

Entwicklung einer Meßeinrichtung zur Erfassung umwelt-relevanter Gasemissionen

B. Amon, Th. Amon, J. Boxberger, A. Pöllinger und A. Zaussinger

Development of a method to determine emission rates from agriculture

1. Einleitung

Emissionen von Ammoniak (NH_3) haben verschiedene schädliche Einflüsse auf die Umwelt: sie führen zu unkontrollierten Stickstoffeinträgen aus der Luft, teilweise weit entfernt vom Emittenten in sensible Ökosysteme. Es kommt zu einer Eutrophierung dieser Ökosysteme und zum Aussterben wenig stickstofftoleranter Arten. Eine Beteiligung von Ammoniakemissionen am Waldsterben wird ebenfalls diskutiert. In Form von Ammoniak verloren gegangener Stickstoffdünger muß als Mineraldünger zugekauft werden, Ammoniakemissionen haben somit auch eine ökonomische Bedeutung.

Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) sind klimarelevante Gase. CH_4 trägt derzeit 13 %, N_2O 5 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Der Anteil der Landwirtschaft an der Emission treibhauswirksamer Gase wird auf 15 % geschätzt (EK, 1995).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Umfang der Emissionen von NH_3 , CH_4 und N_2O weltweit und in Österreich. Die Landwirtschaft und hier insbesondere die landwirtschaftliche Tierhaltung hat einen bedeutenden Anteil an der Emission dieser Gase. KNOFLACHER et al. (1990) kalkulierten Ammoniakemissionen für Österreich: der Anteil der Landwirtschaft beträgt 79,1 %; 68,5 % der Ammoniakemissionen entstammen der landwirtschaftlichen Tierhaltung. Von den 630 kt CH_4 -Emissionen in Österreich stammen nach ORTHOFER et al. (1991) 56 % aus der Landwirtschaft. Zum Anteil der N_2O -Emissionen aus der Landwirtschaft gibt es für Österreich derzeit noch keine Angaben. Eine Studie der ÖSTERREICHISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN (1994) gibt einen sehr weiten Bereich der möglichen Gesamtemissionen für N_2O an. In Deutschland wird der Anteil der Landwirtschaft an den N_2O -Emissionen auf rund 34 % geschätzt.

Summary

Animal husbandry systems emit NH_3 , CH_4 and N_2O . Ammonia emissions cause eutrophication of ecosystems and damages to forests due to acid rain. CH_4 and N_2O are greenhouse gases. All emitting sources from the animal housing, during manure storage and after manure spreading must be examined to find ways to reduce the emissions. For this purpose the ILUET developed a large-scaled open dynamic chamber which can be placed on the emitting surfaces to collect the emissions. