente in erster Linie der Staubabscheidung. Die zweite Filterwand wurde mit Säure (verdünnte H₂SO₄, pH 4) berieselt und diente der NH₃-Abscheidung. Die dritte Reinigungsstufe bildete eine ca. 60 cm starke Biofilterwand aus Wurzelholz. Der Filter stand an einem Sauenstall, der mit 400 Tieren zum Zeitpunkt der Messung voll besetzt war (120 GV). Die maximale Lüftungsrate betrug 60.000 m³ h⁻¹. Zur Zeit der Messung (Januar 2005) lief die Lüftung auf 25 % (15.000 m³ h⁻¹).

3.1.2 Probenahme und Analytik

Roh- und Reingas-Beprobung

Innerhalb der einwöchigen Messzeiträume wurden an den Filtersystemen jeweils im Roh- und im Reingas die Komponenten NH₃, N₂O, NO, CO₂, CH₄, und VOC kontinuierlich bestimmt. Hierzu wurde ein Probenahmesystem (Abbildung 4) entwickelt, das die unterschiedlichen Ansprüche bei der Analytik der verschiedenen Gaskomponenten berücksichtigt (Gasfluss,

Gasmenge, -feuchtigkeit, -temperatur, -reinheit), flexibel an die Gegebenheiten vor Ort angepasst werden kann und zuverlässig mehrere Tage ohne Kontrollen selbständig arbeitet.

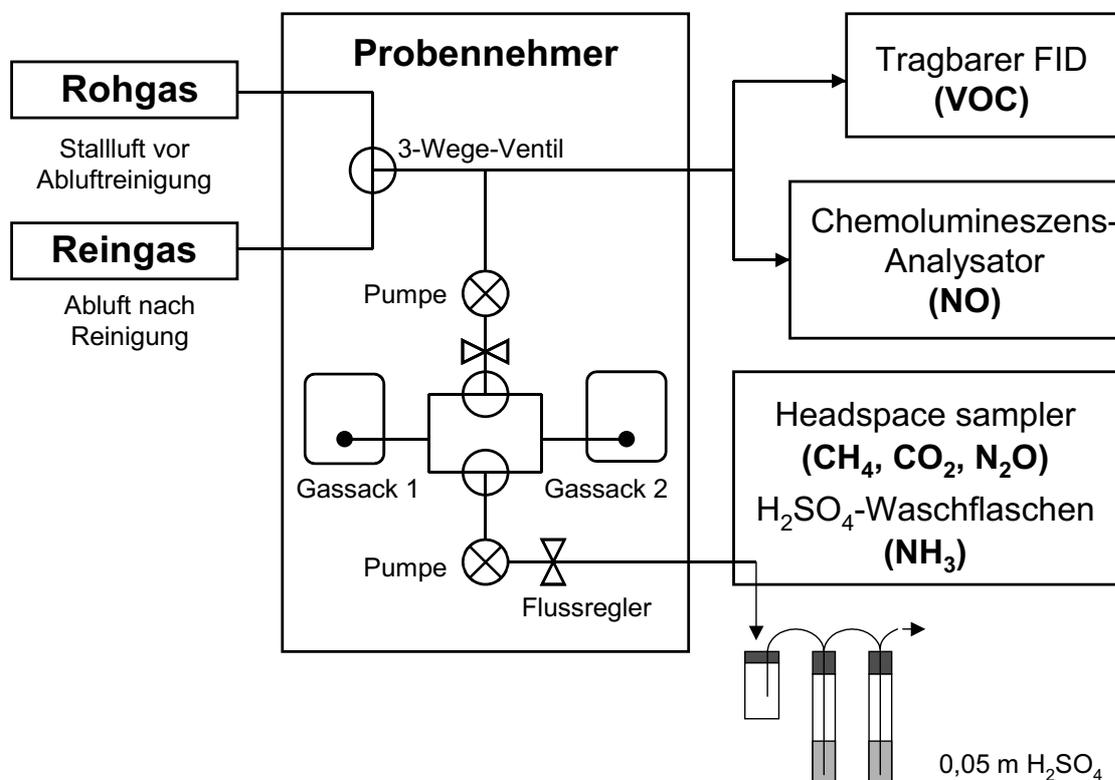


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Probenahmeinheit.

Der Probennehmer war über beheizte Gasleitungen mit den Probenahmestellen für Roh- und Reingas verbunden. Über ein 3-Wege-Ventil wurden diese beiden Probenahmestellen im 30 Minuten-Takt beprobt. Während dieser 30 Minuten wurde über ein System aus Pumpen, Flussreglern und Ventilen ein Gassack (10 l Tecobag, Fa. Tesseraux Spezialverpackungen, Bürstadt) mit einer Gasprobe befüllt. Während der nächsten 30 Minuten wurde der zweite Sack mit Gas der zweiten Probenahmestelle gefüllt, während der erste Sack wieder entleert und ein Aliquot (3,4 l) des Inhalts über ein Headspace-Sampler (XL 222, Fa. Gilson, Middleton, USA) in ein Headspace Vial und Waschflaschensystem (gefüllt mit 10 ml 0,05 M H₂SO₄) überführt wurde. Die Schwefelsäure in den zwei hintereinandergeschalteten Waschflaschen (Volumen: 12 ml) fängt das NH₃ in der Gasprobe quantitativ unter Bildung von Ammoniumsulfat auf. Der NH₄-Gehalt der Waschlösungen wurde im Labor colorimetrisch bestimmt (Autoanalyser 3, Fa. Bran & Lübbe, Norderstedt). Die Gasproben in den Headspacevials (Volumen: 20 ml) wurden im Labor gaschromatographisch auf den N₂O-, CH₄- und CO₂-Gehalt analysiert (GC-FID/ECD, 8610 C, SRI Instruments, Torrance, USA).

Über einen tragbaren FID (3005/6, Fa. Bernath Atomic, Wennigsen) wurde kontinuierlich der **VOC-Gehalt** der Gasproben bestimmt. Da der FID selbstansaugend war, konnte er direkt hinter das Messstellen-Umschaltventil angeschlossen werden. Hier war ebenfalls ein Chemolumineszenz-Analysator (APNA-360 Fa. HORIBA Europe GmbH, Oberursel) angeschlossen, mit dem kontinuierlich die **NO_x-Gehalte** der Gasproben bestimmt wurden. Für dieses Gerät musste das Probengas aber zunächst getrocknet werden, und wurde deshalb durch mit KOH-Pellets gefüllte Waschflaschen geleitet. Der FID und der NO_x-Analysator waren beide jeweils an einen Datenlogger angeschlossen, mit dem im 20-Sekundentakt Messwerte aufgezeichnet wurden.

Der Headspace-Sampler des Probenahmesystems hatte Platz für 40 Headspacevials und Waschflaschensysteme, sodass jeweils 20 Roh- und Reingasproben während eines Messgangs gesammelt werden konnten. Während eines Messzeitraumes wurde zunächst in einem 2-tägigen Messgang alle 2 Stunden NH₃-, N₂O-, CH₄- und CO₂-Proben genommen. Daran anschließend wurden die Proben in einem zweiten 5-tägigen Messgang alle 6 Stunden genommen.

Probenahmestellen

An allen Abluftreinigungssysteme wurde das Roh- und das Reingas beprobt. Die Entnahmestelle des Rohgases befand sich in der Regel zwischen den Ventilatoren und dem Abluftreinigungssystem und zwar noch vor einer eventuellen Staubabscheidung oder Befeuchtung. Das Reingas wurde bei den Rieselbettreaktoren und Kombisystemen im Abluftstrom des Systems, d.h. im Wäscherturm bzw. hinter der Biofilterwand (innerhalb der Filtergebäudes) beprobt.

Bei den Biofiltern (Typ 1-3) wurde das Reingas mit einer Haube gemessen, die auf den Biofilter gestellt wurde. Diese Haube hatte eine Grundfläche von 1x1 m und eine Höhe von 90 cm. Den Abschluss der Haube nach oben bildeten zwei Lagen aus Polypropylen-Matten, die normalerweise als Tropfenabscheider in Biowäschern eingesetzt werden. Die Tropfenabscheider sind aus Lamellen aufgebaut, die so angeordnet sind, dass der Lufteintritt in die Haube durch Verwirbelung verhindert wurde und gleichzeitig der Anstieg des statischen Drucks unter der Haube minimal war. Das Eindringen von Umgebungsluft zwischen Haube und Biofilter wurde durch die Abdichtung mit einer Plastikfolie am unteren Ende der Haube verhindert.

Bei den Filtern, die mit einer Befeuchtung des Filtermaterials arbeiteten, (Typ 1 und 3) musste das Material unter der Haube separat bewässert werden. Hierzu wurde zunächst eine Gardena-Sprühbewässerung verwendet. Diese war durch einen Bewässerungscomputer

gesteuert, lies sich aber nur auf ein Intervall von 8 Stunden programmieren. Die Bewässerung unter der Haube war so nicht immer zeitgleich mit der Bewässerung des Biofilters gesteuert. Das in 24 Stunden unter der Haube aufgebrauchte Volumen an Bewässerungswasser entsprach jedoch dem Bewässerungsvolumen pro Quadratmeter auf dem Biofilter. Später wurde dieses System ersetzt durch ein freiprogrammierbares System (Eigenbau), bei dem sowohl die Berechnungsmenge als auch die -frequenz genau angepasst werden konnte.

Weitere Parameter

Zu Beginn und am Ende der jeweiligen Messzeiträume wurde der **Ammoniakgehalt** im Roh- und Reingas zusätzlich von Hand mit Dräger-Messröhrchen bestimmt.

Parallel zu den Gasmessungen wurden an jeder Anlage **die Temperatur und Luftfeuchte** im Roh- und Reingas sowie der Umgebungsluft mit Datenloggern (TGP-1515, Gemini Data Loggers) im 5-Minutentakt aufgezeichnet.

Sofern möglich, wurde an den Anlagen das **Sicker- bzw. Wäscherwassers** beprobt. Untersucht wurden der pH-Wert, der Gesamt-N-Gehalt, sowie die Gehalte an Nitrat (NO_3^-), Nitrit (NO_2^-) und Ammonium (NH_4^+). Die Analysen erfolgten mit dem Autoanalyser (s.o.), mittels Dampfdestillation (Vapodest, Fa. Gerhardt, Königswinter) und mit Küvettenschnelltests (WTW und Merck).

3.1.3 Datenauswertung

Die Messwerte des **FID** und des **NOx-Analysators** wurden im 20-Sekundentakt aufgezeichnet. Somit kamen während eines Messzeitraums von Woche rund 30.000 Einzelwerte für diese beiden Parameter zusammen, die anschließend für die Datenauswertung zusammengefasst werden mussten (Abbildung 5). Dabei war zu berücksichtigen, dass die Messwerte im 30-Minutentakt jeweils die Roh- und die Reingaskonzentrationen wiedergeben. Von den 90 Messwerten innerhalb eines jeden 30-Minutenintervalls wurde 60 Messwerte beim FID und 40 Messwerte beim NOx-Analysators zu einem sog. Halbstunden-Mittelwert zusammengefasst. Dabei wurde berücksichtigt, dass es innerhalb des Probenahmesystems und des Analyengerätes bei der Umschaltung von einer zur anderen Messstelle zu Verschleppungen kommt (diese waren beim NOx-Analysators größer als beim FID).

Während eines Messzeitraums wurden die NH_3 -, N_2O -, CH_4 - und CO_2 -Proben zunächst in einem 2-tägigen Messgang alle 2 Stunden genommen, in einem zweiten 5-tägigen Messgang wurden diese Proben dann alle 6 Stunden genommen. Um diese 2- bzw. 6-Stunden-Werte mit den VOC- und NO-Messungen vergleichbar zu machen, wurden die Halbstunden-Mittelwerte des **FID** und des **NOx-Analysators** nochmals zu jeweils 20 2- bzw. 6-Stunden-Mittelwerten zusammengefasst. Insgesamt wurden so rund 30.000 Einzelwerte zu 40 Rohgas- und 40 Reingasmittelwerten zusammengefasst. Diese Mittelwerte sowie die Einzelwerte für NH_3 -, N_2O -, CH_4 - und CO_2 -Proben sind für die jeweiligen Messtermine im Anhang (Tabelle A1-A12) zusammengestellt.

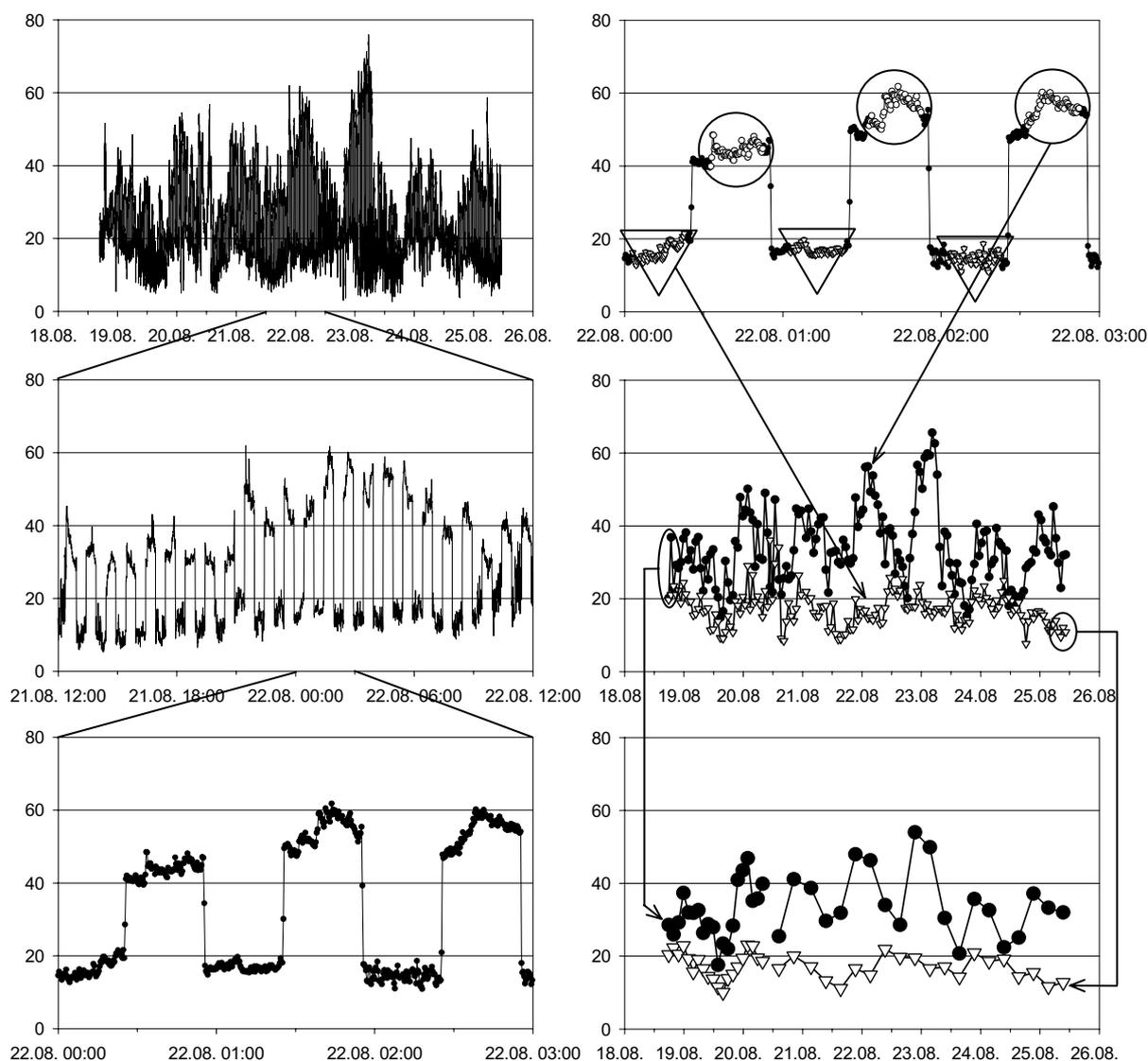


Abbildung 5: Vorgehensweise bei der Auswertung der aufgezeichneten VOC- und NOx-Messwerte. Hier dargestellt am Beispiel der VOC-Messung am Biofilter Typ 3a (VOC-Konzentrationen in ppm). Von den 29.240 Einzelwerten (links) werden jeweils 40 zu Halbstunden-Mittelwerten zusammengefasst (rechts oben, Mitte). Daraus werden 2- bzw. 6-Stunden-Werte gebildet (rechts Mitte, unten).

3.2 Laborversuch zu N₂O-Emissionen aus Gülle nach Einleitung von Wäscher- und Biofiltersickerwasser

In einem Laborversuch wurde die Emission von N₂O aus der Gülle nach Einleiten von Wasch- oder Sickerwasser untersucht. Dazu wurden zu 200 ml Schweinegülle unterschiedliche Mengen an Wasch- bzw. Sickerwasser gegeben. Tabelle 2 zeigt die verschiedenen Varianten, die jeweils viermal wiederholt wurden. Die Gülle (200 ml) wurde in Schraubgläser (500 ml) gefüllt und nach 24-stündiger Vorinkubation verschlossen. Durch ein Septum im geschlossenen Deckel erfolgte die Zugabe des Wasch- bzw. Sickerwassers mit Hilfe einer Spritze entsprechend den in Tabelle 2 genannten Mengen. Die Gasprobennahme erfolgte eine halbe Stunde nach Verschließen mit evakuierten in 20 ml Headspace-Vials. Danach wurden die Gläser wieder geöffnet. Weitere Gasproben wurden, nach 1, 2, 3, 5, 6, 15, 18, 24, 39, 48, 63, 72, 87 und 111 Stunden genommen. Die Analytik der Gasproben erfolgte wie in Kap. 3.1.2 beschrieben.

Tabelle 2: Übersicht der Versuchsansätze im Laborversuch zur Ermittlung der Spurengasemissionen nach Einleitung von Wasch- bzw. Sickerwasser in Gülle (nach FREY 2004, verändert).

Variante	Art des Wasch- bzw. Sickerwassers	Filter -Typ	N-Gehalt [mg/l]	NO ₂ -Gehalt [mg/l]	Menge an zugegebenem Wasch-/ Sickerwasser [ml/l Gülle]
0	Unbehandelte Schweinegülle	-	-	-	0
1	Waschwasser/ Biowäscher	4a	0,37	0,11	250
2	Waschwasser/ Biowäscher	4a	"	"	50
3	Waschwasser/ Biowäscher	4a	"	"	5
4	Sickerwasser/ Biofilter	3a	16,98	13,6	50
5	Sickerwasser Biofilter	3a	"	"	5
6	Waschwasser/ Kombiwäscher	5	37,70	36,1	5

3.3 Laboruntersuchungen zur Spurengasbildung und Abbauleistung von Biofiltern unter Berücksichtigung der Temperatur und anderer Einflussfaktoren

Der Kenntnisstand über die Spurengasbildung und Abbauleistung von Biofiltern in Abhängigkeit von betrieblichen Einflussfaktoren ist derzeit unzureichend. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss ausgewählter Betriebsfaktoren auf die Prozesse im Biofilter unter kontrollierten Bedingungen untersucht. Das Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf die Betriebstemperatur. Unter anderem sollte dies Hinweise auf den Einfluss unterschiedlicher Temperaturen während der Winter- und Sommermonate geben. Des Weiteren sollte der Einfluss des Filtermaterials untersucht werden.

3.3.1 Aufbau der Biofilteranlage

Voraussetzung für die Untersuchungen unter standardisierten Bedingungen war eine Biofilteranlage im Labormaßstab bei der folgende Punkte beachtet wurden:

- praxisnaher Filteraufbau
- freie Variierbarkeit der zu untersuchenden Einfluss- bzw. Betriebsfaktoren (Temperatur, Filtermaterial)
- Konstanz aller übrigen Betriebsbedingungen

Die Laborbiofilteranlage bestand aus 16 Einzelfiltern, die mit vier unterschiedlichen Temperaturen (20-50 °C) und zwei Filtermaterialien betrieben wurden. Der Aufbau, die Abmessungen und technischen Betriebsdaten der Filteranlage und des Filtermaterials sind Abbildung 6 und Abbildung 7 sowie Tabelle 3 und Tabelle 4 zu entnehmen.

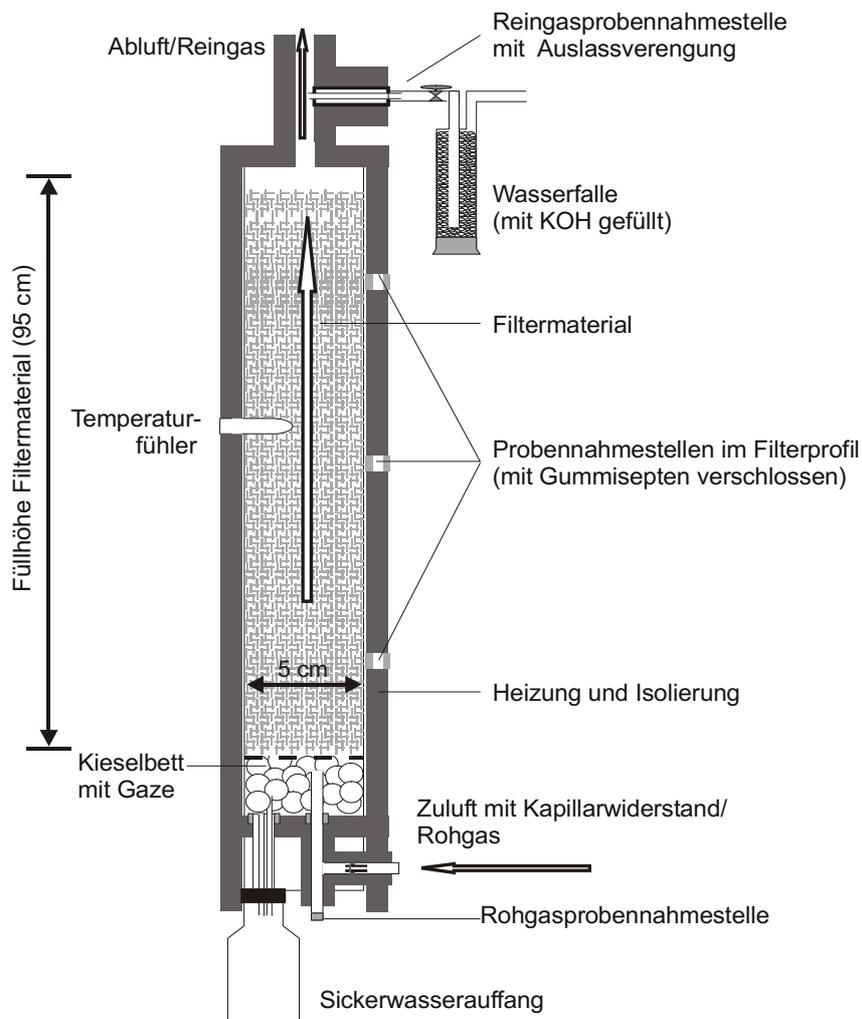


Abbildung 6: Einzelner Laborbiofilter mit Probenahmestellen in gestauchter Darstellung (nach THIERFELDT 2005, verändert).

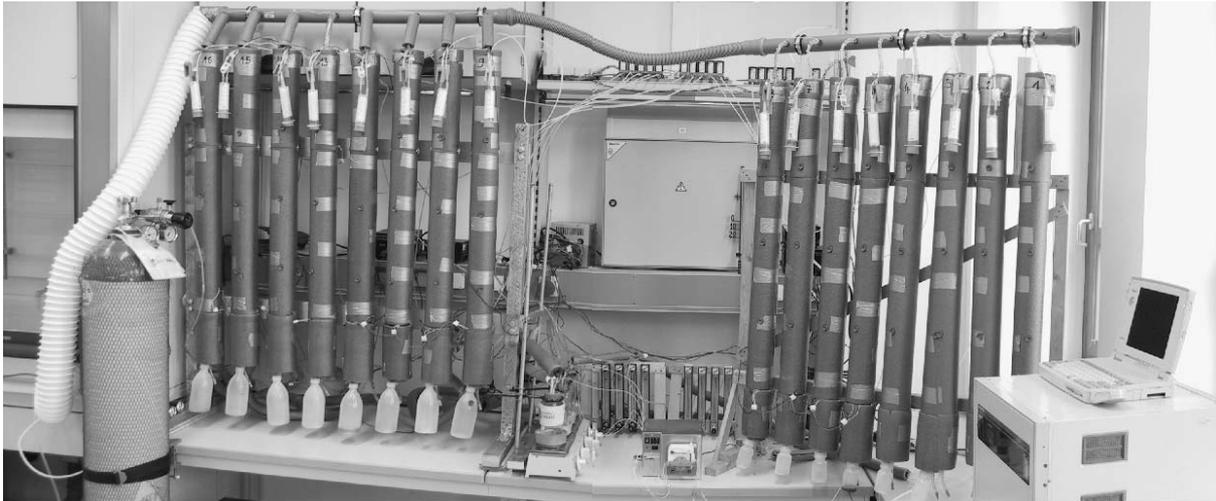


Abbildung 7: Labor-Biofilteranlage mit 16 Filtersäulen und Rohgaskonditionierung.

Tabelle 3: Abmessungen und technische Betriebsdaten der Laboranlage.

Abmessungen und Betriebsdaten	
Höhe Filterkörper [cm]	100
Füllhöhe Material [cm]	95
Durchmesser Filterkörper [cm]	5
Filtervolumen [l]	1,96
Füllvolumen Material [l]	1,87
Filtervolumenbelastung [$\text{m}^3/\text{m}^3\cdot\text{h}$]	75
Filtervolumenbelastung [l/Filter \cdot h]	150
Volumenstrom [l/h]	147
EBRT [s]	48

Tabelle 4: Eigenschaften der Trägermaterialien (bestimmt zum Zeitpunkt der Filterbefüllung).

	Trägermaterialien	
	Miscanthus	Holz
Trockenmasse-Gehalt [%]	82	33
Schüttdichte [g/cm^3]	0,37	0,48
Größenfraktion [cm]	0,5-1	1-2
Mittleres Porenvolumen [%]	58	73
TBRT [s]	29	36
Wasserhaltekapazität [$\text{g H}_2\text{O}/\text{g TM}$]	2,82	3,15

3.3.2 Rohgaskonditionierung

Die Laborbiofilteranlage wurden mit einer Volumenbelastung von $75 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ bzw. 150 l pro Filter und Stunde betrieben. Das synthetische Rohgas hatte eine rel. Luftfeucht von 100 %, einen NH_3 -Gehalt von 40 ppm und einen VOC-Gehalt von 100 ppm (Propan-Äquivalenten) (siehe Tabelle 5). Die Luftfeuchte musste der jeweiligen Ziel-Temperatur angepasst werden, was über die Konditionierung und Dosierung der VOC-Lösung erfolgte (Tabelle 6).

Tabelle 5: Zieleigenschaften des synthetischen Rohgases und Komponenten zu dessen Herstellung.

	Einheit	Ziel/Konzentration
Temperatur	[°C]	19, 23, 29, 43, 53
Relative Luftfeuchte	[%]	100
NH_3 -Konzentration	[ppm]	40
VOC-Konzentration	[ppm _{päq.}] ¹⁾	100
Komponenten:		
Ethanol	[% C] ²⁾	40
Iso-Propanol	[% C]	25
Aceton	[% C]	25
Ethylacetat	[% C]	10

1) päq. = propanäquivalent: bezogen auf die C-Menge von 100 ppm Propan.

2) % C: Zusammensetzung des VOC, bezogen auf den C-Anteil der Komponenten.

Tabelle 6: VOC-Lösungsbedarf der Temperaturvarianten je Tag zur Erzielung einer rel. Luftfeuchte von 100 % im Rohgas.

Temperaturvariante	VOC-Lösungsbedarf [l/Tag]
19°C	0,21
23°C	0,33
29°C	0,39
43°C	0,82
53°C	1,31

Die Abbildung 8 zeigt schematisch die Herstellung des Rohgases für eine Temperaturvariante. Die VOC-Lösung wurde über eine Schlauchpumpe (Schlauchquerschnitt und Pumpendrehzahl bestimmten die Fördermenge) in einen Verdampfer geleitet, erhitzt und mit der vorgegebenen Druckluftmenge gemischt. Anschließend wurde über einen Flussregler NH_3 zudosiert. Dann wurde das Rohgas über beheizte Rohrleitungen auf die vier Filterrohre der jeweiligen Temperaturvariante verteilt.

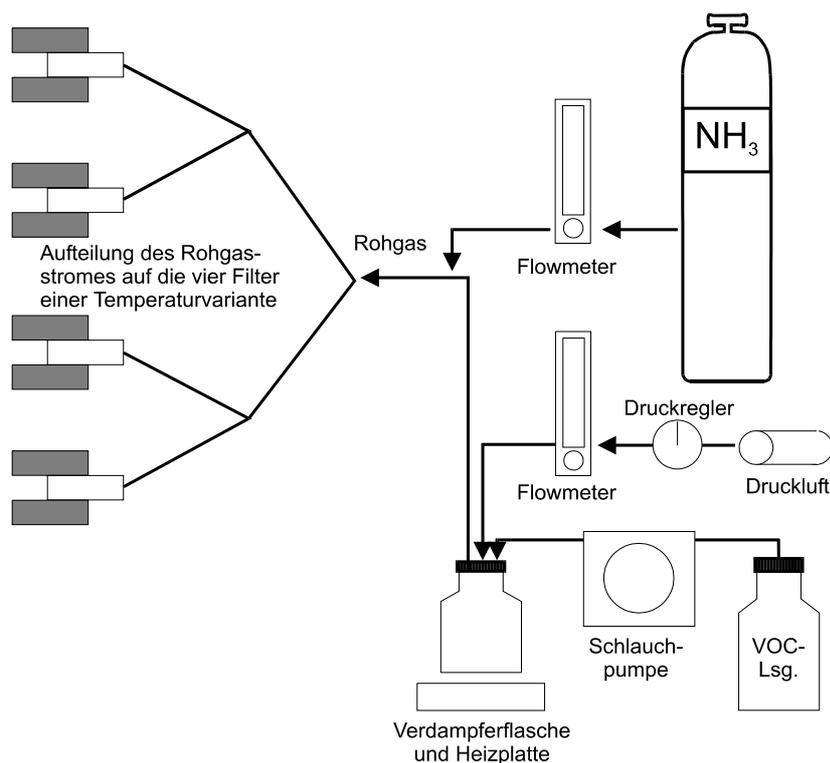


Abbildung 8: Prozess der Rohgaskonditionierung; dargestellt für eine Temperaturvariante (nach THIERFELDT 2005).

3.3.3 Probennahme und Analytik

Die Beprobung der Filtersäulen erfolgte ausschließlich roh- und reingasseitig. Auf die geplante Beprobung des Profils musste aus arbeitstechnischen Gründen verzichtet werden.

N₂O-, **CH₄**- und **CO₂**-Proben wurden per Hand mittels 20 ml Headspace-Vials genommen. Die Analyse der Gase erfolgte anschließend gaschromatographisch (siehe Kap. 3.1.2).

Die **NH₃**-Probennahme erfolgte über eine automatische Ventilsteuerung. Die Analyse erfolgte kontinuierlich nach dem Chemolumineszenzverfahren durch einen Stickoxid-Analysator (HORIBA APNA-360) mit einem vorgeschalteten NH₃-Konverter (HORIBA NH₃-Converter, Typ: Cu-1/Cu-2).

Die **NO**-Probennahme wurde an die NH₃-Beprobung gekoppelt. Die Analyse erfolgte, wie bei NH₃, nach dem Chemolumineszenzverfahren durch einen modellgleichen, parallel betriebenen Stickoxid-Analysator (HORIBA APNA-360).

Die **VOC**-Probennahme erfolgte von Hand unmittelbar aus dem Roh- und Reingas mit Hilfe eines Heizschlauchs. Später wurde die VOC-Probennahmen durch die Koppelung an die NH₃-Probennahme automatisiert. Die Analyse der VOC-Konzentrationen erfolgte durch Gesamtkohlenstoffanalysatoren (BERNATH ATOMIC) (vergl. Kap. 3.1.2).

3.3.4 Bestimmung des NH_4 -Sorptionsvermögens des Biofiltermaterials

Die im Laborversuch verwendeten Filtermaterialien zeigten eine unterschiedliche Dynamik bezüglich der NH_3 -Reinigungsleistung. Es wurde deshalb vermutet, dass die beiden Trägermaterialien Holz und *Miscanthus*-Stroh ein unterschiedliches NH_4 -Sorptionsvermögen aufweisen. Dies sollte in einem Sorptionstest überprüft werden.

Zur Bestimmung der **maximalen (potentiellen) Adsorptionskapazität (AK_{pot})** wurde eine definierte Menge der lufttrockenen Trägermaterialien (Holz: 20 g, *Miscanthus*: 10 g) in 1 l-Schüttelflaschen eingewogen. Am Material gebundene N-Verbindungen wurden durch Zugabe von 300 ml einer 0,05 M K_2SO_4 -Lösung und 24-stündige Behandlung im Überkopfschüttler desorbiert. Anschließend wurde die Lösung abdekantiert und das Material zweimal für je 30 Minuten mit destilliertem Wasser nachgeschüttelt. Daraufhin wurden 300 ml einer $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ -Lösung von fünffacher Konzentration der geschätzten maximalen AK zum Filtermaterial gegeben. Nach weiteren 24 Stunden auf dem Überkopfschüttler wurde die adsorbierten NH_4^+ -Ionen durch 0,05 M K_2SO_4 wiederum desorbiert und anschließend quantifiziert.

Die **aktuelle (effektive) Adsorptionskapazität (AK_{eff})** stellt die Sorptionskapazität des Trägermaterials zum Zeitpunkt der Befüllung dar. Hierbei wird berücksichtigt, dass an der Oberfläche der Trägermaterialien vorhandene Bindungsplätze möglicherweise schon belegt sind. Bei der Bestimmung der AK_{eff} wurde deshalb auf eine Vorbehandlung mit K_2SO_4 verzichtet.

4 Ergebnisse

4.1 Messungen an Abluftreinigungsanlagen an Ställen

Die Ergebnisse werden im Folgenden exemplarisch für einen Flächenbiofilter mit Wurzelholz-Füllung (Filtertyp 3a) grafisch dargestellt. Für die anderen Filtersysteme und Messtermine sind die Daten tabellarisch im Anhang aufgeführt. Hier im Ergebnisteil wird nur auf die mittleren Abbauleistungen bzw. Spurengasbildungsraten der Filtertypen eingegangen.

4.1.1 VOC-Messung

Bei den VOC-Konzentrationen im Roh- und Reingas fallen die enormen Schwankungen der Konzentrationen auf (Abbildung 9). Diese sind vor allem bedingt durch schwankende Lüftungsraten. Reduzierte Lüftungsraten führen zu erhöhten Konzentrationen, weshalb man einen deutlichen Tag-/Nacht-Rhythmus erkennen kann. Weitere Einflussfaktoren sind darüber hinaus die Temperatur im Stall, sowie die Aktivität der Tiere. Man erkennt einen deutlichen Abbau der VOC im Biofilter. Dieser ist jedoch nicht vollständig, da ein erheblicher Anteil der VOC aus Methan besteht, welches im Biofilter nicht abgebaut wird.

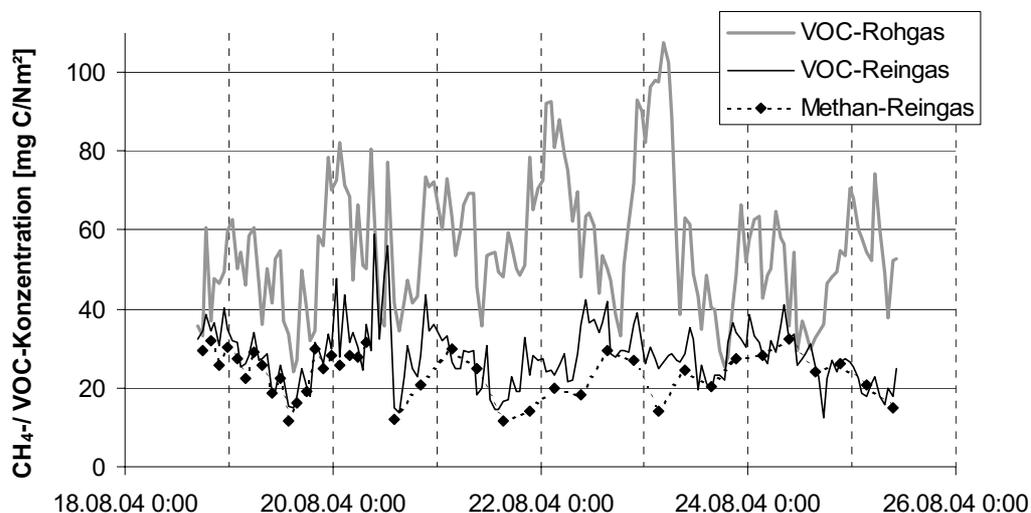


Abbildung 9: VOC-Konzentrationen im Rohgas sowie VOC- und CH₄-Konzentrationen im Reingas eines Biofilters mit Wurzelholzschüttung innerhalb eines einwöchigen Messzeitraumes.

Zur Beschreibung des Geruchabbaus in Biofiltern kann der Parameter NMVOC verwendet werden, da mit Ausnahme von NH₃ und H₂S alle wesentlichen Geruchsstoffe dieser Stoffklasse angehören. NMVOC wird definiert, als die flüchtigen C-Verbindungen ohne Methan (VOC minus CH₄). Da im vorliegenden Beispiel die VOC im Reingas im wesentlichen nur

noch aus Methan bestehen werden also die NMVOC und somit die Geruchskomponenten im Biofilter weitgehend abgebaut.

In Tabelle 7 sind die NMVOC-Abbauraten der untersuchten Abluftreinigungssysteme zusammengefasst dargestellt. Man erkennt, dass bezüglich des NMVOC-Abbaus die Biofilter den anderen Systemen zum Teil deutlich überlegen sind. Die untersuchten Biofilter erreichen NMVOC-Abbauraten zwischen 51 und 94 % (abgesehen von dem Filter, dessen Befeuchtung während der Messung ausgefallen ist). Bei den Wäscher und Kombi-Systemen wurden nur Abbauraten zwischen 0 und 50 % gemessen.

Tabelle 7: Methan und NMVOC-Konzentrationen in der Stallabluft vor (Rohgas) und nach (Reingas) den untersuchten Abluftreinigungssystemen (in mg C /Nm³) sowie deren NMVOC-Abbauleistung (in % der Rohgaskonzentration).

Filtertyp	Messung	CH ₄	CH ₄	NMVOC	NMVOC	NMVOC-
		Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Abbau
1 Biofilter/Holzhack	April	35,0	37,9	22,2	10,8	51 %
1 Biofilter/Holzhack	September	46,0	49,9	23,8	2,5	89 %
2 Biofilter/Stroh	März	9,5	9,8	4,6	0,5	89 %
2 Biofilter/Stroh	September	7,1	7,1	3,1	2,8	10 %**
3c Biofilter/Wurzel. (3 Mon.)*	Oktober	44,0	51,3	107,4	48,6	55 %
3b Biofilter/Wurzel. (18 Mon.)*	November	24,7	23,5	n.b.	n.b.	n.b.
3a Biofilter/Wurzel. (39 Mon.)*	März	63,0	61,5	116,8	7,1	94 %
3a Biofilter/Wurzel. (45 Mon.)*	August	23,4	22,7	32,4	4,9	85 %
4a Rieselbettreaktor	Februar	29,8	31,5	16,5	16,5	0 %
4b Rieselbettreaktor	Juli	25,7	28,0	11,1	5,6	50 %
5 2-stufig Kombi.	November	8,9	9,0	115,2	108,5	6 %
6 3-stufig Kombi.	Januar	49,7	48,8	n.b.	n.b.	n.b.

* Alter der baugleichen Biofilter zum Zeitpunkt der Messung

** Ausfall der Biofilter-Bewässerung während der Messkampagne

Ein Abbau von Methan konnte in den untersuchten Abluftreinigungssystemen nicht festgestellt werden. Unterschiede zwischen den Methangehalten im Roh- und Reingas von weniger als 5 % müssen auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden. Beim Biofilter Typ 1 und den beiden Rieselbettreaktoren (Typ 4 a/b) lagen die CH₄-Konzentration im Reingas um 5-10 % über dem Rohgas. Es ist denkbar, dass es im Biofilter zu vernässten Zonen mit Methanbildung gekommen ist, außerdem ist eine Methanbildung im Vorratsbehälter des Wäschers denkbar, da dieser nicht gesondert belüftet wurde. Für den Biofilter Typ 3c gilt eine Methan-Bildung mit 17 % als sicher nachgewiesen. Dieses CH₄ wurde vermutlich in Bereichen des Filtermaterials gebildet, wo es wegen einer Unachtsamkeit beim Befüllen des Filters zu einer Beimengung von Erde zum Wurzelholz gekommen ist. Diese Zonen vernässen sehr leicht und werden nur schlecht durchlüftet, sind also für eine CH₄-Bildung prädestiniert. Bei

der Befüllung eines Biofilters sollte also immer auf ein sauberes Filtermaterial geachtet werden, das ohne Verdichtungszonen aufgeschüttet wird.

4.1.2 NH₃-Messung

Wie schon bei den VOC erkennt man beim Ammoniak einen Tagesgang und einen deutlichen, wenn auch nicht vollständigen Abbau im Biofilter (Abbildung 10). Bei den Biofiltern ließ sich ein NH₃-Abbau von bis zu 82 % feststellen (Tabelle 8).

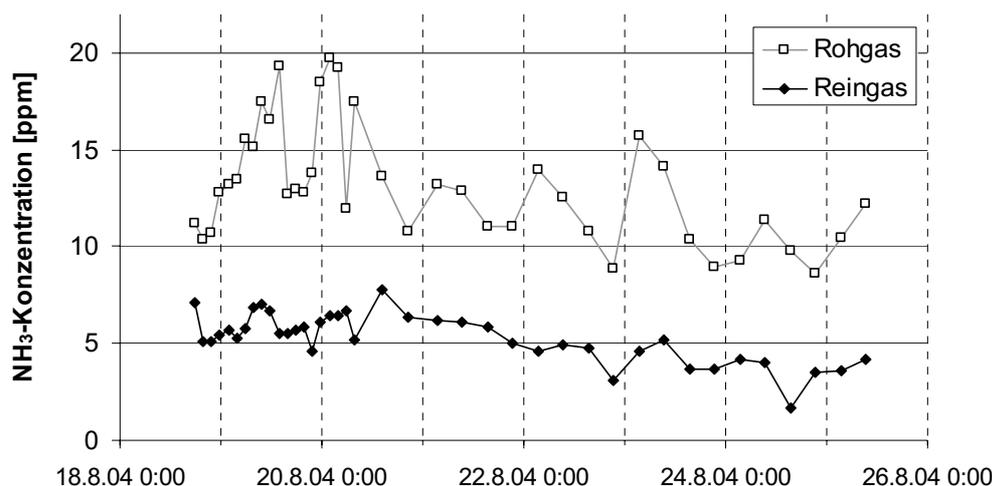


Abbildung 10: NH₃-Konzentrationen im Rohgas und Reingas eines Biofilters mit Wurzelholz-Schüttung innerhalb eines einwöchigen Messzeitraumes.

Tabelle 8: NH₃-Konzentrationen in der Stallabluft vor (Rohgas) und nach (Reingas) den untersuchten Abluftreinigungssystemen (in mg N/Nm³) sowie deren NH₃-Abbauleistung (in % der Rohgaskonzentration).

Filtertyp	Messung	NH ₃ Rohgas	NH ₃ Reingas	NH ₃ Abbau
1 Biofilter/Holzhack	April	4,0	2,0	49 %
1 Biofilter/Holzhack	September	3,3	1,1	67 %
2 Biofilter/Stroh	März	17,0	13,1	23 %
2 Biofilter/Stroh	September	0,7	0,76	(-9 %)**
3c Biofilter/Wurzel. (3 Mon.)	Oktober	6,8	1,6	76 %
3b Biofilter/Wurzel. (18 Mon.)	November	11,0	1,9	82 %
3a Biofilter/Wurzel. (39 Mon.)	März	21,9	6,7	69 %
3a Biofilter/Wurzel. (45 Mon.)	August	7,8	3,2	60 %
4a Rieselbettreaktor	Februar	1,4	1,2	(15 %)**
4b Rieselbettreaktor	Juli	23,2	9,2	60 %
5 2-stufig Kombi.	November	12,8	10,7	16 %
6 3-stufig Kombi. (mit Säure)*	Januar	16,3	7,9	51 %

* Nur Reinigungsleistung der physikalischen und chemischen Stufen vor Biofilter.

** Aufgrund geringer NH₃-Konzentrationen im Rohgas findet hier kein/kaum NH₃-Abbau im Filter statt. Eine Berechnung der Abbauraten ist hier nicht sinnvoll.

Der Vergleich der untersuchten Abluftreinigungssysteme zeigt, dass hier im Gegensatz zu anderen Untersuchungen (HAHNE et al. 2002) Rieselbettreaktoren und Kombisysteme nicht grundsätzlich den Biofiltern bezüglich des NH_3 -Abbaus überlegen sind.

Auffallend ist, dass das 3-stufige Kombisystem (Typ 6) trotz Säurewäscher mit 51 % nur eine durchschnittliche NH_3 -Abscheidung aufwies. Allerdings erfolgte die Probenahme hier direkt hinter dem Säurewäscher vor der Biofilterwand. Es ist denkbar, dass hierdurch kleine Ammoniumsulfat- $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ -beladene Tröpfchen aus dem Säurewäscher in das Probenahmesystem geraten sind, welche normalerweise in der Biofilterwand abgeschieden würden (Tropfenabscheider). Somit käme es zu erhöhten NH_4 -Konzentrationen in den Reingaswaschflaschen, was eine verminderte NH_3 -Abscheidung vortäuschen würde.

Bei den Biofiltersystemen zeigte der Typ 2 mit Strohschüttung schlechte NH_3 -Abbauraten. Dies verwundert vor allem deswegen, weil dieser Filter am ersten Messtermin sehr hohe NMVOC-Abbauraten zeigte und im allgemein die NMVOC- und die NH_3 -Abbauraten gut miteinander korrelieren ($R^2 = 0,76$; Abbildung 11). Eine Begründung für dieses Verhalten lässt sich aus dem in Kap. 4.3 beschriebenen Laborversuch ableiten.

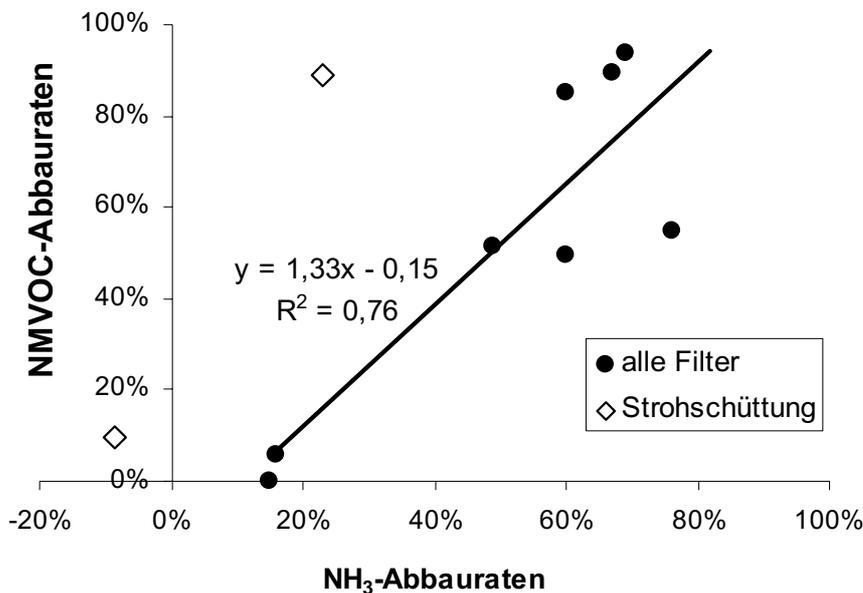


Abbildung 11: Korrelation zwischen den NH_3 - und den NMVOC-Abbauraten der untersuchten Abluftreinigungssysteme. (In die Berechnung der Regressionsgeraden wurden die Werte des Biofilters mit Strohschüttung (Typ 2) nicht einbezogen.)

4.1.3 N₂O- und NO-Messung

Die Messung der N₂O-Konzentrationen verdeutlicht, was mit dem im Biofilter abgebauten Ammoniak geschieht (Abbildung 12). Hier, wie schon bei den VOC- und NH₃-Konzentrationen, erkennt man auch bei den N₂O-Messungen Tagesgänge. Nur mit dem Unterschied, dass diese in den Reingas-Konzentrationen auftreten. Im Biofilter wird also N₂O nicht abgebaut sondern gebildet. Dasselbe gilt für die NO-Konzentrationen (nicht dargestellt).

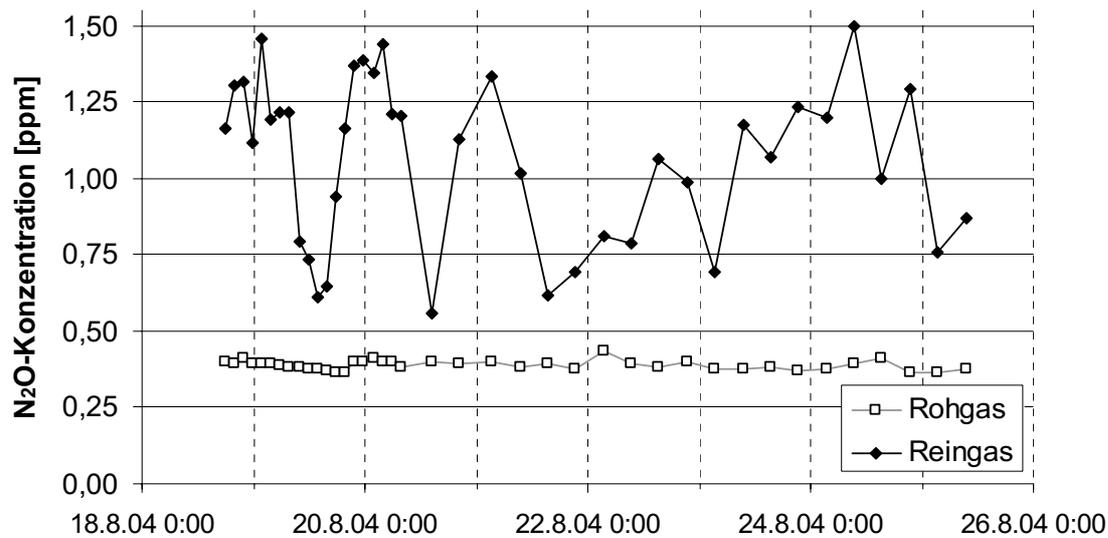


Abbildung 12: N₂O-Konzentrationen im Rohgas und Reingas eines Biofilters mit Wurzelholzschüttung innerhalb eines einwöchigen Messzeitraumes.

Insgesamt wurden bei den verschiedenen Abluftreinigungsanlagen zwischen 3 und 17 % des abgebauten NH₃ als N₂O und zwischen 1 und 15 % als NO emittiert (Tabelle 9). Ausnahmen bilden hier der Biofilter mit Strohschüttung, bei dem in der Septembermessung keinen NH₃-Abbau stattfand. Im Rieselbettreaktor wurde deutlich mehr N₂O und NO emittiert als NH₃ abgeschieden wurde. Dieser Filter steht an einem Ferkelaufzuchtstall im Rein-Raus-Verfahren. Kurz vor der Messung wurde hier ein Umtrieb durchgeführt, weshalb die NH₃-Konzentrationen in der Stallabluft relativ gering waren, wogegen im Wäscherwasser noch relativ hohe NH₄⁺-Gehalte vorlagen.

Die Wäscher- und Biofilter haben sich nicht wesentlich bezüglich der N₂O und NO-Bildung unterschieden. Einzig beim Kombisystem mit Säurewäscher (Typ 6) konnte keine N₂O-Bildung nachgewiesen werden. Aufgrund des niedrigen pH-Werte (3-4) fand hier kein NH₃-Abbau (Nitrifikation) und somit keine N₂O-Bildung statt.

Tabelle 9: N₂O- und NO-Bildung in den untersuchten Abluftreinigungssystemen (in mg N / Nm³ und in % des abgeschiedenen Ammoniaks).

Filtertyp	Messung	N ₂ O-Bildung		NO-Bildung	
		mg N/Nm ³	% abge. NH ₃	mg N/Nm ³	% abge. NH ₃
1 Biofilter/Holzhack	April	0,21	11 %	0,16	8 %
1 Biofilter/Holzhack	September	0,23	10 %	0,33	15 %
2 Biofilter/Stroh	März	0,22	6 %	0,15	4 %
2 Biofilter/Stroh	September	0,04	--**	0,33	--**
3c Biofilter/Wurzel. (3 Mon.)	Oktober	0,18	3 %	0,29	6 %
3b Biofilter/Wurzel. (18 Mon.)	November	0,81	9 %	0,27	3 %
3a Biofilter/Wurzel. (39 Mon.)	März	1,50	10 %	0,11	1 %
3a Biofilter/Wurzel. (45 Mon.)	August	0,81	17 %	0,22	5 %
4a Rieselbettreaktor	Februar	0,77	(385 %)**	0,12	(60 %)**
4b Rieselbettreaktor	Juli	0,58	4 %	0,13	1 %
5 2-stufig Kombi.	November	0,17	8 %	0,08	4 %
6 3-stufig Kombi.*	Januar	-0,03	0 %	n.b.	n.b.

* nur Reinigungsleistung der physikalischen und chemischen Stufen

** aufgrund geringer NH₃-Konzentrationen im Rohgas findet hier kein/kaum NH₃-Abbau im Filter statt.

Bei den Biofiltern mit Wurzelholzfällung erkennt man eine deutliche Zunahme der N₂O-Bildungsraten mit dem Alter des Filtermaterials. In wie weit dies mit einer Anreicherung von Nitrit im Filtermaterial in Verbindung zu bringen ist, ließ sich anhand der untersuchten Sickerwasserproben nur vermuten, aber nicht nachweisen, da der Nitrit-Gehalt nur bei der ersten (Typ 3a) und letzten (Typ 3c) Untersuchung analysiert wurde (4140 bzw. <2 mg NO₂/l).

4.2 N₂O-Emissionen aus Gülle nach Einleitung von Wäscher- und Biofiltersickerwasser

Der Betrieb von Biofiltern erfordert stets eine zusätzliche Befeuchtung des Filtermaterials. Soll eine durchgehende Befeuchtung des Filtermaterials gewährleistet werden, ist mit einem Anfallen von Sickerwasser zu rechnen. In Praxis wird dieses Sickerwasser, wie auch das abgeschlämmte Wasser aus Wäschern und Rieselbettreaktoren in die Gülle eingeleitet und somit entsorgt. Wegen der hohen Nitritgehalte in diesen Wässern war zu befürchten, das es in der Gülle zu Reaktionen (chemisch/biologisch) kommt bei denen N₂O freigesetzt wird.

Im Laborversuch konnte zwar in allen Varianten eine gewisse N₂O-Bildung nach Zugabe der Wasch- und Sickerwässer zur Gülle festgestellt werden, nennenswerte Emissionen ergaben sich aber nur beim Washwasser des Rieselbettreaktors (Tabelle 10).

Tabelle 10: N₂O-Bildung nach Einleitung von Wäscher- und Biofiltersickerwasser in Schweinegülle.

Variante	Art des Wasch-/Sickerwassers	Filter-Typ	N ₂ O-Bildung in der ersten halben Stunde [µg N ₂ O-N]	N ₂ O-Bildung pro l Wasser [µg N ₂ O-N/h/l]	gesamte N ₂ O-Bildung [% des zugegebenen N]
0	Unbehandelte Schweinegülle	-	0,0	-	-
1	Waschwasser/Biowäscher	4a	14,9	596	2,0 %
2	Waschwasser/Biowäscher	4a	5,6	1126	3,7 %
3	Waschwasser/Biowäscher	4a	0,6	1151	3,8 %
4	Sickerwasser/Biofilter	3a	0,9	190	0,01 %
5	Sickerwasser/Biofilter	3a	0,1	157	0,01 %
6	Waschwasser/Kombiwäscher	5	0,1	209	0,01 %

Diese Lachgas-Bildung ging aber innerhalb von nur 24 h auf Null zurück. Während das meiste N₂O bei der Variante 1 (50 ml Biowäscherwasser in 200 ml Gülle) emittierte, waren die Emission bezogen auf die zugegebene Menge Wasser bei Variante 3 (1 ml Biowäscherwasser in 200 ml Gülle) am höchsten. Hier wurden 3,8 % des zugeführten Stickstoffs als N₂O emittiert. Bei den Varianten 4 bis 6 ist die N₂O-Bildung verschwindend gering, obwohl mit diesen Varianten bedeutend mehr Stickstoff (vor allem in Form von Nitrat) zur Gülle gegeben wurde (vgl. Tabelle 2, Tabelle 11).

Es ist davon auszugehen, dass die hohen Nitrit-Konzentrationen (>50 mg NO₂⁻/l Gülle) toxisch wirkten und so die biologische N₂O-Bildung unterbunden wurde. Eine chemische N₂O-Bildung dürfte aufgrund des hohen gepufferten pH-Wertes der Gülle auszuschließen sein.

Die toxische Wirkung des Nitrits lässt sich auch anhand der Methan-Emissionen belegen. In den Varianten 1-3 (Biowäscherwasser) konnten gegenüber der Kontrolle um bis zu den Faktor 5,5 erhöhten CH₄-Emissionen festgestellt werden (Tabelle 11), die auch 6 Tage nach Zugabe noch anhielten. Inwieweit diese CH₄-Emissionen auf dem Abbau der mit dem Wäscherwasser zugeführten C-Verbindungen beruhen, oder ob auch die Methan-Emission aus güllebürtigem Kohlenstoff forciert wurde, ließ sich nicht differenzieren. In den Varianten mit hohen Nitrit-Gehalten lag die CH₄-Emission bestenfalls auf dem Niveau der Kontrolle, bzw. wurde in der Variante mit der höchsten zugegebenen Nitrit-Menge (680 mg/l) auf 31 % der Kontrolle reduziert. Eine biologische Methanbildung (Methanogenese) fand hier quasi nicht mehr statt.

Tabelle 11: CH₄-Bildung nach Einleitung von Wäscher- und Biofiltersickerwasser in Schweinegülle in Abhängigkeit der zugeführten Nitrit-Menge.

Variante	Art des Wascher-/Sickerwassers	Filter-Typ	Zugegebene NO ₂ -Menge [mg/l Gülle]	Mittlere CH ₄ -Bildungsraten [µg/h/l Gülle]	Mittlere CH ₄ -Bildungsraten [Kontrolle = 100 %]
0	Unbehandelte Schweinegülle	-	0	3,5	100 %
1	Waschwasser/Biowäscher	4a	27,6	7,0	200 %
2	Waschwasser/Biowäscher	4a	5,5	10,2	292 %
3	Waschwasser/Biowäscher	4a	0,6	19,5	557 %
4	Sickerwasser/Biofilter	3a	680	1,1	31 %
5	Sickerwasser Biofilter	3a	68	3,6	104 %
6	Waschwasser/Kombiwäscher	5	181	3,1	88 %

Der Versuch wurde mit einer großen Spannbreite bezüglich der eingeleiteten Flüssigkeitsmenge und des N-Gehaltes durchgeführt und sollte die in der Praxis möglichen Szenarien abdecken: von geringen täglichen Abschlämmraten bis hin zum Komplettaustausch in eine geringe Güllevorlage. Nach unseren Beobachtungen werden üblicherweise kleine Mengen in die Gülle eingeleitet. Bei Biofiltern besteht oft ein kontinuierlicher Fluss des Sickerwassers zur Gülle. Es ist also nach den Ergebnissen dieses Versuchs auch in der Praxis mit erhöhten N₂O und CH₄-Emissionen aufgrund der Lagerung/Entsorgung des Wäscher- und Sickerwassers zu rechnen. Unter der Annahme, dass mit diesem Wasser das im Abluftreinigungssystem abgeschiedene NH₃ abgeführt wird, können hier potenziell nochmals bis zu 4 % des abgeschiedenen NH₃ als N₂O emittieren.

Einen Hinweis auf diese N₂O-Emissionen ergab sich aus den Messungen an Filtertyp 6 (3-stufige Kombianlage). Hier wurden kurz nach Austausch des Wäscherwasser eine N₂O-Konzentration von rund 10 ppm in der Stallluft (Güllelager unterflur) gemessen (siehe Tabelle A12 im Anhang), ein Wert, der 25-30 mal über der üblichen Konzentration liegt. Ähnlich wie im Laborversuch wurde auch hier nach 24 Stunden das Ausgangsniveau nahezu wieder erreicht.

Der Versuch hat somit gezeigt, dass sich aus der Praxis der Entsorgung des Sicker- und Wäscherwassers mit der Gülle bezüglich der Klimarelevanz der biologischen Abluftreinigung eine zusätzliche Problematik ergibt. Es ist in jedem Fall eine getrennte Lagerung und (im Fall der Düngung) Ausbringung zu empfehlen. Es wäre jedoch noch zu überprüfen, inwieweit diese Stickstoff- und vor allem Nitrit-reichen Wässer überhaupt zur Düngen geeignet sind (Toxizität für Pflanzen) und ob es hier nicht zu erhöhten Spurengasemissionen aus dem Boden kommt.

4.3 Untersuchungen an Laborbiofiltern

Die Untersuchungen an den Laborbiofiltern zeigt, dass sowohl die Temperatur als auch das Filtermaterial einen deutlichen Einfluss auf die NH_3 -Sorptions haben. Dies war im Versuch vor allem ein physikalischer Effekt. Ein mikrobieller Abbau von NH_3 fand im Biofilter während des Experiments nicht oder kaum statt. Dies lag darin begründet, dass sich während des Versuchs trotz mehrmaliger Inokulation keine effektive mikrobielle Besiedlung etablieren ließ, was unter anderem auch darin begründet war, dass es trotz einer technisch aufwendigen Temperaturreglung und Luftbefeuchtung nicht gelungen ist, das Biofilterträgermaterial gleichmäßig und dauerhaft zu befeuchten. So war in einigen Filtern trotz nennenswertem Sickerwasseranfall ein Austrocknen im oberen Filterbereich festzustellen, was ein wiederholtes außerplanmäßiges Bewässern notwendig machte.

Trotz dieser Mankos ließen sich die physikalischen Sorptionseigenschaften unter den Einflussfaktoren Temperatur und Filtermaterial in der Anfangsphase des Versuchs deutlich herausarbeiten.

4.3.1 Einfluss der Temperatur und des Filtermaterials auf die Ammoniak-Sorption

Die Laborfilter wurden zunächst 2 Monate lang nur mit VOC im Rohgas betrieben, bevor 40 ppm Ammoniak zum Rohgas dosiert wurden. In Abbildung 13 ist die NH_3 -Abscheideleistung der mit Holz gefüllten Filter in Abhängigkeit der Betriebstemperatur dargestellt. Während bei den 53°C warmen Filtern die Ammoniak-Sorption bereits 10 Tage nach Beginn der NH_3 -Zugabe erschöpft war, kam sie bei der 23 °C-Variante erst nach 28 Tagen zum Erliegen. Dies lag vor allem daran, dass mit steigender Temperatur die Wasserlöslichkeit des NH_3 zurück geht und sich der pKs-Wert vermindert, sich also das $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Gleichgewicht zum NH_3 hin verschiebt (vergl. Abbildung 14). Für den praktischen Betrieb eines Biofilters bedeutet dies, dass bei kühler Witterung im Biofilter mehr NH_3 auf physikalischem Weg zurückgehalten werden kann und Schwankungen in der NH_3 -Konzentration der Abluft besser abgepuffert werden. Erhöhte NH_3 -Konzentration des Rohgases während der Wintermonate (Winterluftträte) müssen sich also nicht nachteilig auf den Abscheidegrad eines Biofilters auswirken.

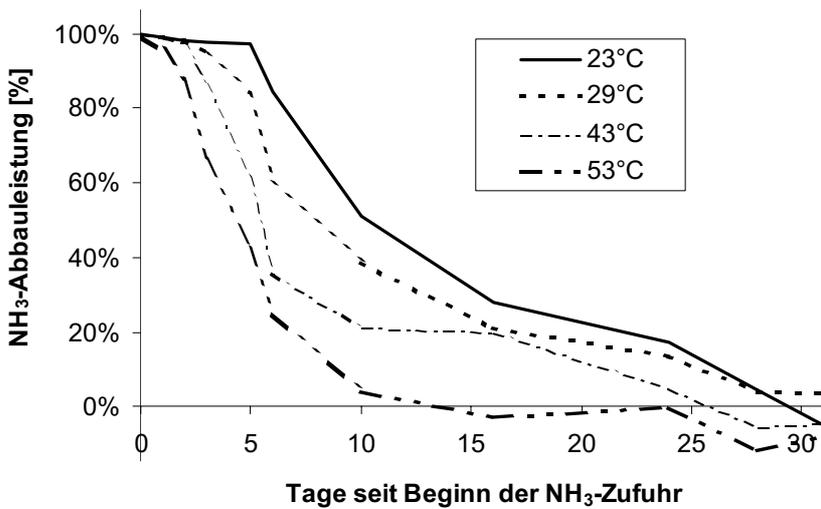


Abbildung 13: NH₃-Abbau im Laborversuch in Abhängigkeit von der Filter-Temperatur (hier Filtermaterial Holz).

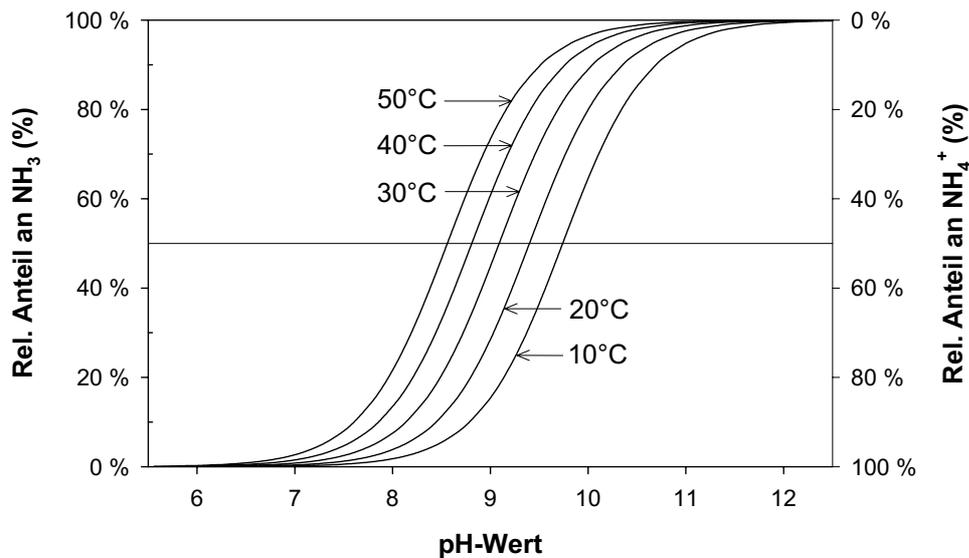


Abbildung 14: Abhängigkeit des NH₃/NH₄⁺-Gleichgewichtes von der Temperatur.

Wie die Abbildung 15 zeigt, war die NH₃-Speicherfunktion der Filter bei Miscanthus-Füllung im Mittel nach 10 Tagen, bei Holz als Filtermaterial aber erst nach 28 Tagen erschöpft. Wie die Ermittlung der potenziellen und effektiven NH₃-Adsorptionskapazität zeigte (Tabelle 12), konnte das verwendete Holz nahezu doppelt so viel NH₃ sorbieren wie das Miscanthus-Stroh. Das Trägermaterial eines Biofilters hat also nicht nur als Wasserspeicher oder Substrat für die mikrobielle Besiedlung einen Einfluss auf den NH₃-Abbau im Biofilter, auch die NH₃-Adsorptionskapazität spielt als physikalischer Faktor eine wichtige Rolle.

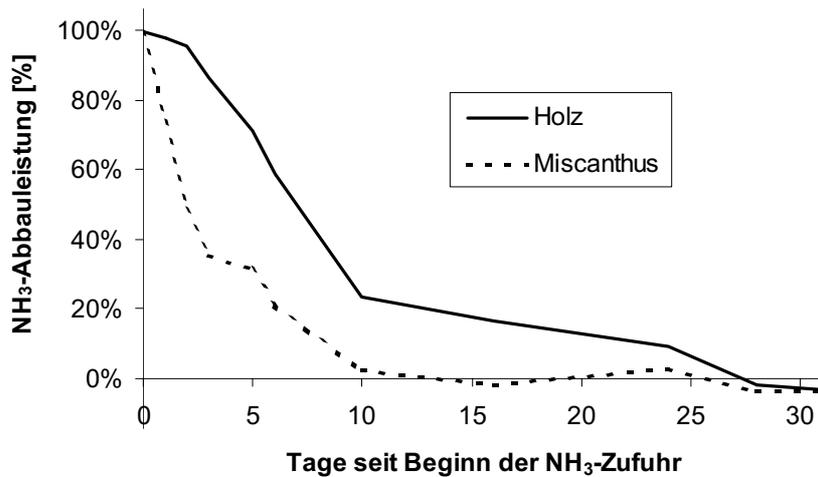


Abbildung 15: NH₃-Abbau im Laborversuch in Abhängigkeit vom Filtermaterial (Mittelwerte aller vier Temperaturstufen).

Tabelle 12: Mittlere potenzielle und effektive Adsorptionskapazitäten (AK_{pot} und AK_{eff}) der Trägermaterialien (*Miscanthus* und Holz).

	Trägermaterial	
	<i>Miscanthus</i>	Holz
Gemittelte AK _{pot} [mg NH ₃ /g TS] (mit K ₂ SO ₄ -Vorbehandlung)	7,7	11,6
Gemittelte AK _{eff} [mg NH ₃ /g TS] (ohne Vorbehandlung)	6,0	11,1

4.3.2 Einfluss der Temperatur und des Filtermaterials auf die NMVOC-Sorption

Ähnlich wie der NH₃-Abbau wird auch die NMVOC-Abbauleistung der Laborbiofilter wesentlich durch die Temperatur beeinflusst (Abbildung 16). Die höchsten Abbauraten (50-60 %) finden sich in der niedrigsten Temperatur-Variante. Dagegen betrug der NMVOC-Abbau in der 53° C-Variante nur rund 10 %. Im Gegensatz zum Verlauf des NH₃-Abbaus blieb die NMVOC-Abbauleistung während des untersuchten Zeitraums (0-31 Tage seit NH₃-Zugabe) in allen Temperatur-Varianten nahezu konstant. Da hier keinerlei Sättigungseffekte festzustellen sind, kann hier neben physikalischen Sorptionsprozessen auch von einem biologischen VOC-Abbau ausgegangen werden, der durch Temperaturen oberhalb von 40° C gehemmt wird.

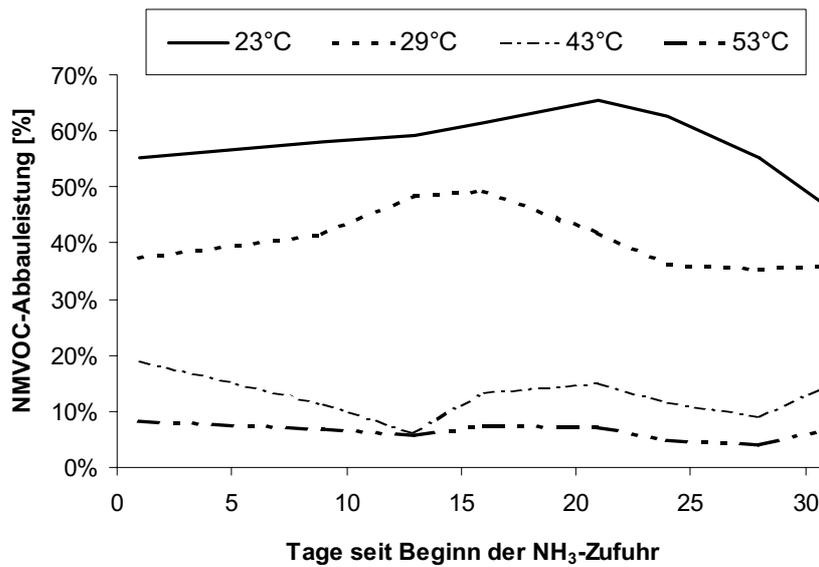


Abbildung 16: NMVOC-Abbau im Laborversuch in Abhängigkeit von der Filter-Temperatur (Mittelwerte beider Filtermaterialien).

Da die NMVOC-Abbauleistung im Mittel der Miscanthus-Stroh-Varianten (35-45 %) deutlich über der Holz-Variante (ca. 20 %) lag, ist davon auszugehen, dass das Filtermaterial zum einen die physikalische NMVOC-Sorption, zum anderen aber auch als Substrat für die mikrobielle Besiedlung den biologischen NMVOC-Abbau beeinflusst.

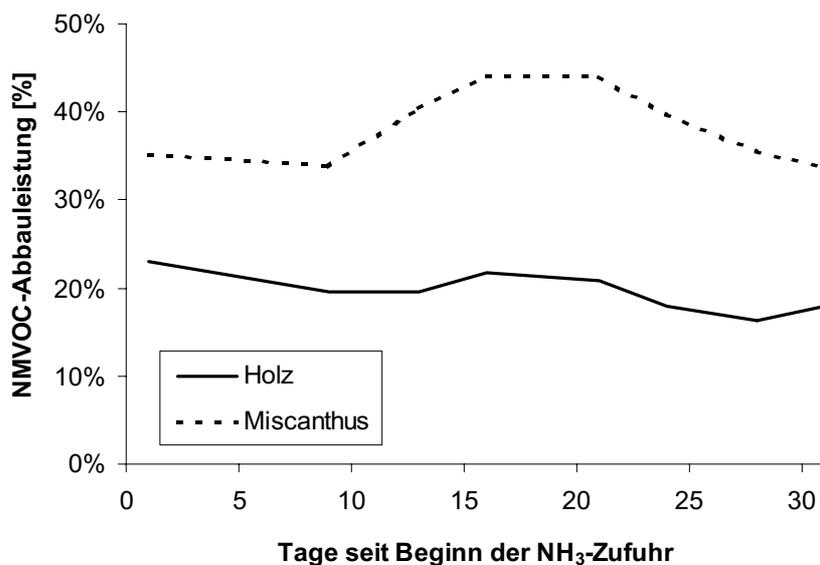


Abbildung 17: NMVOC-Abbau im Laborversuch in Abhängigkeit vom Filtermaterial (Mittelwerte aller vier Temperaturstufen).

Bezüglich des NMVOC-Abbaus (und somit des Geruchabbaus) scheint Miscanthus-Stroh also einen Vorteil gegenüber der in der Praxis üblich Holzfüllung zu haben. Allerdings zeigte sich am Ende des Versuch, dass die Miscanthus-Varianten während des insgesamt 8-monatigen Versuchszeitraumes einen mittleren Trockenmasseverlust von 51 % aufwiesen (Holz maximal 15 %). Sollte es also zu einem Einsatz von Miscanthus-Stroh in Biofiltern kommen, muss hier öfters ein Nachfüllen oder Austauschen durchgeführt werden, als das mit den bisherigen Materialien üblich ist. Weitere vergleichende Untersuchungen sind hier allerdings zu empfehlen, vor allem deshalb, weil Miscanthus bezüglich der NH_3 -Adsorptionskapazitäten (Kap. 4.3.1) deutlich unterlegen war.

Die Eigenschaften des Miscanthus-Stroh bezüglich des NH_3 - und NMVOC-Abbaus spiegeln sich in den Untersuchungen des Biofilter-Typ 2 (mit Strohschüttung) wieder (vergl. Kap. 4.1.1 und 4.1.2.). Dieser Filtertyp zeigte ebenfalls überdurchschnittliche NMVOC-Abbauraten bei einer schlechten NH_3 -Abscheidung. Es scheint also, dass das in diesem Biofilter verwendete Stroh ähnliche Eigenschaften wie das Miscanthus-Stroh aufweist. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse sollte eine Strohschüttung vor allem dann eingesetzt werden, wenn der Biofilter mit dem Ziel des Geruchsabbaus errichtet wird. Wenn aber darüber hinaus eine NH_3 -Abscheidung gefordert wird, ist dieser Filtertyp eher nicht zu empfehlen.

5 Ausblick

Die dargestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass es bei der gängigen Praxis der Abluftreinigung an Tierhaltungsanlagen zu einer erheblichen Bildung von klimarelevanten Spurengasen kommt. Die Bedeutung der Spurengasbildung bei der biologischen Abluftreinigung soll zum Abschluss anhand eines einfachen Szenarios dargelegt werden.

Nach DÖHLER et al. (2002) entstehen in Deutschland zur Zeit allein aus Schweine- und Hühnerställen NH_3 -Emissionen von rund 96.000 t pro Jahr (entspricht 79 kt Stickstoff). Nimmt man an, dass bei etwa der Hälfte dieser Ställe eine Abluftreinigung möglich ist, und dass dabei, nach den vorliegenden Messungen, rund 60 % des NH_3 abgeschieden werden (vergl. Tabelle 8, S. 24), wovon wiederum rund 10 % zu N_2O umgesetzt werden (Bezogen auf die Stickstoff-Mengen, vergl. Tabelle 9, S. 27), so ist mit einer jährlichen N_2O -Bildung von 3.724 t zu rechnen. Dies entspricht rund 2,9 % der gesamten landwirtschaftlichen N_2O -Emissionen (rund 128 kt, siehe Tabelle 13). Durch diese N_2O -Emissionen käme es zu einer Erhöhung des „Global warming Potentials“ in Höhe von rund 1,1 Mio. t CO_2 -Äquivalenten.

Tabelle 13: Kalkulation der potentiellen N_2O -Bildung durch die Abluftreinigung an Tierhaltungsanlagen.

NH_3-Emissionen aus Schweine- und Hühnerställen¹⁾:	96.000 t NH_3 /a
Möglicher Anteil an Ställen mit Abluftreinigung:	50 %
Durchschnittlicher NH_3 -Abbaugrad:	60 %
Durchschnittliche N_2O -Bildungsrate:	10 %
Potentielle N_2O-Bildung durch Abluftreinigung:	3.724 t N_2O /a
Gesamte landw. N_2O -Emissionen (UBA 2005):	~ 128.400 t N_2O /a
Zusätzlicher Anteil der Abluftreinigung:	~ 2,9 %
Zusätzliches GW-Potential²⁾:	1,1 Mio. t CO_2 -Äquiv.

1) vergl. Tabelle 1

2) Umrechnungsfaktor von N_2O zu CO_2 -Äquivalenten: 310

Die potentiellen Treibhausgasemissionen der Abluftreinigung hätten einen Anteil von 1,3 % an den landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen (87,7 Mio. t CO_2 -Äquiv.) bzw. einen Anteil von 0,11 % an den gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland (1.017,5 Mio. t CO_2 -Äquiv.) (vergl. Tabelle 14). Die gesamten N_2O -Emissionen würden durch die Abluftreinigung um 1,8 % erhöht.

Tabelle 14: Anteil der einzelnen Treibhausgase sowie der Emittentengruppen an den Treibhausgasemissionen in Deutschland für das Jahr 2003 (UMWELTBUNDESAMT 2005).

	Mio. t CO ₂ -Äq.	%		Mio. t CO ₂ -Äq.	%
CO ₂	865,4	85,0	Energiebedingte Emissionen	866,5	85,2
CH ₄	75,2	7,4	Industrieprozesse	47,7	4,7
N ₂ O	63,7	6,3	Produktverwendung	1,9	0,2
HFC	8,2	0,8	Landwirtschaft	87,3	8,6
PFC	0,8	0,1	(davon 47,6 Mio. t als CH ₄ und 39,7 Mio. t als N ₂ O)		
SF ₆	4,2	0,4	Abfallwirtschaft	14	1,4
Total	1.017,5	100	Total	1.017,5	100

Diese N₂O-Emissionen aus der Abluftreinigung lassen sich über den Umweg des seit 2005 möglichen Emissionshandels mit Kohlendioxid-Emissionszertifikaten als CO₂-Äquivalente monetär bewerten. Der Handel mit Emissionszertifikaten gilt zwar weder für die Landwirtschaft, noch werden derzeit damit Nicht-CO₂-Spurengase bewertet, er gibt aber eine Vorstellung über die volkswirtschaftliche Bedeutung der Spurengasemissionen. Zur Zeit existieren verschiedene europäische Plattformen für den Handel mit Kohlendioxid-Emissionszertifikaten. In Abbildung 18 ist die sehr dynamische und zum Teil durch politische Entscheidungen beeinflusste Preisentwicklung seit Anfang 2005 exemplarisch dargestellt.



Abbildung 18: Preisentwicklung für den Emissionshandel der Handelsplattform NORD POOL von Februar 2005 bis Juli 2006 (Quelle: www.co2-handel.de).

Bei dem maximalen Kurs in 2005 von 29 € pro t CO₂ im freien CO₂-Handel, würden die potentiellen N₂O-Emissionen aus der Abluftreinigung mit 1,1 Mio. t CO₂-Äquivalenten einem volkswirtschaftlichen Wert von 32 Mio. Euro entsprechen. Bezogen auf den derzeitigen Preis (Juli 2006) von rund 16 € pro t CO₂ wären es noch rund 18 Mio. € (Tabelle 15).

Diese Umwelt-Kosten der Abluftreinigung könnten vermieden werden, wenn alle Abluftreinigungsanlagen mit Säurewäschern ausgestattet würden, was zu einer nahezu vollständigen Reduktion der N₂O- und NH₃-Emissionen führte. Hierdurch entstünden jedoch zusätzliche Kosten für die Installation und den Betrieb der Filter in Höhe von 7-58 Mio. Euro pro Jahr (0,5-4,0 €/Mastschwein; berechnet nach GRIMM (2005), STAT. BUNDESAMT (2005)). Ferner könnten aber bis zu 40 Mio. kg N in Form von Ammoniumsulfat-Lösung (mit bis zu 8 % N) zu Düngungszwecken gewonnen werden, die bei einem Preis von 0,50 € /kg N einen Wert von 20 Mio. € hätte. So entstünde durch die NH₃-Abscheidung in Abhängigkeit der Kosten für den CO₂-Handel und den Kosten für die Säurewäsche letzten Endes ein Saldo von -20 bis +45 Mio. € pro Jahr. Lässt man die Kosten des CO₂-Handels außer acht, beläuft sich das Saldo aus Kosten für die zusätzliche Installation und Betrieb von Säurewäschern und dem Erlös aus der Rückgewinnung von Stickstoff auf -38 – +13 Mio. € pro Jahr. Vor allem bei Kombinationsverfahren in der Abluftreinigung ist der zusätzliche Betrieb eines Säurewäschers preisgünstig zu gestalten (Kosten unter einem Euro pro Mastschwein), was unter Einbeziehung der Erlöse für den zurückgewonnenen Stickstoff zu positiven Bilanzsalden führt.

Steigende Energiekosten und Produktionskosten für N-Dünger steigern die Wirtschaftlichkeit Abluftreinigung. In dem beschriebenen Szenario wurden die durch Säurewäsche verminderten Schäden durch den eutrophierenden und versauernden Eintrag von NH₃ in die Umwelt oder Schäden durch Luftschadstoffe an Gebäuden und Denkmälern nicht berücksichtigt, da sich diese einerseits einer monetären Bewertung entziehen und andererseits der Anteil der durch die Abluftreinigung beeinflussten Stoffe an diesen Schäden kaum zu kalkulieren ist.

Tabelle 15: Bilanzierung der Kosten der durch Abluftreinigung verursachten N₂O-Emissionen und ihrer Vermeidungskosten durch Erweiterung von Abluftreinigungsanlagen mit Säurewäschern.

		max. Preis 2005	akt. Preis 07/2006	ohne Emis- sionshandel
Kosten der N₂O-Emissionen:				
EUA-Kurs für CO ₂ -Emissionshandel (Juli 2005: ~29 €/t CO ₂ bzw. Juli 2006: ~16 €/t CO ₂)	(+)	32	18	--
Kosten der NH₃-Abscheidung durch Säurewäscher:				
Kosten für die zusätzliche Installation und Betrieb von Säurewäschern (0,5-4,- €/Mastschwein)*	(-)	7 – 58	7 – 58	7 – 58
Rückgewinnung von Stickstoff (~40 Mio. kg N/a als (NH ₃) ₂ SO ₄ à 0,50 €/kg N)	(+)	20	20	20
Saldo		-6 – +45	-20 – +31	-38 – +13

* berechnet nach STAT. BUNDESAMT (2005), GRIMM (2005); die zusätzlichen Kosten hängen stark davon ab, ob bereits Wäschersysteme installiert sind oder nicht. Entsprechend der Tierbestandszahlen für Schweine (2,98 Mio. GV) und Geflügel (0,49 Mio. GV) wurden die Kosten der Abluftreinigung für Geflügelställe hinzugerechnet. Es können aber die Kosten verschiedener Maßnahmen zur Vermeidung von NH₃-Emissionen miteinander verglichen werden. Entsprechend der NEC-Richtlinie

(Göteborg-Protokoll) hat sich die Bundesregierung verpflichtet, die NH_3 -Emissionen bis 2010 auf 550 kt NH_3/a zu reduzieren. Die Emissionen aus der Tierhaltung demnach wären auf 400 kt NH_3/a zu senken. Nach dem derzeitigen Trend der Tierbestandsentwicklung und dem Stand der Umsetzung emissionsmindernder Maßnahmen werden aber bis 2010 die Emissionen aus der Tierhaltung auf nur 461 kt NH_3/a sinken (DÖHLER et al. 2003). Es sind also zusätzlich rund 60 kt NH_3/a einzusparen. DÖHLER et al. (2003) haben hierzu verschiedene Minderungsmaßnahmen (proteinreduzierte Fütterung, Abdeckung der Güllelager, Verlustarme Ausbringung und Einarbeitung der Gülle zu Minderungsszenarien) zu Szenarien kombiniert und deren Minderungspotential sowie deren Kosten berechnet. Je nach Kombination und Intensität der Umsetzung der Maßnahmen ergibt sich ein Minderungspotential von 32,1 bis 71,0 kt NH_3/a , bei Kosten von 5,16 bis 6,29 €/kg NH_3 . Eine Kostenübersicht der einzelnen Maßnahmen geben auch OSTERBURG & BERGSCHMIDT (2002). Hier wurde allerdings nicht berücksichtigt, dass einzelne Maßnahmen nur in bestimmten Betriebsbereichen wirksam werden. So konnten WEISKE et al. (2006) zeigen, dass Maßnahmen die im Stallreich die Spurengasemissionen mindern, wie Rinnen oder Kratzbodensysteme, im Bereich der Güllelagerung und Gülleausbringung zu erhöhten Emissionen führen und somit insgesamt betrachtet keinen Effekt oder sogar negative Effekte haben.

Die Abluftreinigung mit und ohne Säurewäsche ist auch als eine Maßnahme zur Minderung der NH_3 -Emissionen anzusehen. Im dargestellten Szenario (vergl. Tabelle 13) werden durch die Abluftreinigung ohne Säurewäsche 28,8 kt NH_3 pro Jahr abgeschieden mit Säurewäsche sind es 19,2 kt NH_3 mehr und somit 48 kt NH_3 pro Jahr. Die Kosten der Abluftreinigung ohne Säurewäsche belaufen sich nach GRIMM (2005) und eigenen Recherchen auf 2 bis 6 € pro Mastschwein. Abluftreinigungsanlagen mit Säurewäsche verursachen Kosten von 4 bis 7,5 € pro Mastschwein (Mehrkosten von rund 0,5 bis 4 € pro Mastschwein). Unter Berücksichtigung des Erlöses für den mit Säurewäschern zurückgewonnenen Stickstoff belaufen sich die gesamten Kosten des Szenarios auf 29 bis 87 Mio. € pro Jahr ohne Säurewäsche und auf 38 bis 89 Mio. € pro Jahr mit Säurewäsche.

Bezogen auf die Menge an abgebautem bzw. abgeschiedenem NH_3 belaufen sich die Kosten der Abluftreinigung auf 1-3 €/kg NH_3 ohne Säurewäsche bzw. auf 0,8 –1,9 €/kg NH_3 mit Säurewäsche. Die Abluftreinigung ist somit vor allem in Verbindung mit einer Säurewäsche ein viel preisgünstigeres Werkzeug zur Minderung der NH_3 -Emissionen als die von OSTERBURG & BERGSCHMIDT (2002) oder von DÖHLER et al. (2003) beschriebenen Maßnahmen und es könnten bei der im Szenario verwendeten Anschlussquote (50% der Stallplätze) rund 80% (48 kt NH_3/a) der entsprechend der NEC-Richtlinie noch fehlenden NH_3 -Reduktion von 60 kt NH_3/a abgedeckt werden.

6 Schlussfolgerungen für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

Wenn auch die biologischen Abluftreinigungsanlagen einen gewissen Stand der Technik erreicht haben, gehören sie (noch) nicht zum Stand der Technik der emissionsarmen Tierhaltung (SCHIRZ 2003, GRIMM 2005). Die positive Wirkung der Abluftreinigungsanlagen in der Tierhaltung bezüglich der Geruchs- und Staub-Abscheidung ist dennoch unumstritten. Eine Abluftreinigung kann aber auch erforderlich werden um NH_3 -Emissionen zu mindern. Dabei zeigten die hier untersuchten Anlagen (Biofilter, Biowäscher, Kombisysteme) im Praxiseinsatz keine prinzipiellen Unterschiede in der Reinigungsleistung. Selbst mit einem einfachen Biofilter konnte eine NH_3 -Abbauleistung von 82% erzielt werden. Alle untersuchten Anlagen hatten aber den Nachteil, dass sie beim Abbau von Ammoniak das klimarelevante Spurengas N_2O bildeten.

Bei der Abluftreinigung stehen somit positive Effekte (Geruch, Staub, NH_3 und evtl. Keime) den negativen Aspekten (N_2O -Emissionen sowie Kosten für Installation und Betrieb der Anlagen) gegenüber. Hier gilt es verschiedenen Schutzgüter gegeneinander abzuwägen, was pauschal nicht ohne weiteres möglich ist.

Gelöst wird diese Problem durch den Einsatz von Säurewäschern. Sie ermöglichen eine weitgehende Abscheidung von NH_3 und vermeiden gleichzeitig die Bildung von N_2O . Sie verstärken also die positiven Effekte der Abluftreinigung und reduzieren die negativen Aspekte. Dabei verursacht der Betrieb von Abluftreinigungsanlagen mit Säurewäschern unter Umständen keine nennenswerten Mehrkosten, wenn der Wert des gewonnenen Stickstoffs berücksichtigt wird, welcher für Düngungszwecke eingesetzt werden kann. Auch bezüglich des nationalen Ziels, die NH_3 -Emissionen bis zum Jahr 2010 auf 550 kt zu reduzieren, stellt die Abluftreinigung mit Säurewäsche eine effektive und vor allem preisgünstige Minderungsmaßnahme dar.

Der Betrieb von Abluftreinigungsanlagen (Biofilter, Biowäscher, Kombisysteme) mit Säurewäsche ist also in jedem Fall zu favorisieren.

Dabei ist die Einrichtung von Abluftreinigungsanlagen vor allem bei größeren viehhaltenden Betrieben sinnvoll. 2005 wurden 51% der Schweine in Deutschland in Betrieben mit mehr als 1000 Tieren gehalten. Dies waren 7300 Betriebe und somit rund 8,2% aller Schweinehaltenden Betriebe (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006).

58% der Legehennen werden in Betrieben mit mehr als 50.000 Tieren gehalten. Dies waren rund 200 Betriebe und somit rund 0,26% aller Legehennenhaltenden Betriebe.

Ebenso werden 70% der Masthühner in Betrieben mit mehr als 50.000 Tieren gehalten. Dies waren rund 300 Betriebe und somit rund 3,1% aller Masthühnerhaltenden Betriebe.

Zur Umsetzung des vorgestellten Szenarios mit 50 % Anschlussquote könnten vor allem diese großen Betriebe herangezogen werden. Bundesweit wären rund 7800 Betriebe betroffen. In NRW wären hiervon rund 2200 Schweine-haltende Betriebe, rund 10 Legehennen-haltenden Betriebe und rund 10 Masthühner-haltenden Betriebe betroffen. Der administrative Aufwand der Minderungsmaßnahme wäre relativ gering und die Kontrollierbarkeit sehr gut.

7 Zusammenfassung

Verschärfte Regelungen im Umweltrecht (z.B. TA-Luft) haben dazu geführt, dass in den letzten Jahren immer mehr Tierhaltungsanlagen (vor allem Neubauten von Schweine- und Hühnerställen) mit Abluftreinigungsanlagen ausgerüstet werden. Neben einem Abbau von Geruchsstoffen soll hierdurch auch eine Reduktion von NH_3 -Emissionen erreicht werden. Frühere Untersuchungen an Biofiltern von Kompostierungsanlagen, mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen sowie an Laborbiofiltern haben gezeigt, dass beim Reinigen NH_3 -haltiger Abluft ein nennenswerter Anteil des abgebauten Ammoniaks in die klimarelevanten Spurengase N_2O (bis zu 28 %) und NO (bis zu 10 %) umgewandelt wird.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte geklärt werden, ob und in welcher Größenordnung in den Abluftreinigungsanlagen im Bereich der Tierproduktion klimarelevante Spurengase gebildet werden und ob sich Unterschiede zwischen den verschiedenen, in der Tierproduktion eingesetzten Abluftreinigungs-Systemen feststellen lassen. Ferner war zu prüfen, worauf diese Unterschiede evtl. zurückzuführen sind und ob sich die Spurengasbildung durch gezielte Maßnahmen reduzieren lässt.

In Freilanduntersuchungen wurden verschiedene Abluftreinigungssysteme (5 Biofilter-Typen, 2 Rieselbettreaktoren und 2 Kombisysteme) auf ihre Abbauleistung bezüglich NH_3 und NMVOC, sowie auf die Bildung von N_2O und NO untersucht. Hierzu wurden mehrere, mindestens einwöchige Messkampagnen an den Anlagen durchgeführt. Es zeigte sich, dass Biofilter bezüglich des NMVOC-Abbaus (Geruchsabbau) den physikalischen und chemischen Reinigungssystemen überlegen sind. Bei den untersuchten Biofiltertypen wurden durchschnittliche NMVOC-Abbauraten von maximal 89 % bis 94 % gefunden. Bei den anderen Systemen (Rieselbettreaktoren und Kombisysteme) erreichte der NMVOC-Abbau nur 50 % im Wochenmittel.

Im Gegensatz zu Berichten anderer Autoren konnten in den vorliegenden Untersuchungen keine grundsätzlichen Unterschiede bezüglich des NH_3 -Abbaus bei den verschiedenen Reinigungssystemen festgestellt werden. Die Biofilter zeigten mittlere NH_3 -Abbauraten zwischen 23 und 82 %. Bei den Rieselbettreaktoren und Kombisystemen lagen sie zwischen 16 und 60 %.

Mit Ausnahme eines Biofiltertyps mit Strohschüttung, waren die NH_3 -Abbauraten eng mit den NMVOC-Abbauraten korreliert. Der Stroh-Biofilter zeigte zwar überdurchschnittliche NMVOC-Abbauraten, aber nur einen schlechte NH_3 -Abbau. Die Ergebnisse eines Laborversuchs, der mit Biofiltern mit unterschiedlichen Füllmaterialien durchgeführt wurde, lassen vermuten, dass dies auf schlechte NH_3 -Sorptionseigenschaften des Strohs zurückzuführen ist.

In allen untersuchten Abluftreinigungssystemen wurde neben dem NH_3 -Abbau eine Bildung von N_2O und NO festgestellt. Bis zu 17 % des abgebauten NH_3 -Stickstoffs wurde zu N_2O und bis 15 % wurde zu NO und umgesetzt. Nur im 3-stufigen Kombinationssystem fand bei der NH_3 -Abscheidung durch den Säurewäscher keine Spurengasbildung statt. Dies war darauf zurückzuführen, dass es hier, bedingt durch den niedrigen pH-Wert, nicht zu einem biologischen Umsatz (Nitrifikation) des gelösten Ammoniums (NH_4^+) kam.

In den meisten Abluftreinigungssystemen fiel mehr oder weniger viel Sicker- bzw. Wäscherwasser an, welches regelmäßig mit der Gülle des Betriebs entsorgt wurde. In Laboruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit dieser Praxis nochmals bis zu 4 % des abgeschiedenen NH_3 -Stickstoffs als N_2O in die Atmosphäre gelangen können. Extrem hohe N_2O -Konzentrationen von rund 10 ppm, die in der Abluft eines Schweinestalls wenige Stunden nach Einleiten des kompletten ausgetauschten Wäscherwassers in die unterflur gelagerte Gülle gemessen wurden, deuten an, dass dies auch in der Praxis der Fall ist. Wäscher und Sickerwasser sollten separat von der Gülle gelagert und entsorgt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass mit einer flächendeckenden Einführung (50 % Anschlussgrad in der Schweine und Hühnerhaltung) der biologischen Abluftreinigung in der Tierhaltung nach der jetzigen Praxis die gesamten landwirtschaftlichen N_2O -Emissionen potenziell um rund 3 % erhöht würden. Hiermit entstünde ein zusätzliches Treibhausgaspotenzial von über 1,1 Mio. t CO_2 -Äquivalenten, was ca. 1,3 % der landwirtschaftlichen und etwa 0,11% der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland entspricht. Diese Spurengasbildung könnte durch Einsatz von Säurewäschern weitgehend vermieden werden. Durch die Abluftreinigung mit Säurewäschern würden bis zu 48 Mio. kg NH_3 weniger emittiert. Hierbei entstünden Vermeidungskosten, die sich je nach Kosten für Bau und Betrieb der Abluftreinigung mit Säurewäschern und unter Berücksichtigung des Wertes des zurückgewonnenen Stickstoffs auf 0,8 –1,9 €/kg NH_3 belaufen. Die Abluftreinigung mit Säurewäschern ist damit als eine sehr preiswerte Möglichkeit anzusehen, die NH_3 -Emissionen in der Landwirtschaft zu reduzieren.

Bei der Abluftreinigung ist somit der Einsatz von Säurewäschern, sowohl hinsichtlich der Reduktion von NH_3 -Emissionen als auch zur Vermeidung zusätzlicher Spurengasemissionen, unabhängig von der Art des Abluftreinigungssystems (Biofilter/Biowäscher/Kombisystem) oder dem Ziel der Abluftreinigung (Geruchs-/Staub-/ NH_3 -Abscheidung) zu empfehlen.

8 Literatur

- Anthonisen, A., R. Loehr, T. Prakasam & E. Srinath* (1976): Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *J. Wat. Pollut. Cont. Fed.* 48: 835-852.
- Bremner, J.M.* (1997): Sources of nitrous oxide in soils. *Nutrient Cycl. in Agroecosys.* 49 (1-3): 7-16.
- Choi, J.H., Y.H. Kim, D.J. Joo, S.J. Choi, T.W. Ha, D.H. Lee, I.H. Park & Y.S. Jeong* (2003): Removal of ammonia by biofilters: A study with flow-modified system and kinetics. *J. Air and Waste Manage. Assoc.* 53 (1): 92-101.
- Chung, Y.C. & C.P. Huang* (1998): Biotreatment of and ammonia in air by an immobilized *Nitrosomonas europaea* biofilter. *Environmental Progress* 17 (2): 70-76.
- Chung, Y.C., C.P. Huang, C.H. Liu & H.L. Bai* (2001): Biotreatment of hydrogen sulfide- and ammonia-containing waste gases by fluidized bed bioreactor. *J. Air and Waste Manage. Assoc.* 51 (1): 163-172.
- Clemens, J. & C. Cuhls* (2000): Emissionen von Treibhausgasen bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. *WLB Wasser Luft und Boden* 1/2: 51-53.
- Clemens, J. & C. Cuhls* (2003): Greenhouse gas emissions from mechanical and biological waste treatment of municipal waste. *Environ. Technol.* 24: 745-754.
- Dämmgen, U., P. Osterberg, H. Döhler, B. Eurich-Menden, W. Berg & R. Brunsch*, (2002): BMVEL/UBA-Emissionsinventar der Deutschen Landwirtschaft und Minderungs-szenarien bis zum Jahr 2010. – UBA-Texte 05/02. – Berlin.
- Delhomenie, MC., L. Bibeau, N. Bredin, S. Roy, S. Broussau, J.L. Kugelmass & M. Heitz* (2002): Biofiltration of air contaminated with toluene on a compost-based bed. *Advances in environmental ressearch* 6 (3): 239-254.
- Demeestere, K., H. Van Langenhove & E. Smet* (2002): Regeneration of a compost biofilter degrading high loads of ammonia by addition of gaseous methanol. *J. Air and Waste Manage. Assoc.* 52 (7): 796-804.
- Deshusses, M.A. & H.H.J. Cox* (1999): A cost benefit approach to reactor sizing and nutrient supply for biotrickling filters for air pollution control. *Environ. Prog.* 18 (3): 188-196.
- Döhler, H., U. Dämmgen, B. Eurich-Menden, B. Osterburg, M. Lüttich, W. Berg, A. Bergschmidt, W. Brunsch*, (2002): Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien sowie Erfassung und Prognose der Ammoniak-Emissionen der deutschen Landwirtschaft und Szenarien zu deren Minderung bis zum Jahre 2010. – Abschlussber. UBA-Vorhaben FKZ 29942245/02.
- Döhler, H., A. Bergschmidt, U. Dämmgen, B. Eurich-Menden, B. Osterburg, M. Lüttich*, (2003): Ist das Einhalten der Ammoniak-Emissionsminderungsziele Deutschlands ohne Viehbestandsabbau erreichbar? Vortrag, 6. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, 25.-27.03.2003 Vechta, Tagungsband, KTBL. ISBN 3-7843-2151-8.
- Frey, K.* (2004): Emission klimarelevanter Spurengase aus biologischer Abluftreinigung in der Schweinehaltung. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenernährung, Universität Bonn.

- Granli, T. & O. Bøckmann* (1994): Nitrous oxide from agriculture. Norwegian journal of agricultural sciences, supplement No. 12.
- Grimm, E.* (2005): Stand der Abluftreinigung für Tierhaltungsanlagen. Landtechnik 60/1: 36-37.
- Hahne, J. & K.-D. Vorlop* (2001): Treatment of waste gas from piggeries with nitrogen recovery. Landbauforschung Völkenrode 3 (51): 121-130.
- Hahne, J., S. Schirz & W. Schumacher* (2002): Leitfaden des Landkreises Cloppenburg zur Feststellung der Eignung von Abluftreinigungsanlagen in der Tierhaltung zur Anwendung in der Genehmigungspraxis und bei der Überwachung.
http://www.lkclp.de/2_kreisverwaltung/kv_ba_biofilter.shtml
- Hartikainen, T., J. Ruuskanen, M. Vanhatalo & P.J. Martikainen* (1996): Removal of ammonia from air by a peat biofilter. Environ. Technol. 17 (1): 45-53.
- Hwang, B.H., K.Y. Hwang, E.S. Choi, D.K. Choi & J.Y. Jung* (2000): Enhanced nitrite build-up in proportion to increasing alkalinity/ NH_4^+ ratio of influent in biofilm reactor. Biotechnol. Letters 22: 1287-1290.
- IPCC* (2000): Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Eds. *Penman, J.* et al., IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.
- Jorio, H., L. Bibeau & M. Heitz* (2000): Biofiltration of air contaminated by styrene: Effect of nitrogen supply, gas flow rate, and inlet concentration. Environ. Sci. Technol. 34(9): 1764-1771.
- Joshi, J.A., J.A. Hogan, R.M. Cowan, P.F. Strom & M.S. Finstein* (2000): Biological removal of ammonia in biofilters: Space travel and earth-based applications. J. Air and Waste Manage. Assoc. 50 (9): 1647-1654.
- Kim, H., Q. Xie, Y.J Kim & J.S. Chung* (2002): Biofiltration of ammonia gas with sponge cubes coated with mixtures of activated carbon and zeolite. Environ. Technol. 23 (8): 839-847.
- Kim, N.-J., M. Hirai & M. Shoda* (2000): Comparison of organic and inorganic packing materials in the removal of ammonia gas in biofilters. Journal of Hazardous Materials 72: 77-90.
- Kim, N.J., Y. Sugano, M. Hirai & M. Shoda* (2000): Removal characteristics of a high load ammonia gas by a biofilter seeded with a marine bacterium, *Vibrio alginolyticus*. Biotechnol. Letters 22: 1295-1299.
- Lais, S., Ed.* (1996): Untersuchungen zur Reduzierung der Ammoniak- und Geruchsemissionen aus der Schweinehaltung durch biologische Abluftwäscher. Forschungsbericht Agrartechnik. Hohenheim, Arbeitskreis Forschung und Lehre der Max-Ethyl-Gesellschaft Agrartechnik im VID Nr. 293 (VDI-MEG).
- Lee, E.Y., K.S. Cho, D.H. Han & H.W. Ryu* (2002): Hydrogen sulfide effects on ammonia removal by a biofilter seeded with earthworm casts. J. Environ. Qual. 31: 1782-1788.

- Liang, Y.K., X. Quan, J.W. Chen, J.S. Chung, J.Y. Sung, S. Chen, D.M. Xue & Y.Z. Zhao (2000): Long-term results of ammonia removal and transformation by biofiltration. *J. Hazard. Mater.* 80 (1-3): 259-269.
- Malhautier, L., C. Gracian, J.C. Roux, J.L. Fanlo & P. Le Cloirec (2003): Biological treatment process of air loaded with an ammonia and hydrogen sulfide mixture. *Chemosphere* 50 (1): 145-153.
- Morgenroth, E., E.D. Schroeder, D.P.Y. Chang & K.M. Scow (1996): Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane. *J. Air and Waste Manage. Assoc.* 46 (4): 300-308.
- Mosier, A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger & O. Van Cleemput (1998): Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 52 (2-3): 225-248.
- Nelson, D.W. & J.M. Bremner (1970): Gaseous products of nitrite decomposition in soils. *J. Soil Biol. Biogeo.* 2: 203-215.
- Osterburg, B. (2005): Daten zu NH₃-Emissionen aus der Tierhaltung. *Schriftl. Mitteilung.*
- Osterburg, B. & Bergschmidt, A. (2002): Politische Maßnahmen zur Reduzierung der Ammoniakemissionen aus der deutschen Landwirtschaft – Rahmenbedingungen, Berechnungsmethoden und politische Handlungsoptionen. *Agrarspectrum* 34:132-135.
- Paul, E.A. & F.E. Clark (1989): *Soil microbiology and biochemistry.* Academic Press, San Diego, USA.
- Prado, O.J., J.A. Mendoza, M.C. Veiga & C. Kennes (2002): Optimization of nutrient supply in a downflow gas-phase biofilter packed with an inert carrier. *Applied Microbiol. Biotech.* 59 (4-5): 567-573.
- Russow, R., A. John & H.U. Neue (2001): Bildung und Emission von Stickstoffmonoxid (NO) durch Schwarzerdeböden (Haplic Chernozem): Mechanistische Untersuchungen mit ¹⁵N. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 96II: 447-448.
- Schirz, S. (2003) Biologische Abluftreinigung in der Landwirtschaft. In: VDI (ed.): *Biologische Abgasreinigung, Gase, Gerüche, Keime.* VDI-Berichte 1777, S.55-64.
- Sheridan, B., T. Curran, V. Dodd & J. Colligan (2002): Biofiltration of odour and ammonia from a pig unit – a pilot-scale study. *Biosystems Engineering* 82 (4): 441-453.
- Sich, I. (1997): ¹⁵N-Traceruntersuchungen zur Nitrifikation/Denitrifikation, insbesondere zur Bildung von Stickstoffoxiden in Böden und wässrigen Medien. *Dissertation, UFZ-Bericht* 17, Halle.
- Smet, E., H. Van Langenhove & K. Maes (2000): Abatement of high concentrated ammonia loaded waste gases in compost biofilters. *Water, Air and Soil Pollution* 119 (1-4): 177-190.
- Statistisches Bundesamt (2005): *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei und tierische Erzeugung.* Fachserie 3 / Reihe 4. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2006): *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei – Viehhaltung der Betriebe Agrarstrukturerhebung 2005.* Fachserie 3 / Reihe 2.1.3. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

- Thierfeldt, H.* (2005): Laboruntersuchungen zur Spurengasbildung und Abbauleistung von Biofiltern unter Berücksichtigung der Temperatur und anderer Einflussfaktoren. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenernährung, Universität Bonn.
- Trimborn, M., H. Goldbach, J. Clemens, C. Cuhls & A. Breeger* (2003): Endbericht zum DBU-Forschungsvorhaben AZ: 15052, Reduktion von klimawirksamen Spurengasen in der Abluft von Biofiltern auf Bioabfallbehandlungsanlagen. Bonner Agrikulturchemische Reihe 14, ISBN 3-933865-30-1.
- Trimborn, M., J. Clemens, C. Cuhls, A. Breeger & M.I. Berkmen* (2002): Vermeidung treibhausrelevanter Emissionen und Optimierung des VOC-Abbaus bei MBA-Abluft. WLB Wasser, Luft und Boden 9: 46-47.
- Trimborn, M., S. Wulf, K. Frey, H. Thierfeldt, J. Clemens* (2005): Welchen Beitrag zum Umweltschutz leistet die Abluftreinigung in der Tierhaltung? VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 61/2006, Kongressband, 54-60.
- Umweltbundesamt – UBA* (2003): Umweltdaten Deutschland online. www.env-it.de/umweltdaten.
- Umweltbundesamt – UBA* (2005): Deutsches Treibhausgasinventar 1990 – 2003. Nationaler Inventarbericht 2005. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen. ISSN 0722-186X (<http://www.umwelt-bundesamt.de/klimaschutz/>).
- Van Cleemput, O. & A.H. Samater* (1996): Nitrite in soils: Accumulation and role in the formation of gaseous N compounds. Fertilizer Research 45 (1): 81-89.
- Van Cleemput, O. & L. Baert* (1984): Nitrite: a key compound in N loss processes under acid conditions? Plant and Soil 76: 233-241.
- Venterea, R.T. & D.E. Rolston* (2000): Mechanisms and kinetics of nitric and nitrous oxide production during nitrification in agricultural soil. Global Change Biol. 6 (3): 303-316.
- Villaverde, S., F. Fdz-Polanco & P.A. Garcia* (2000): Nitrifying biofilm acclimation to free ammonia in submerged biofilters. Start-up influence. Water Research 34 (2): 602-610.
- Wallmann, R., W. Müller, C. Cuhls, J. Clemens, S. Bahn, J. Frenzel, J. Hake & T. Turk* (2001): Überprüfung verschiedener Abluftbehandlungsverfahren- Ergebnisse großtechnischer Versuche aus dem ABZ Hannover. 62. Informationsgespräch des ANS e.V. am 25. und 26. September 2001, Kaiserslautern; 111-147.
- Wechhuysen, B., L. Vriens & H. Verachtert* (1993): The effect of nutrient supplementation on the biofiltration removal of Butanal in contaminated air. Appl. Microbiol. Biotech. 39 (3): 395-399.
- Wechhuysen, B., L. Vriens & H. Verachtert* (1994): Biotreatment of ammonia-containing and butanol-containing waste gases. Appl. Microbiol. Biotech. 42 (1):147-152.
- Weiske, A., A. Vabitsch, J.E. Olesen, K. Schelde, J. Michel, R. Friedrich & M. Kaltschmitt* (2006): Mitigation of greenhouse gas emissions in European conventional and organic dairy farming. Agriculture, Ecosystems and Environment 112:221-232
- Werner, W.* (2005): Nährstoffströme in der Landwirtschaft – Umweltrelevanz und Perspektiven. In: Handbuch Naturschutz und Landschaftspflege 15. Erg. Lfg. 4/05.

- Wicht, H. & M. Beier* (1995): N₂O-Emissionen aus nitrifizierenden und denitrifizierenden Kläranlagen. *Korr. Abw.* 42(3): 404-413.
- Wolf, I. & R. Russow* (2000): Different pathways of formation of N₂O, N₂ and NO in black earth soil. *Soil Biol. Biochem.* 32 (2): 229-239.
- Yamulki, S., R.M. Harrison, K.W.T. Goulding & C.P. Webster* (1997): N₂O, NO and NO₂ fluxes from a grassland: Effect of soil pH. *Soil Biol. Biochem.* 29 (8): 1199-1208.

9 Anhang

Tabellenübersicht

Tabelle A 1: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 1: Flächenbiofilter mit Holzhackschnitzel (Termin 1).

Tabelle A 2: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 1: Flächenbiofilter mit Holzhackschnitzel (Termin 2).

Tabelle A 3: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 2: Flächenbiofilter mit Strohschüttung (Termin 1).

Tabelle A 4: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 2: Flächenbiofilter mit Strohschüttung (Termin 2).

Tabelle A 5: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 3a: Flächenbiofilter mit Wurzelholz (Termin 1).

Tabelle A 6: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 3a: Flächenbiofilter mit Wurzelholz (Termin 2).

Tabelle A 7: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 3b: Flächenbiofilter mit Wurzelholz.

Tabelle A 8: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 3c: Flächenbiofilter mit Wurzelholz.

Tabelle A 9: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 4a: Rieselbettreaktor.

Tabelle A 10: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 4b: Rieselbettreaktor.

Tabelle A 11: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 5: 2-stufige Kombinationsanlage.

Tabelle A 12: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 6: 3-stufige Kombinationsanlage.

Tabelle A 13: Mittlere, minimale und maximale Temperaturen (°C) des Rohgases, Reingases und der Umgebungsluft während der Messzeiträume an den verschiedenen Abluftreinigungssystemen.

Tabelle A 1: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 1: Flächenbiofilter mit Holzhackschnitzel (Termin 1).

Werte in ppm**)	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
27.04.2004 19:30	8,29	5,08	0,525	0,747	0,096	0,304	81,3	76,0	1026	1113	38,05	38,04
27.04.2004 21:30	5,79	3,67	0,526	0,725	0,096	0,310	89,5	89,2	1332	1310	38,82	37,37
27.04.2004 23:30	7,84	3,81	0,500	0,682	0,087	0,284	78,3	86,2	985	1296	38,00	36,61
28.04.2004 01:30	5,62	3,25	0,504	0,710	0,084	0,275	82,3	84,9	1203	1238	37,78	34,63
28.04.2004 03:30	6,64	3,34	0,488	0,629	0,077	0,256	82,0	74,2	1083	1244	36,51	31,64
28.04.2004 05:30	5,74	4,24	0,473	0,597	0,070	0,229	81,0	66,6	1127	1169	34,25	27,65
28.04.2004 07:30	5,57	2,68	0,468	0,578	0,067	0,208	73,1	55,4	1034	1136	34,68	28,17
28.04.2004 09:30	6,30	3,81	0,498	0,651	0,079	0,234	79,6	63,7	1725	1526	33,85	28,50
28.04.2004 11:30	6,93	3,62	0,526	0,699	0,087	0,255	78,8	65,6	1566	1313	31,82	26,06
28.04.2004 13:30	9,59	3,39	0,508	0,703	0,091	0,246	74,1	67,1	1332	1366	32,22	25,18
28.04.2004 15:30	8,12	3,81	0,517	0,682	0,094	0,242	73,5	64,0	1294	1323	32,33	28,69
28.04.2004 17:30	9,48	3,29	0,513	0,708	0,088	0,252	79,0	69,6	1353	1381	34,77	32,40
28.04.2004 19:30	6,98	3,06	0,508	0,691	0,089	0,271	84,9	76,9	1454	1223	35,81	34,13
28.04.2004 21:30	7,21	2,68	0,516	0,661	0,081	0,256	86,2	79,4	1276	1316	37,08	36,08
28.04.2004 23:30	6,08	2,73	0,489	0,715	0,079	0,270	82,1	77,2	1048	1087	36,49	36,53
29.04.2004 01:30	7,61	3,01	0,497	0,709	0,081	0,313	84,3	79,8	1138	1157	37,97	36,76
29.04.2004 03:30	7,38	3,53	0,484	0,723	0,080	0,322	85,6	87,1	1271	1102	37,97	37,47
29.04.2004 05:30	5,85	2,64	0,516	0,711	0,087	0,334	89,6	86,3	1332	1215	38,53	37,68
29.04.2004 13:30			0,460	0,581			71,0	64,7	1242	1102	33,55	31,77
29.04.2004 19:30			0,444	0,645	0,087	0,382	54,9	81,8	1281	1055	34,76	32,82
30.04.2004 01:30	6,90	3,86	0,448	0,552	0,070	0,316	67,9	67,8	1062	1107	32,04	27,12
30.04.2004 07:30	6,03	3,39	0,438	0,583	0,065	0,293	60,8	65,4	994	1049	29,30	21,61
30.04.2004 13:30	6,21	3,34	0,419	0,506	0,077	0,285	40,8	54,2	903	860	29,94	24,19
30.04.2004 19:30	6,52	4,38	0,490	0,630	0,094	0,371	63,7	76,9	1192	1004	32,44	29,40
01.05.2004 01:30	6,99	2,92	0,434	0,566	0,086	0,335	60,5	72,5	1208	939	32,35	27,97
01.05.2004 07:30	5,97	3,29	0,438	0,588	0,076	0,347	60,3	74,9	1203	1048	34,51	26,62
01.05.2004 13:30	6,22	4,14	0,463	0,570	0,091	0,328	65,6	41,1	1209	810	34,76	25,68
01.05.2004 19:30	6,47	3,48	0,454	0,648	0,082	0,383	49,9	56,7	998	915	33,02	23,02
02.05.2004 01:30	6,06	3,20	0,421	0,582	0,077	0,301	51,7	61,8	942	880	33,55	22,45
02.05.2004 07:30	5,93	3,53	0,416	0,538	0,067	0,271	55,1	50,7	892	847	33,29	23,08
02.05.2004 13:30	6,17	2,82	0,411	0,581	0,068	0,321	50,5	57,5	1019	830	35,06	27,97
02.05.2004 19:30	5,57	2,78	0,448	0,684	0,071	0,396	52,7	77,3	983	1070	33,43	27,10
03.05.2004 01:30	5,34	2,82	0,402	0,577	0,071	0,350	55,8	50,4	593	914	36,14	29,49
03.05.2004 07:30	5,74	2,21	0,423	0,622	0,066	0,374	51,1	79,9	958	1097	34,63	33,85
03.05.2004 13:30	5,91	2,87	0,470	0,675	0,080	0,475	56,8	73,8	952	1086	36,57	32,70
03.05.2004 19:30	5,17	2,64	0,451	0,631	0,071	0,390	56,7	79,0	874	1160	37,12	30,50
04.05.2004 01:30	5,08	2,26	0,446	0,599	0,068	0,327	73,1	82,7	840	1005	42,61	36,57
04.05.2004 07:30	4,81	2,40	0,428	0,641	0,063	0,346	65,6	80,7	928	1120	42,52	38,89
2-Std.-Mittel	7,1	3,4	0,50	0,68	0,08	0,27	81,4	75,0	1254	1251	35,9	33,0
6-Std.-Mittel	5,9	3,1	0,44	0,60	0,08	0,35	58,2	67,5	1014	995	34,6	28,6
Wochenmittel*)	6,2	3,2	0,46	0,62	0,08	0,33	64,0	69,3	1074	1059	34,9	29,7
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	4,0	2,0	0,58	0,79	0,05	0,21	35,0	37,9	587	579	57,2	48,7
Bildung (mg Nm ⁻³)		-1,9		0,21		0,16		2,9		-8,2		-8,5
Bildung (%)		-49 %		36 %		323 %		8 %		-1%		-15 %

*) bei der Bildung des Wochenmittelwertes wurden die Einzelwerte gemäß ihrer Messdauer mit dem Faktor 2 bzw. 6 gewichtet.

**) VOC-Konzentrationen in ppm-Propanäquivalenten

Tabelle A 2: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 1: Flächenbiofilter mit Holzhackschnitzel (Termin 2).

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
20.09.2004 15:44	6,75	2,38	0,447	0,679			87,4	98,8	1014	1174	n.b.	n.b.
20.09.2004 17:44	6,02	2,28	0,438	0,676			80,5	99,6	1166	1252		
20.09.2004 19:44	5,91	2,4	0,442	0,595			83,1	71,4	1358	1119		
20.09.2004 21:44	5,76	1,84	0,397	0,640			64,5	102,8	856	1247		
20.09.2004 23:44	4,97	1,81	0,435	0,616	0,073	0,383	79,9	96,6	1009	1101		
21.09.2004 01:44	5,13	1,72	0,435	0,604	0,077	0,392	84,2	85,2	1163	930		
21.09.2004 03:44	5,76	1,72	0,427	0,587	0,076	0,399	72,7	74,8	968	982		
21.09.2004 05:44	4,82	1,6	0,431	0,595	0,077	0,417	77,2	83,8	1045	986		
21.09.2004 07:44	7,63	1,22	0,422	0,598	0,079	0,414	66,0	70,1	888	840		
21.09.2004 09:44	5,39	1,32	0,439	0,600	0,078	0,447	89,2	96,3	1159	1195		
21.09.2004 11:44	6,22	1,48	0,424	0,589	0,075	0,454	71,3	79,1	1119	995		
21.09.2004 13:44	7,16	1,48	0,455	0,620	0,071	0,493	78,2	99,7	1314	1295		
21.09.2004 15:44	6,22	1,32	0,424	0,582	0,069	0,528	74,6	62,4	1117	1026		
21.09.2004 17:44	6,75	1,88	0,444	0,618	0,060	0,476	80,7	86,7	1741	1300		
21.09.2004 19:44	5,76	2,47	0,459	0,656	0,059	0,504	88,2	101,2	1547	1254		
21.09.2004 21:44	5,91	1,36	0,466	0,658	0,059	0,536	86,7	109,7	1193	1232		
21.09.2004 23:44	5,03	1,27	0,500	0,646	0,066	0,520	87,5	97,8	1350	1210		
22.09.2004 01:44	5,58	1,46	0,456	0,624	0,067	0,506	86,5	97,2	1152	1140		
22.09.2004 03:44	7,01	1,93	0,446	0,628	0,066	0,498	83,9	99,5	1230	1069		
22.09.2004 05:44	7,68	1,51	0,467	0,667	0,072	0,526	92,3	103,3	1387	1170		
22.09.2004 16:29	7,37	2,21	0,430	0,573	0,060	0,576	86,9	71,9	1094	969		
22.09.2004 22:29	5,19	1,72	0,381	0,620	0,065	0,646	65,2	96,7	1118	1015		
23.09.2004 04:29	3,91	1,53	0,426	0,644	0,071	0,689	54,7	96,9	1073	989		
23.09.2004 10:29	4,34		0,424		0,068	0,569	66,8		907			
27.09.2004 13:00	4,12	1,76	0,461	0,620			96,3	77,2	1127	1080		
28.09.2004 12:20	6,18	1,91	0,514	0,635			105,2	75,5	1236	1168	45,77	29,32
28.09.2004 18:20	4,97	2,02	0,502	0,738			73,6	96,3	1523	1597	43,73	31,89
29.09.2004 00:20	4,97	1,84	0,471	0,718			87,7	109,2	1156	1406	38,32	34,61
29.09.2004 06:20	4,90	1,67	0,468	0,637			85,3	80,8	1228	1145		
29.09.2004 12:20	5,26	1,93	0,481	0,647			89,3	88,1	1221	1406		
29.09.2004 18:20	4,62	1,76	0,450	0,583			68,1	61,4	1374	1121		
30.09.2004 00:20	4,69	1,6	0,475	0,586			95,1	78,5	1406	1098		
30.09.2004 06:20	4,05	1,62	0,453	0,658			91,1	115,6	1239	1240		
30.09.2004 12:20	4,90	1,6	0,471	0,628			101,1	98,0	1472	1240		
30.09.2004 18:20	4,76	1,46	0,505	0,640			96,9	96,2	1304	1287		
01.10.2004 00:20	3,77	1,32	0,449	0,658			87,8	111,8	1016	1122		
01.10.2004 06:20	3,91	1,22	0,440	0,648			89,4	109,9	1009	1052		
01.10.2004 12:20	4,46		0,482				94,1		1078			
2-Std.-Mittel	6,1	1,7	0,44	0,62	0,07	0,47	80,7	90,8	1189	1126	n.b.	n.b.
6-Std.-Mittel	4,8	1,7	0,46	0,64	0,07	0,62	85,3	91,5	1199	1183	42,6	31,9
Wochenmittel	5,1	1,7	0,46	0,64	0,07	0,58	84,1	91,3	1196	1169	42,6	31,9
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	3,3	1,1	0,58	0,81	0,04	0,37	46,0	49,9	654	639	69,8	52,4
Bildung (mg Nm ⁻³)		-2,2		0,23		0,33		3,9		-15,0		-17,5
Bildung (%)		-67 %		39 %		767 %		9 %		-2 %		-25 %

Tabelle A 3: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 2: Flächenbiofilter mit Strohschüttung (Termin 1).

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
23.03.2004 16:30	16,24	10,18	0,440	0,662	0,024	0,233	12,5	18,1	1997	2542		
23.03.2004 18:30	17,79	14,97	0,432	0,623	0,018	0,254	6,4	16,6	1503	2125	8,10	5,22
23.03.2004 20:30	26,92	14,48	0,469	0,641	0,019	0,215	17,9	16,6	2704	1998	8,70	4,73
23.03.2004 22:30	27,44	2,99	0,492	0,627	0,021	0,259	19,0	16,5	2605	2094	9,78	5,61
24.03.2004 00:30	29,22	24,91	0,540	0,681	0,025	0,197	21,8	21,9	2757	3001	10,23	5,15
24.03.2004 02:30	29,51	21,81	0,525	0,651	0,017	0,209	21,6	21,8	2814	2547	9,86	3,87
24.03.2004 04:30	30,35	24,14	0,511	0,632	0,017	0,160	23,2	20,5	2861	2632	9,84	5,63
24.03.2004 06:30	29,84	24,91	0,458	0,692	0,013	0,288	20,8	22,3	2722	2913	9,47	7,03
24.03.2004 08:30	29,41	24,63	0,443	0,662	0,010	0,346	19,7	22,5	2679	2837	9,49	7,55
24.03.2004 10:30	27,11	22,23	0,432	0,647	0,009	0,428	17,4	22,4	2363	2727	7,77	6,59
24.03.2004 12:30	34,02	21,74	0,421	0,655	0,010	0,370	14,8	21,6	1992	2796	7,26	6,61
24.03.2004 14:30	33,60	22,44	0,420	0,627	0,009	0,393	13,1	21,6	1607	2806	6,94	6,44
24.03.2004 16:30	37,13	13,77	0,402	0,630	0,009	0,469	15,4	12,1	2122	1749	7,42	6,81
24.03.2004 18:30	25,22	14,83	0,421	0,565	0,011	0,455	15,1	13,8	2186	2044	7,73	7,05
24.03.2004 20:30	28,19	14,55	0,440	0,573	0,011	0,490	16,0	13,6	2434	2099	7,98	6,45
24.03.2004 22:30	30,07	6,30	0,435	0,627	0,013	0,504	16,4	19,9	2472	2486	8,54	7,33
25.03.2004 00:30	29,27	22,37	0,439	0,686	0,011	0,506	17,4	21,0	2478	2704	8,24	6,79
25.03.2004 02:30	30,35	27,10	0,427	0,604	0,011	0,501	17,6	16,3	2429	2170	8,53	7,13
25.03.2004 04:30	26,59	23,57	0,420	0,629	0,011	0,508	17,9	20,9	3097	2465	8,90	7,01
25.03.2004 06:30	26,68	22,52	0,414	0,664	0,010	0,482	19,1	20,2	2533	2289	9,02	6,52
25.03.2004 20:30	26,01	15,54	0,378	0,521	0,059	0,197	5,4	9,9	1151	1291	n.b.	n.b.
26.03.2004 02:30	32,95	15,40	0,497	0,494	0,045	0,203	26,8	9,0	2907	1172		
26.03.2004 08:30	32,19	5,38	0,467	0,577	0,041	0,186	13,5	15,8	1865	2016		
26.03.2004 14:30	29,37	28,93	0,443	0,581	0,052	0,237	15,7	18,7	2177	2081		
26.03.2004 20:30	31,87	16,59	0,467	0,606	0,033	0,281	23,5	18,8	2641	2205		
27.03.2004 02:30	30,24	17,16	0,441	0,673	0,026	0,307	28,2	24,2	3165	2406		
27.03.2004 08:30	33,60	24,49	0,420	0,650	0,027	0,272	29,2	26,4	3125	3172		
27.03.2004 14:30	33,28	32,95	0,499	0,573	0,030	0,144	17,4	16,3	1847	2014		
27.03.2004 20:30	26,12	30,48	0,449	0,577	0,022	0,180	12,8	17,9	1833	2308		
28.03.2004 02:30	20,16	25,19	0,405	0,578	0,019	0,189	15,7	16,9	1505	1983		
28.03.2004 08:30	20,70	26,32	0,413	0,591	0,021	0,193	13,9	21,0	1401	2298		
28.03.2004 14:30	20,70	24,14	0,405	0,600	0,018	0,194	13,3	17,2	1609	2154		
28.03.2004 20:30	21,24	27,10	0,483	0,646	0,019	0,179	14,9	19,3	1860	3854		
29.03.2004 02:30	18,75	21,81	0,426	0,629	0,025	0,185	15,5	19,7	1266	2351		
29.03.2004 08:30	19,08	11,80	0,397	0,579	0,018	0,189	15,1	18,0	1825	2020		
29.03.2004 14:30	18,97	24,14	0,449	0,591	0,016	0,163	11,8	14,6	1379	2061		
29.03.2004 20:30	22,33	16,52	0,457	0,611	0,021	0,285	15,7	12,5	2018	2061		
30.03.2004 02:30	25,25	12,93	0,453	0,696	0,024	0,325	21,6	17,1	2432	2464		
30.03.2004 08:30	32,52	25,90	0,460	0,722	0,027	0,237	21,7	23,1	2623	2891		
2-Std.-Mittel	28,2	18,7	0,45	0,64	0,01	0,36	17,2	19,0	2418	2451	8,6	6,3
6-Std.-Mittel	26,1	21,2	0,44	0,61	0,03	0,22	17,4	17,7	2033	2253	n.b.	n.b.
Wochenmittel	26,6	20,6	0,44	0,61	0,02	0,25	17,4	18,0	2129	2302	8,6	6,3
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	17,0	13,1	0,57	0,78	0,02	0,16	9,5	9,8	1163	1258	14,1	10,3
Bildung (mg Nm ⁻³)		-3,8		0,22		0,15		0,4		94,6		-3,8
Bildung (%)		-23 %		38 %		923 %		4 %		8 %		-27 %

Tabelle A 4: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 2: Flächenbiofilter mit Strohschüttung (Termin 2).

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
08.09.2004 17:04	1,98	1,41	0,342	0,402			12,9	13,1	485	718	6,19	6,25
08.09.2004 19:04	1,83	1,32	0,341	0,401			13,2	13,5	602	571	6,63	6,20
08.09.2004 21:04	1,71	1,74	0,361	0,390			12,4	12,9	428	591	6,38	6,20
08.09.2004 23:04	1,67	1,62	0,381	0,398			11,8	13,6	399	636	6,30	6,32
09.09.2004 01:04	1,62	1,46	0,398	0,447	0,073	0,383	13,1	14,4	590	681	6,44	6,72
09.09.2004 03:04	1,51	1,45	0,452	0,480	0,077	0,392	15,0	16,1	671	803	8,05	7,32
09.09.2004 05:04	1,61	1,46	0,457	0,474	0,076	0,399	15,5	19,0	788	899	9,03	8,56
09.09.2004 07:04	1,61	1,67	0,487	0,493	0,077	0,417	18,9	17,9	1089	995	9,52	7,62
09.09.2004 09:04	1,67	1,84	0,373	0,399	0,079	0,414	13,3	15,6	549	679	7,35	7,46
09.09.2004 11:04	1,93	1,84	0,363	0,393	0,078	0,447	13,3	14,8	703	672	7,61	7,72
09.09.2004 13:04	2,04	1,91	0,347	0,409	0,075	0,454	17,9	16,1	784	690	9,21	8,91
09.09.2004 15:04	1,88	1,86	0,375	0,487	0,071	0,493	18,7	16,1	756	709	9,54	8,92
09.09.2004 17:04	1,98	1,76	0,349	0,422	0,069	0,528	18,8	16,3	764	702	9,22	8,76
09.09.2004 19:04	1,78	1,31	0,376	0,424	0,060	0,476	16,5	14,8	589	695	7,33	7,36
09.09.2004 21:04	1,91	1,47	0,420	0,447	0,059	0,504	15,7	14,5	670	637	6,57	6,54
09.09.2004 23:04	1,76	1,25	0,435	0,444	0,059	0,536	15,6	15,3	568	706	6,47	6,38
10.09.2004 01:04	1,44	1,35	0,433	0,439	0,066	0,520	14,7	14,8	539	699	6,23	6,57
10.09.2004 03:04	1,30	1,18	0,390	0,424	0,067	0,506	16,4	15,6	804	641	6,78	6,53
10.09.2004 05:04	1,45	1,14	0,384	0,394	0,066	0,498	17,3	15,1	628	609	7,21	6,22
10.09.2004 07:04	1,34	1,15	0,386	0,429	0,072	0,526	17,1	17,3	747	652	6,93	6,54
10.09.2004 13:23	1,47	1,25	0,385	0,407	0,060	0,576	16,1	12,7	833	506	7,38	7,39
10.09.2004 19:23	1,23	1,22	0,404	0,429	0,065	0,646	15,4	14,9	732	585	7,14	7,06
11.09.2004 01:23	1,00	1,13	0,408	0,421	0,071	0,689	14,7	15,1	650	617	6,30	6,38
11.09.2004 07:23	1,29	1,21	0,378	0,406	0,068	0,569	9,8	12,4	479	560	6,84	6,49
11.09.2004 13:23	1,23	1,23	0,403	0,414			15,1	14,5	465	514	6,05	6,31
11.09.2004 19:23	0,88	1,05	0,363	0,418			11,2	11,6	551	516	6,39	6,65
12.09.2004 01:23	0,86	1,17	0,386	0,441			10,0	11,3	682	665	6,63	6,53
12.09.2004 07:23	0,86	1,16	0,400	0,398			14,4	13,4	589	496	5,10	4,87
12.09.2004 13:23	0,67	1,10	0,360	0,387			9,9	12,7	541	425	4,73	5,14
12.09.2004 19:23	0,58	0,95	0,349	0,388			8,4	11,0	538	423	5,53	5,65
13.09.2004 01:23	0,65	1,04	0,364	0,420			12,0	11,9	490	555	5,87	5,72
13.09.2004 07:23	0,78	0,91	0,385	0,408			12,5	11,8	801	624	5,47	4,56
13.09.2004 13:23	0,92	1,00	0,378	0,383			12,1	11,0	842	610	5,97	5,68
13.09.2004 19:23	0,66	0,99	0,388	0,393			12,1	10,7	570	506	5,57	5,58
14.09.2004 01:23	0,76	1,19	0,360	0,410			12,4	12,1	479	472	5,66	5,28
14.09.2004 07:23	0,72	1,11	0,373	0,413			12,1	11,7	563	610	5,28	4,78
14.09.2004 13:23	0,90	1,00	0,367	0,396			11,0	10,8	417	513	5,34	5,11
14.09.2004 19:23	0,79	0,99	0,376	0,437			11,8	11,3	467	534	5,08	5,10
15.09.2004 01:23	0,61	0,90	0,363	0,421			11,1	10,8	509	590	4,85	4,83
15.09.2004 07:23	0,90	0,98	0,366	0,412			11,0	10,7	460	567	4,76	4,59
2-Std.-Mittel	1,70	1,51	0,39	0,43	0,07	0,47	15,4	15,3	658	699	7,4	7,2
6-Std.-Mittel	0,89	1,08	0,38	0,41	0,07	0,62	12,2	12,1	583	544	5,8	5,7
Wochenmittel	1,09	1,19	0,38	0,42	0,07	0,58	13,0	12,9	602	583	6,2	6,1
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	0,70	0,76	0,49	0,53	0,04	0,37	7,1	7,1	329	319	10,2	9,9
Bildung (mg Nm ⁻³)		0,06		0,04		0,33		0,0		-10,1		-0,3
Bildung (%)		9%		9%		767%		0%		-3%		-3%

Tabelle A 5: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 3a: Flächenbiofilter mit Wurzelholz (Termin 1).

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
05.03.2004 12:30	25,17	16,83	0,399	0,796	0,084	0,142	66,4	106,0	1313	2028	74,52	23,68
05.03.2004 18:30	23,11	9,95	0,370	0,999	0,080	0,154	68,0	98,6	1255	1375	103,50	39,31
06.03.2004 00:30	27,52	11,44	0,407	1,379	0,074	0,164	158,8	188,1	1522	2203	105,67	43,41
06.03.2004 06:30	28,01	11,79	0,412	0,816	0,073	0,129	178,6	72,0	2015	1548	97,72	39,64
06.03.2004 12:30	23,85	11,87	0,333	1,000	0,076	0,201	17,6	71,4	932	1153	98,56	25,45
06.03.2004 18:30	22,18	10,45	0,362	1,460	0,084	0,276	36,8	104,2	1050	1897	101,83	33,21
07.03.2004 00:30	26,69	11,37	0,455	1,421	0,078	0,255	174,3	121,6	1790	1721	106,50	48,23
07.03.2004 06:30	26,59	12,01	0,390	1,322	0,076	0,215	64,5	152,9	1209	2249		
07.03.2004 12:30	25,22	11,87	0,424	1,142	0,072	0,246	93,8	70,3	1575	1765		
07.03.2004 18:30	19,73	6,05	0,345	1,318	0,070	0,170	19,2	69,9	896	1367		
08.03.2004 00:30	26,84	9,88	0,468	0,925	0,093	0,252	156,9	37,8	1907	1056		
08.03.2004 06:30	28,45	7,75	0,436	0,852	0,101	0,158	137,6	63,2	1750	1320		
08.03.2004 12:30	22,53	20,02	0,433	1,345	0,077	0,209	77,3	148,2	1519	2252		
08.03.2004 18:30	19,05	10,87	0,414	1,059	0,077	0,223	48,7	43,5	1362	1140		
09.03.2004 00:30	28,31	9,67	0,457	1,385	0,078	0,185	118,2	68,5	1775	1763		
09.03.2004 06:30	32,13	11,37	0,448	1,372	0,069	0,163	130,2	104,5	1940	2164		
09.03.2004 12:30	35,88	11,01	0,398	0,916	0,057	0,167	67,1	114,1	1438	2251		
09.03.2004 18:30	18,43	11,09	0,442	1,370	0,069	0,195	156,9	97,4	2072	1590		
10.03.2004 00:30	29,78	14,49	0,450	1,642	0,064	0,199	131,4	136,6	1742	1890		
10.03.2004 06:30	31,20	18,67	0,480	1,765	0,071	0,164	157,6	148,6	1818	2317		
10.03.2004 14:30			0,497	1,512			186,3	101,9	2779	1860	90,56	36,74
10.03.2004 17:30	32,75	11,37	0,456	1,800			153,9	120,2	2360	2279	130,83	43,41
10.03.2004 20:30	37,93	10,94	0,499	2,163			206,5	160,2	2450	2243	129,67	47,15
10.03.2004 23:30	36,85	10,73	0,382	1,430	0,037	0,123	91,1	95,8	1334	1543	148,89	53,95
11.03.2004 02:30	41,08	11,51	0,330	1,538	0,066	0,215	47,5	126,1	848	2101	145,06	46,79
11.03.2004 05:30	34,16	10,87	0,422	1,721	0,086	0,257	112,4	154,0	1541	1716	110,16	46,29
11.03.2004 08:30	35,15	10,09	0,313	1,668	0,096	0,211	12,7	144,6	578	2449	85,95	50,01
11.03.2004 11:30	35,39	11,23	0,327	1,349	0,090	0,274	17,4	163,4	551	2413	87,24	43,41
11.03.2004 14:30	39,86	10,38	0,410	1,653	0,106	0,258	62,1	58,7	1360	1399	60,72	27,38
11.03.2004 17:30	38,07	6,12	0,338	1,664	0,102	0,314	21,7	82,0	593	1678	97,89	36,80
11.03.2004 20:30	40,56	9,53	0,480	1,651	0,100	0,334	159,9	95,8	1874	1712	137,11	44,18
11.03.2004 23:30	44,66	6,55	0,544	1,938	0,094	0,314	231,3	123,8	2509	1676	128,88	44,57
12.03.2004 02:30	42,49	11,23	0,511	2,025	0,090	0,342	183,0	122,2	2028	1710	121,70	40,91
12.03.2004 05:30	32,09	8,89	0,533	2,355	0,086	0,382	211,5	124,3	2188	1953	114,15	50,49
12.03.2004 08:30	37,46	11,37	0,536	2,029	0,081	0,350	155,8	112,3	2724	2545		
12.03.2004 11:30	28,42	10,59	0,428	1,374	0,086	0,248	58,7	78,0	1540	2091		
2-Std.-Mittel	26,0	11,9	0,42	1,21	0,08	0,19	103,0	100,9	1544	1752	98	36
6-Std.-Mittel	37,1	10,1	0,44	1,74	0,09	0,28	119,5	116,4	1704	1961	113	44
Wochenmittel	34,4	10,6	0,43	1,61	0,08	0,26	115,4	112,5	1664	1908	110	42
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	21,9	6,7	0,55	2,05	0,05	0,16	63,0	61,5	909	1043	179,8	68,6
Bildung (mg Nm ⁻³)		-15,2		1,50		0,11		-1,5		133,8		-111,3
Bildung (%)		-69 %		272 %		208 %		-2 %		15 %		-62 %

Tabelle A 6: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 3a: Flächenbiofilter mit Wurzelholz (Termin 2).

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO ¹⁾		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
18.08.2004 17:48	11,25	7,11	0,399	1,164	0,034	0,323	37,5	53,3	550	864	28,54	20,40
18.08.2004 19:48	10,35	5,13	0,394	1,302			47,3	57,8	531	954	25,93	22,30
18.08.2004 21:48	10,68	5,08	0,409	1,317			51,6	47,1	498	935	29,21	20,52
18.08.2004 23:48	12,80	5,41	0,395	1,118			59,5	55,3	480	900	37,33	22,85
19.08.2004 01:48	13,18	5,65	0,394	1,459			63,8	49,8	892	937	31,97	19,32
19.08.2004 03:48	13,51	5,27	0,394	1,190			41,5	41,0	742	995	31,84	15,64
19.08.2004 05:48	15,58	5,74	0,389	1,213			56,4	52,6	923	1285	32,61	19,03
19.08.2004 07:48	15,15	6,82	0,384	1,216			34,0	46,8	750	1102	26,32	16,52
19.08.2004 09:48	17,51	7,01	0,382	0,793			51,8	34,3	907	770	28,79	14,39
19.08.2004 11:48	16,56	6,73	0,374	0,737			58,5	40,4	883	742	27,96	13,70
19.08.2004 13:48	19,29	5,55	0,376	0,612			44,5	20,9	790	573	17,58	11,51
19.08.2004 15:48	12,75	5,51	0,369	0,644			34,1	29,8	710	659	23,42	9,99
19.08.2004 17:48	12,94	5,69	0,367	0,942			51,5	35,1	712	804	22,01	13,84
19.08.2004 19:48	12,80	5,88	0,363	1,163			42,4	54,2	568	854	28,34	15,06
19.08.2004 21:48	13,84	4,56	0,399	1,367			57,1	44,9	917	1072	40,95	17,05
19.08.2004 23:48	18,45	6,12	0,397	1,385			62,8	51,2	924	1071	43,53	19,42
20.08.2004 01:48	19,72	6,4	0,413	1,343			66,8	46,6	1104	994	46,87	23,05
20.08.2004 03:48	19,25	6,45	0,401	1,436			66,2	51,0	1105	1074	35,21	22,87
20.08.2004 05:48	11,95	6,73	0,401	1,212			67,7	50,5	1141	1099	35,81	19,54
20.08.2004 07:48	17,51	5,18	0,381	1,206			52,9	57,1	1266	1160	39,87	18,56
20.08.2004 14:24	13,61	7,81	0,402	0,561	0,014	0,369	34,9	22,1	773	432	25,41	16,58
20.08.2004 20:24	10,79	6,35	0,394	1,130			37,3	37,4	775	885	41,12	20,05
21.08.2004 03:24	13,21	6,21	0,401	1,331			40,8	54,3	972	1115	38,73	17,09
21.08.2004 09:24	12,88	6,07	0,382	1,017			32,0	44,9	777	1123	29,70	13,24
21.08.2004 15:24	11,01	5,88	0,394	0,619			43,4	21,4	839	523	31,84	11,09
21.08.2004 21:24	11,07	5,04	0,377	0,693			11,7	25,3	578	594	47,91	16,51
22.08.2004 03:24	14,00	4,56	0,434	0,809			46,4	35,9	771	620	46,27	14,81
22.08.2004 09:24	12,54	4,94	0,395	0,789			46,8	33,5	1120	1039	34,03	21,85
22.08.2004 15:24	10,79	4,75	0,385	1,062			37,6	53,9	890	959	28,62	19,69
22.08.2004 21:24	8,87	3,11	0,397	0,987			46,1	48,8	797	826	54,01	19,52
23.08.2004 03:24	15,70	4,56	0,378	0,695			48,1	25,6	806	678	49,87	16,54
23.08.2004 09:24	14,12	5,22	0,377	1,174			46,9	44,3	1213	1358	30,49	17,04
23.08.2004 15:24	10,33	3,67	0,380	1,071			30,2	36,7	994	883	20,73	14,25
23.08.2004 21:24	8,98	3,67	0,370	1,234			25,7	49,5	616	847	35,69	20,85
24.08.2004 03:24	9,26	4,19	0,377	1,196			54,0	51,3	745	1005	32,60	18,56
24.08.2004 09:24	11,41	4,05	0,396	1,499			48,1	58,9	1314	1645	22,42	19,17
24.08.2004 15:24	9,83	1,65	0,412	1,000			24,5	44,1	788	844	25,10	14,37
24.08.2004 21:24	8,58	3,48	0,364	1,293			43,6	47,2	736	753	37,14	15,45
25.08.2004 03:24	10,45	3,58	0,364	0,755			52,6	37,6	837	591	33,28	11,61
25.08.2004 09:24	12,20	4,19	0,375	0,867			42,3	27,4	1208	1060	31,98	12,76
2-Std.-Mittel	14,8	5,9	0,39	1,14	0,03	0,32	52,4	46,0	820	942	31,7	17,8
6-Std.-Mittel	11,5	4,6	0,39	0,99	0,01	0,37	39,6	40,0	877	889	34,8	16,6
Wochenmittel	12,3	5,0	0,39	1,03	0,02	0,36	42,8	41,5	863	902	34,1	16,9
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	7,8	3,2	0,49	1,31	0,01	0,23	23,4	22,7	472	493	55,8	27,6
Bildung (mg Nm ⁻³)		-4,7		0,81		0,22		-0,7		21,5		-28,2
Bildung (%)		-60 %		165 %		1773 %		-3 %		5 %		-51 %

¹⁾ Wegen eines Defektes des NO_x-Analysators lagen nur einzelne Messwerte vor.

Tabelle A 7: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 3b: Flächenbiofilter mit Wurzelholz.

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
03.11.2004 17:30	22,57	4,45	0,591	1,240	0,106	0,421	56,0	31,9	1504	837	n.b.	n.b.
03.11.2004 19:30	23,40	4,11	0,574	1,120	0,114	0,410	45,1	33,8	1124	852		
03.11.2004 21:30	20,91	2,96	0,547	1,280	0,109	0,535	46,4	23,4	1094	658		
03.11.2004 23:30	20,29	2,80	0,525	1,431	0,118	0,606	41,2	59,5	1103	1087		
04.11.2004 01:30	19,46	2,54	0,498	1,547	0,113	0,628	35,4	68,6	1014	1394		
04.11.2004 03:30	19,46	2,24	0,535	1,923	0,119	0,771	48,5	76,5	904	1613		
04.11.2004 05:30	19,88	2,71	0,540	1,523	0,120	0,605	43,7	71,1	1022	1131		
04.11.2004 07:30	18,84	1,95	0,507	1,614	0,109	0,660	42,4	67,2	1140	1887		
04.11.2004 09:30	19,26	2,16	0,536	1,684	0,113	0,638	40,3	67,0	1170	1518		
04.11.2004 11:30	21,95	2,67	0,487	1,201	0,099	0,446	35,3	42,8	927	1185		
04.11.2004 13:30	23,81	3,77	0,438	1,260	0,083	0,422	22,0	23,7	762	618		
04.11.2004 15:30	20,71	3,05	0,449	1,446	0,079	0,512	20,5	53,6	877	1224		
04.11.2004 17:30	21,95	3,26	0,363	0,941	0,092	0,478	16,5	26,1	1011	827		
04.11.2004 19:30	21,74	2,67	0,414	1,215	0,095	0,494	34,9	48,2	1279	1014		
04.11.2004 21:30	19,46	2,24	0,387	1,466	0,091	0,640	17,6	59,5	1240	1169		
04.11.2004 23:30	20,91	2,46	0,390	1,339	0,103	0,533	19,2	53,8	1188	1111		
05.11.2004 01:30	20,71	1,91	0,361	0,950	0,121	0,517	19,9	29,5	1030	908		
05.11.2004 03:30	19,88	2,88	0,379	1,173	0,118	0,444	28,1	49,5	881	1232		
05.11.2004 05:30	23,19	2,33	0,401	1,122	0,121	0,403	35,2	47,2	911	768		
05.11.2004 07:30	18,84	2,03	0,362	1,114	0,089	0,385	15,4	44,1	852	1177		
05.11.2004 16:15	17,19	3,43	0,491	0,979	n.b.	n.b.	34,9	34,9	789	981	n.b.	n.b.
05.11.2004 22:15	17,70	4,64	0,571	1,200			49,7	31,5	1300	742		
06.11.2004 04:15	20,71	3,62	0,615	0,920			56,7	19,1	1201	938		
06.11.2004 10:15	17,70	3,68	0,551	0,902			42,0	28,5	1119	936		
06.11.2004 16:15	21,02	2,86	0,413	1,226			28,3	43,2	795	1043		
06.11.2004 22:15	14,60	2,77	0,597	1,133			61,0	44,2	1336	1012		
07.11.2004 04:15	14,29	2,88	0,514	1,236			40,3	55,5	907	1058		
07.11.2004 10:15	14,08	2,73	0,581	1,018			59,3	35,8	1250	1002		
07.11.2004 16:15	12,84	2,63	0,469	1,020			34,8	26,8	838	931		
07.11.2004 22:15	18,84	3,05	0,695	1,360			71,1	57,0	1600	1163		
08.11.2004 04:15	9,42	2,94	0,631	1,200			71,5	52,3	1222	1110		
08.11.2004 10:15	16,56	2,26	0,590	1,220			42,2	62,8	1316	1543		
08.11.2004 16:15	14,29		0,618				46,5		1270			
08.11.2004 22:15												
09.11.2004 04:15												
2-Std.-Mittel	20,9	2,8	0,46	1,33	0,11	0,53	33,2	48,8	1052	1111	n.b.	n.b.
6-Std.-Mittel	16,1	3,1	0,56	1,12			49,1	41,0	1149	1038	n.b.	n.b.
Wochenmittel	17,3	3,0	0,54	1,17	0,11	0,53	45,1	42,9	1125	1056	n.b.	n.b.
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	11,0	1,9	0,69	1,49	0,07	0,34	24,7	23,5	615	577	n.b.	n.b.
Bildung (mg Nm ⁻³)		-9,1		0,81		0,27		-1,2		-37,5		
Bildung (%)		-82 %		117 %		400 %		-5 %		-6 %		

Tabelle A 8: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 3c: Flächenbiofilter mit Wurzelholz.

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
27.10.2004 17:30	14,29	2,42	0,345	0,455	n.b.	n.b.	38,2	17,3	831	465	n.b.	n.b.
27.10.2004 19:30	13,33	2,63	0,328	0,447			32,1	19,7	590	493		
27.10.2004 21:30	10,24	2,30	0,328	0,450			35,4	25,6	528	717		
27.10.2004 23:30	10,03	1,99	0,338	0,440			58,2	30,0	676	370		
28.10.2004 01:30	9,49	1,93	0,338	0,435			46,6	34,2	512	482		
28.10.2004 03:30	10,29	2,09	0,345	0,452			76,4	60,5	504	596		
28.10.2004 05:30	10,72	2,09	0,347	0,462			61,0	63,3	694	744		
28.10.2004 07:30	15,03	1,78	0,341	0,463			33,3	38,9	748	898		
28.10.2004 09:30	10,03	1,76	0,344	0,478			64,8	55,6	880	443		
28.10.2004 11:30	10,35	2,02	0,345	0,473			55,3	63,5	601	609		
28.10.2004 13:30	11,09	2,58	0,352	0,490			83,2	109,8	732	914		
28.10.2004 15:30	11,73	2,35	0,356	0,495			38,1	82,3	644	880		
28.10.2004 17:30	10,19	2,39	0,354	0,487			75,8	85,3	705	894		
28.10.2004 19:30	9,97	2,12	0,361	0,504			64,1	100,2	601	810		
28.10.2004 21:30	10,03	1,89	0,352	0,502			60,5	88,6	901	782		
28.10.2004 23:30	10,08	1,84	0,350	0,527			73,7	87,6	598	941		
29.10.2004 01:30	9,60	1,79	0,356	0,493			54,4	84,8	517	773		
29.10.2004 03:30	10,19	1,94	0,348	0,479			60,7	70,6	651	840		
29.10.2004 05:30	9,97	1,28	0,339	0,455			67,9	68,8	589	716		
29.10.2004 07:30	8,96	1,74	0,343	0,476			56,1	53,6	665	597		
29.10.2004 15:00	11,21	2,82	0,366	0,483	n.b.	n.b.	81,3	88,6	958	1060	85,21	60,01
29.10.2004 21:00	11,98	3,53	0,349	0,420			86,0	110,1	923	965	86,89	64,57
30.10.2004 03:00	11,90	3,08	0,364	0,439			98,9	52,2	955	854	90,38	67,65
30.10.2004 09:00	12,29	3,15	0,368	0,494			86,3	105,9	866	1021	91,63	60,51
30.10.2004 15:00	11,52	2,79	0,352	0,572			64,9	103,0	1045	1166	91,50	56,55
30.10.2004 21:00	11,25	2,49	0,361	0,542			96,1	97,8	796	743	93,37	58,21
31.10.2004 03:00	11,09	2,71	0,349	0,484			49,4	115,2	721	1010	97,56	65,21
31.10.2004 09:00	10,82	2,58	0,352	0,507			107,9	91,3	912	975	82,98	54,09
31.10.2004 15:00	10,44	2,44	0,357	0,527			59,1	82,6	727	1066	87,38	63,61
31.10.2004 21:00	11,13	2,75	0,344	0,586			75,6	145,6	753	1232	98,71	74,59
01.11.2004 03:00	8,96	2,77	0,352	0,480			119,5	154,5	837	1383	101,16	76,08
01.11.2004 09:00	11,59	2,31	0,361	0,458			68,2	130,1	856	1348	92,19	66,85
01.11.2004 15:00	10,36	3,09	0,382	0,517	0,195	0,373	90,3	116,8	958	1183	99,59	69,67
01.11.2004 21:00	9,28	2,91	0,356	0,450	0,237	0,443	101,6	109,2	1054	1026	99,67	63,80
02.11.2004 03:00	10,65	2,67	0,336	0,445	0,246	0,433	92,4	111,3	821	948	95,49	56,81
02.11.2004 09:00	8,11	1,90	0,373	0,476	0,242	0,428	115,3	115,6	1112	1263	93,94	50,70
02.11.2004 15:00	9,70	2,14	0,395	0,529	0,211	0,423	74,5	79,2	1030	987	96,42	50,19
02.11.2004 21:00	7,90	2,75	0,357	0,463	0,219	0,451	103,9	89,8	1076	1201	91,24	48,40
03.11.2004 03:00	10,94	2,70	0,369	0,646	0,254	1,308	103,7	112,1	1145	1171	93,08	64,55
03.11.2004 09:00	11,17	2,67	0,396	0,611	0,431	1,798	92,2	80,2	946	1126	78,90	46,30
2-Std.-Mittel	10,8	2,0	0,35	0,47			56,8	62,0	658	698		
6-Std.-Mittel	10,6	2,7	0,36	0,51	0,25	0,71	88,4	104,6	925	1086	92,4	60,9
Wochenmittel	10,7	2,5	0,36	0,50	0,25	0,71	80,5	93,9	858	989	92,4	60,9
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	6,8	1,6	0,46	0,64	0,16	0,45	44,0	51,3	469	541	151,4	99,9
Bildung (mg Nm ⁻³)		-5,2		0,18		0,29		7,4		71,8		-51,6
Bildung (%)		-76 %		39 %		178 %		17 %		15 %		-34 %

Tabelle A 9: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 4a: Rieselbettreaktor.

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
18.02.2004 18:30	2,51	2,17	0,399	1,053	0,096	0,254	51,0	43,8	2498	2305	n.b.	n.b.
18.02.2004 21:30	2,28	2,17	0,400	1,180	0,070	0,191	31,7	46,0	2393	2939		
19.02.2004 00:30	2,19	2,71	0,382	1,286	0,067	0,173	36,8	41,3	2429	2253		
19.02.2004 03:30	2,93	2,47	0,392	1,110	0,079	0,195	48,5	39,4	2572	2285		
19.02.2004 06:30	2,05	2,65	0,396	1,132	0,087	0,213	42,6	48,4	2765	3074		
19.02.2004 09:30	2,88	2,83	0,398	1,022	0,091	0,205	30,8	37,2	2740	2905		
19.02.2004 12:30	2,42	2,47	0,380	1,076	0,094	0,202	43,5	45,1	2741	2706		
19.02.2004 15:30	2,42	2,98	0,403	1,169	0,088	0,210	39,0	39,1	2794	2829		
19.02.2004 18:30	1,40	2,05	0,410	1,112	0,089	0,226	60,2	74,8	3154	2953		
19.02.2004 21:30	1,86	1,69	0,392	1,125	0,081	0,213	52,6	43,9	2615	2542		
20.02.2004 00:30	1,58	2,41	0,388	1,159	0,079	0,225	54,5	59,4	2992	2965		
20.02.2004 03:30	1,63	2,41	0,386	1,143	0,081	0,261	37,6	39,5	2714	2701		
20.02.2004 06:30	1,44	2,23	0,390	1,142	0,080	0,269	42,6	42,1	2982	2796		
20.02.2004 09:30	1,53	2,11	0,384	1,097	0,087	0,278	41,2	42,1	2855	2953		
20.02.2004 21:30	1,27	1,59	0,393	1,057			40,5	45,9	2144	2468	31,24	23,41
21.02.2004 03:30	1,51	1,54	0,377	1,029	0,087	0,319	55,1	67,7	2126	2381	33,86	26,54
21.02.2004 09:30	1,83	1,82	0,401	1,012	0,070	0,263	61,1	59,6	2697	2626	22,69	20,01
21.02.2004 15:30	1,99	2,16	0,385	0,808	0,065	0,244	49,0	42,1	2929	1926	23,11	30,15
21.02.2004 21:30	2,39	1,54	0,411	0,739	0,077	0,237	70,4	54,8	2868	1727	31,40	33,88
22.02.2004 03:30	2,15	1,71	0,381	0,891	0,094	0,309	57,4	49,7	2890	2218	39,72	30,35
22.02.2004 09:30	2,31	1,76	0,345	1,064	0,086	0,279	88,0	74,7	2704	2507	23,68	32,51
22.02.2004 15:30	3,03	2,10	0,384	0,941	0,076	0,289	44,1	46,1	2643	2884	19,45	26,11
22.02.2004 21:30	2,23	1,76	0,411	1,008	0,091	0,273	59,4	81,2	2666	2598	31,79	35,25
23.02.2004 03:30	2,31	0,29	0,392	0,792	0,082	0,319	88,0	69,5	2863	2053	34,41	33,63
23.02.2004 09:30	2,47	1,31	0,408	0,952	0,077	0,251	80,5	69,2	3196	2932	20,06	28,37
23.02.2004 15:30	2,39	1,82	0,396	1,065	0,067	0,226	27,3	53,2	1701	2835	22,18	26,74
23.02.2004 21:30	1,99	1,54	0,373	0,835	0,068	0,267	83,6	56,4	2788	2290	32,96	30,07
24.02.2004 03:30	2,47	1,48	0,400	0,941	0,071	0,330	61,4	48,9	2734	2763	29,17	33,06
24.02.2004 09:30	1,83	1,88	0,409	1,055	0,071	0,292	69,3	74,0	2942	3361		
24.02.2004 15:30	2,95	2,27	0,391	0,967	0,066	0,312	32,3	63,2	2483	2737		
24.02.2004 21:30	2,47	1,82	0,413	1,016	0,080	0,396	50,0	81,0	2349	2802		
25.02.2004 03:30	2,31	2,10	0,440	0,960	0,071	0,325	53,4	85,2	2252	2729		
25.02.2004 09:30	2,39	1,65	0,393	0,993	0,068	0,272	33,6	49,0	2376	2971		
2-Std.-Mittel	2,1	2,4	0,39	1,13	0,08	0,22	43,8	45,9	2732	2729		
6-Std.-Mittel	2,2	1,7	0,39	0,95	0,08	0,29	58,1	61,7	2597	2569	28,3	29,3
Wochenmittel	2,2	1,9	0,39	1,00	0,08	0,27	54,5	57,7	2631	2609	28,3	29,3
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	1,4	1,2	0,50	1,27	0,05	0,17	29,8	31,5	1438	1426	46,3	48,0
Bildung (mg Nm ⁻³)		-0,2		0,77		0,12		1,7		-12,1		1,7
Bildung (%)		-15 %		153 %		250 %		6 %		-1 %		4 %

Tabelle A 10: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtrertyp 4b: Rieselbettreaktor.

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
13.07.2004 15:54	34,24	15,56	0,415	0,871			55,8	55,4	1722	1511	24,13	23,37
13.07.2004 17:54	40,74	16,36	0,378	0,915			44,4	60,6	1627	1788	24,41	23,43
13.07.2004 19:54	39,86	16,84	0,388	0,877			52,0	60,8	1426	1692	22,52	22,96
13.07.2004 21:54	37,96	15,28	0,397	0,901			47,2	52,1	1483	1542	27,59	25,46
13.07.2004 23:54	34,96	14,44	0,412	0,859	0,037	0,163	57,1	57,3	1723	1636	29,44	27,49
14.07.2004 01:54	34,17	13,56	0,380	0,898	0,044	0,209	70,2	69,9	1540	1811	30,10	28,43
14.07.2004 03:54	35,69	13,84	0,429	0,966	0,044	0,221	72,0	71,4	1662	1505	29,55	28,28
14.07.2004 05:54	41,50	14,60	0,425	0,822	0,043	0,232	82,4	56,8	1868	1279	28,93	27,78
14.07.2004 07:54	36,64	14,44	0,405	0,866	0,041	0,224	77,0	66,6	1674	1629	28,74	26,79
14.07.2004 09:54	44,46	18,44	0,453	1,049	0,041	0,220	65,8	72,8	1942	1903	28,50	27,27
14.07.2004 11:54	43,01	16,08	0,432	0,936	0,040	0,183	71,4	71,3	1802	1862	24,45	20,08
14.07.2004 13:54	34,87	15,84	0,392	0,791	0,037	0,173	54,9	53,3	1383	1525	20,30	18,81
14.07.2004 15:54	39,92	17,20	0,397	0,815	0,033	0,177	47,4	52,4	1335	1350	20,15	19,28
14.07.2004 17:54	38,91	16,76	0,408	0,869	0,030	0,232	53,3	53,7	1436	1652	25,90	23,70
14.07.2004 19:54	39,98	17,44	0,404	0,929	0,028	0,308	68,6	57,8	2040	1517	26,08	23,28
14.07.2004 21:54	39,10	15,12	0,417	1,016	0,027	0,313	45,9	62,4	1446	1703	25,89	22,31
14.07.2004 23:54	38,97	14,76	0,415	0,940	0,028	0,308	63,8	59,0	1686	1726	24,98	22,44
15.07.2004 01:54	36,57	15,04	0,394	0,920	0,027	0,303	61,6	59,1	1707	1420	25,16	23,22
15.07.2004 03:54	36,32	14,56	0,440	0,996			62,7	64,4	1644	1548	24,96	22,82
15.07.2004 05:54	37,27	15,04	0,419	0,945	0,026	0,280	59,3	61,6	1528	1597	26,56	25,46
15.07.2004 14:07	40,60	16,68	0,390	0,851	0,018	0,238	52,8	48,2	1536	1277	20,11	18,42
15.07.2004 20:07	45,65	14,36	0,373	0,871	0,018	0,253	26,0	54,1	1134	1307	23,29	20,30
16.07.2004 02:08	39,48	13,36	0,372	0,897	0,018	0,255	43,2	41,9	1097	1166	22,04	19,82
16.07.2004 08:07	43,03	15,68	0,364	0,753	0,015	0,243	35,5	40,9	1010	1156	22,58	20,61
16.07.2004 14:08	42,50	15,32	0,385	0,814	0,014	0,243	32,3	37,1	1171	1196	20,72	18,67
16.07.2004 20:07	38,04	14,08	0,405	0,963	0,016	0,252	46,9	51,7	1473	1408	21,55	18,58
17.07.2004 02:08	35,68	13,80	0,380	0,874	0,021	0,246	47,4	46,7	1476	1180	23,11	19,49
17.07.2004 08:07	30,50	15,28	0,389	0,732	0,015	0,279	44,3	32,1	1310	984	19,32	18,52
17.07.2004 14:08	36,21	14,24	0,382	0,867	0,018	0,301	43,3	39,8	1105	1018	18,42	17,57
17.07.2004 20:07	36,21	14,72	0,410	0,896	0,016	0,273	41,0	43,5	1234	1158	19,76	17,46
18.07.2004 02:08	29,78	13,04	0,367	0,836	0,016	0,231	44,7	46,7	1012	975	22,04	19,96
18.07.2004 08:07	35,03	14,44	0,396	0,825	0,015	0,208	46,9	52,8	1232	1147	21,16	19,44
18.07.2004 14:08	33,06	13,80	0,384	0,827	0,011	0,229	38,0	48,8	901	1188	19,27	19,15
18.07.2004 20:07	32,27	14,44	0,399	0,895	0,017	0,237	41,3	49,8	1029	1085	20,47	19,09
19.07.2004 02:08	28,34	12,20	0,403	0,742	0,017	0,206	48,6	38,5	1102	1016	21,75	19,73
19.07.2004 08:07	31,62	13,48	0,369	0,821	0,016	0,187	28,3	79,3	1152	1460	21,63	19,19
19.07.2004 14:08	34,63	12,50	0,386	0,749	0,011	0,178	44,4	48,7	1128	1349	18,77	17,43
19.07.2004 20:07	35,68	13,16	0,386	0,730	0,018	0,181	40,7	46,4	1205	1413	20,71	18,51
20.07.2004 02:08	32,01	11,92	0,396	0,756	0,021	0,183	50,7	53,4	1389	1455	24,76	22,55
20.07.2004 08:07	34,11	15,56	0,428	0,803	0,020	0,160	51,6	61,1	1931	1778	23,94	21,05
2-Std.-Mittel	38,3	15,6	0,41	0,91	0,04	0,24	60,6	60,9	1634	1610	25,9	24,1
6-Std.-Mittel	35,7	14,1	0,39	0,83	0,02	0,23	42,4	48,1	1231	1236	21,3	19,3
Wochenmittel	36,4	14,5	0,39	0,85	0,02	0,23	46,9	51,3	1332	1329	22,4	20,5
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	23,2	9,2	0,50	1,08	0,01	0,15	25,7	28,0	728	726	36,8	33,6
Bildung (mg Nm ⁻³)		-14,0		0,58		0,13		2,4		-1,4		-3,2
Bildung (%)		-60 %		115 %		990 %		9 %		0 %		-9 %

Tabelle A 11: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 5: 2-stufige Kombinationsanlage.

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
25.11.2003 20:30	22,38	17,32	0,589	0,752	0,160	0,337	15,2	18,2	2059	2075	83,41	78,37
25.11.2003 23:30	24,45	17,63	0,545	0,704	0,142	0,293	18,3	18,0	2054	2197	83,89	77,52
26.11.2003 02:30	24,65	18,20	0,717	0,671	0,149	0,294	15,2	17,3	1739	1830	78,89	77,23
26.11.2003 05:30	24,05	15,62	0,630	0,695	0,157	0,295	16,1	17,6	1703	1980	84,28	80,46
26.11.2003 08:30	24,18	19,14	0,529	0,714	0,133	0,295	18,4	18,5	1914	1986	84,18	77,16
26.11.2003 11:30	22,91	17,95	0,504	0,637	0,153	0,231	15,2	14,8	1909	1648	66,34	61,77
26.11.2003 14:30	21,11	16,44	0,508	0,629	0,170	0,239	15,0	14,6	1903	1654	66,27	62,80
26.11.2003 17:30	19,44	16,13	0,481	0,677	0,140	0,257	14,7	14,9	1929	1948	65,79	63,86
26.11.2003 20:30	25,99	16,25	0,483	0,691	0,132	0,255	16,1	16,0	2078	2069	68,77	67,27
26.11.2003 23:30	23,72	15,69	0,462	0,648	0,123	0,234	16,9	16,2	2164	1961	70,79	67,52
27.11.2003 02:30	23,31	16,82	0,455	0,627	0,119	0,233	16,9	15,8	1882	1910	71,54	68,85
27.11.2003 05:30	28,13	17,63	0,458	0,639	0,128	0,256	18,3	16,8	1877	1916	78,05	73,73
27.11.2003 08:30	23,45	16,82	0,421	0,661	0,135	0,292	19,1	18,2	1872	2095	81,83	75,40
27.11.2003 14:00	19,05	17,95	0,554	0,678	n.b.	n.b.	19,3	17,2	2151	1789	n.b.	n.b.
27.11.2003 20:00	17,28	21,27	0,537	0,701			17,0	16,2	2117	1881		
28.11.2003 02:00	20,97	21,46	0,626	0,676			15,3	16,7	1876	1882		
28.11.2003 08:00	19,53	17,95	0,540	0,612			17,0	17,4	1902	1770		
28.11.2003 14:00			0,524	0,624			15,5	15,9	2017	1771		
28.11.2003 20:00	16,80	14,75	0,532	0,642			16,3	16,2	2042	2024		
29.11.2003 02:00	16,72	13,36	0,524	0,676			20,0	10,3	2243	1454		
29.11.2003 08:00	19,85	14,37	0,558	0,597			17,6	21,5	1976	2142		
29.11.2003 14:00	19,45	21,27	0,475	0,627			18,5	19,3	2205	2144		
29.11.2003 20:00	18,40	15,69	0,486	0,622			17,0	18,1	2201	2100		
30.11.2003 02:00	20,97	15,31	0,465	0,573			14,5	16,3	1849	1871		
30.11.2003 08:00	20,01	17,13	0,462	0,579			15,8	16,5	1731	1827		
30.11.2003 14:00												
30.11.2003 20:00	17,92	16,31	0,469	0,597			13,6	14,0	1868	1783		
01.12.2003 02:00	17,92	15,31	0,425	0,567			13,4	14,0	1807	1737		
01.12.2003 08:00	18,00	15,56	0,415	0,567			15,2	15,7	1719	1645		
01.12.2003 14:00	19,85	16,50	0,419	0,599			14,7	14,3	1829	1738		
01.12.2003 20:00	20,09	16,63	0,436	0,654			16,1	17,6	2222	2188		
02.12.2003 02:00	17,28	14,93	0,439	0,572			15,1	16,1	1851	1927		
02.12.2003 08:00	18,56	15,06	0,419	0,580			15,9	17,4	1766	1832		
2-Std.-Mittel	23,7	17,0	0,52	0,67	0,14	0,27	16,6	16,7	1929	1944	75,7	71,7
6-Std.-Mittel	18,8	16,7	0,49	0,62			16,2	16,3	1967	1869		
Wochenmittel	20,0	16,8	0,50	0,63	0,14	0,27	16,3	16,4	1958	1887	75,7	71,7
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	12,8	10,7	0,63	0,81	0,09	0,17	8,9	9,0	1070	1031	124,1	117,5
Bildung (mg Nm ⁻³)		-2,1		0,17		0,08		0,1		-38,3		-6,6
Bildung (%)		-16 %		27 %		91 %		1 %		-4 %		-5 %

Tabelle A 12: Ergebnisse der Gasmessungen an Filtertyp 6: 3-stufige Kombinationsanlage.

Werte in ppm	NH ₃		N ₂ O		NO		CH ₄		CO ₂		VOC	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
10.01.2005 11:30	23,27	16,09	9,75	10,65	n.b.	n.b.	94,8	80,0	2219	1927	n.b.	n.b.
11.01.2005 11:15	25,55	18,31	0,501	0,487	n.b.	n.b.	72,3	79,7	1907	2181	n.b.	n.b.
11.01.2005 13:15	22,39	13,46	0,503	0,429			79,6	96,1	1962	2034		
11.01.2005 15:15	25,76		0,465				77,9		1812			
11.01.2005 16:45	34,23	12,19	0,400	0,410			79,9	90,9	1703	1958		
11.01.2005 18:45	24,48	2,59	0,425	0,400			91,3	99,4	1426	1812		
11.01.2005 20:45	24,55	10,92	0,426	0,425			100,8	94,9	1651	1751		
11.01.2005 22:45	28,45	11,20	0,448	0,387			100,4	101,1	2154	1515		
12.01.2005 00:45	21,59	9,08	0,409	0,376			90,6	101,3	1481	1610		
12.01.2005 02:45	23,54	12,38	0,428	0,383			115,6	95,5	1647	1396		
12.01.2005 04:45	27,10	11,95	0,411	0,379			114,3	89,1	1847	1539		
12.01.2005 06:45	31,87	12,85	0,404	0,415			92,5	94,0	1459	2234		
12.01.2005 08:45	26,76	13,98	0,384	0,391			65,7	73,4	2036	1804		
12.01.2005 10:45	26,23	5,69	0,397	0,416			85,0	92,6	1924	1925		
2-Std.-Mittel	23,3	16,1	9,75	10,65	n.b.	n.b.	94,8	80,0	2219	1927	n.b.	n.b.
6-Std.-Mittel	26,3	11,2	0,43	0,41	n.b.	n.b.	89,7	92,3	1770	1813	n.b.	n.b.
Wochenmittel	25,6	12,4	2,76	2,97	n.b.	n.b.	91,0	89,3	1882	1842	n.b.	n.b.
Mittelwert in mg N/C Nm ⁻³	16,3	7,9	3,52	3,78	n.b.	n.b.	49,7	48,8	1028	1006	n.b.	n.b.
Bildung (mg Nm ⁻³)		-8,4		0,27		n.b.		-0,9		-22		n.b.
Bildung (%)		-51 %		8 %		n.b.		-2 %		-2 %		n.b.
mg N/C Nm ⁻³			0,55	0,52		(nur 6-h-Mittel)						
Bildung (mg Nm ⁻³)				-0,03								
Bildung (%)				-5 %								

Tabelle A 13: Mittlere, minimale und maximale Temperaturen (°C) des Rohgases, Reingases und der Umgebungsluft während der Messzeiträume an den verschiedenen Abluftreinigungssystemen.

Typ Filter	Alter bei Messung	Messung	Parameter	Rohgas	Reingas	Umgebung
1 Biofilter/Holzhack	>100 Mon.	April 04	Mittel	20,4	14,8	12,9
			Min	14,5	9,8	3,9
			Max	26,9	19,5	22,1
1 Biofilter/Holzhack	>100 Mon.	September 04	Mittel	19,2	15,5	11,3
			Min	16,0	12,0	7,7
			Max	23,1	19,5	17,1
2 Biofilter/Stroh	21 Mon.	März 04	Mittel	n.b.	11,4	n.b.
			Min		6,2	
			Max		15,1	
2 Biofilter/Stroh	27 Mon.	September 04	Mittel	21,5	17,9	16,0
			Min	17,1	12,4	6,9
			Max	26,1	24,8	26,1
3a Biofilter/Wurzelholz I	39 Mon.	März 04	Mittel	15,9	6,4	n.b.
			Min	14,0	1,8	
			Max	21,1	13,7	
3a Biofilter/Wurzelholz I	45 Mon.	August 04	Mittel	23,8	18,2	17,3
			Min	21,8	10,2	8,8
			Max	26,1	25,9	26,9
3b Biofilter/Wurzelholz II	18 Mon.	November 04	Mittel	19,4	12,1	7,3
			Min	12,6	5,4	0,6
			Max	21,8	18,1	18,9
3c Biofilter/Wurzelholz III	3 Mon.	Oktober 04	Mittel	22,7	15,9	11,7
			Min	21,8	11,3	6,7
			Max	23,7	19,5	16,5
4a Rieselbettreaktor I	21 Mon.	Februar 04	Mittel	20,6	15,6	n.b.
			Min	17,7	12,6	
			Max	23,8	18,0	
4b Rieselbettreaktor II	5 Mon.	Juli 04	Mittel	24,9	20,6	18,9
			Min	19,9	17,0	13,7
			Max	28,7	23,7	29,4
5 2-stufige Kombianlage	24 Mon.	November 03	Mittel	17,7	14,8	n.b.
			Min	16,0	12,8	
			Max	19,5	16,8	
6 3-stufige Kombianlage	4 Mon.	Januar 05	Mittel	n.b.	n.b.	n.b.
			Min			
			Max			

10 Veröffentlichungen, Vorträge, Posterpräsentationen

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden drei Diplomarbeiten angefertigt, von denen zwei zum Abschluss gekommen sind.

Frey, K. (2004): Emission klimarelevanter Spurengase aus biologischer Abluftreinigung in der Schweinehaltung. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenernährung, Universität Bonn.

Tierfeld, H. (2005): Laboruntersuchungen zur Spurengasbildung und Abbauleistung von Biofiltern unter Berücksichtigung der Temperatur und anderer Einflussfaktoren. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenernährung, Universität Bonn.

Erste Ergebnisse des Projektes flossen ein in einen Vortrag des VDI-Kolloquiums: Biologische Abgasreinigung – Gase, Gerüche, Keime, 2003 in Leipzig:

Cuhls C., J. Clemens, M. Trimborn (2003): Biofilter-Management zur Erhöhung der Abscheideleistung von flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) und zur Reduktion der Treibhausgasbildung. VDI-Berichte Nr. 1777: 241-254.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wurde 2005 auf der VDLUFA-Tagung in Bonn in einem Vortrag präsentiert und ist im Tagungsband erschienen:

Trimborn, M.; S. Wulf, K. Frey, H. Thierfeldt, J. Clemens (2005): Welchen Beitrag zum Umweltschutz leistet die Abluftreinigung in der Tierhaltung? VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 61/2006, Kongressband, 54-60.

Weitere Ergebnisse wurden anhand von Postern auf Tagungen vorgestellt:

Clemens, J., C. Cuhls, M. Trimborn (2003): Management of biofilters to maximize the removal of volatile organic compounds and to minimize greenhouse gas formation. 6. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, 25.-27.03.2003 Vechta, Tagungsband, KTBL. pp. 494-497.

Wulf, S., M. Trimborn, J. Clemens (2003): Emissionen aus Biofiltern in der Tierhaltung. Poster, VDI-Kolloquium: Biologische Abgasreinigung – Gase, Gerüche, Keime, 08.-09.10.2003 in Leipzig.

11 Kurzfassung

Verschärfte Regelungen im Umweltrecht haben dazu geführt, dass in den letzten Jahren immer mehr Tierhaltungsanlagen mit Abluftreinigungsanlagen ausgerüstet werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte geklärt werden, ob und in welcher Größenordnung es durch diese Abluftreinigungsanlagen zu einer Bildung klimarelevanter Spurengase kommt. In Freilanduntersuchungen wurden verschiedene Abluftreinigungssysteme (5 Biofilter-Typen, 2 Rieselbettreaktoren und 2 Kombisysteme) auf ihre Abbauleistung bezüglich NH_3 und NMVOC (= VOC – CH_4), sowie auf die Bildung von N_2O und NO untersucht.

Es zeigte sich, dass Biofilter bezüglich des NMVOC-Abbaus (Geruchsabbau) den physikalischen und chemischen Reinigungssystemen überlegen sind. Bei den untersuchten Biofiltertypen wurden durchschnittliche NMVOC-Abbauraten von maximal 89 - 94 % gefunden. Bei den Rieselbettreaktoren und Kombisystemen erreichte der NMVOC-Abbau im Wochenmittel nur 50 %. Es konnten keine grundsätzlichen Unterschiede bezüglich des NH_3 -Abbaus bei den verschiedenen Systemen festgestellt werden. Die Biofilter zeigten mittlere NH_3 -Abbauraten zwischen 23 und 82 %. Bei den Rieselbettreaktoren und Kombisystemen lagen sie zwischen 16 und 60 %. Die NH_3 -Abbauraten waren eng mit den NMVOC-Abbauraten korreliert.

In allen untersuchten Abluftreinigungssystemen wurde neben dem NH_3 -Abbau eine Bildung von N_2O und NO festgestellt. Bis zu 17 % des abgebauten NH_3 -N wurde zu N_2O und bis 15 % wurde zu NO und umgesetzt. Nur im 3-stufigen Kombinationssystem fand bei der NH_3 -Abscheidung durch den Säurewäscher keine Spurengasbildung statt. Dies war auf den niedrigen pH-Wert zurückzuführen, bei dem es nicht zu einem biologischen Umsatz (Nitrifikation) des gelösten NH_4^+ kam.

In den meisten Abluftreinigungssystemen fiel eine mehr oder weniger große Menge an Sicker- bzw. Wäscherwasser an, die regelmäßig mit der Gülle des Betriebs entsorgt wurde. In Laboruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit dieser Praxis nochmals bis zu 4 % des abgeschiedenen NH_3 -Stickstoffs als N_2O in die Atmosphäre gelangen können. Wäscher und Sickerwasser (mit einem pH-Wert > 4) sollten also in jedem Fall separat von der Gülle gelagert und entsorgt werden.

Eine Hochrechnung ergab, dass sich mit flächendeckender Einführung (50 % Anschlussgrad) der biologischen Abluftreinigung nach der jetzigen Praxis die gesamten landwirtschaftlichen N_2O -Emissionen voraussichtlich um 3 % erhöhen. Hiermit entstünde ein zusätzliches Treibhauspotential von über 1,1 Mio. t CO_2 -Äquivalenten. Die Spurengasbildung kann jedoch durch Einsatz von Säurewäschern deutlich reduziert werden. Die zusätzlichen Kosten hierfür sind mit Bezug auf die reduzierten N_2O - und NH_3 -Emissionen als gering bzw. wirtschaftlich einzustufen, weshalb die Abluftreinigung mit Säurewäsche in jedem Fall zu empfehlen ist.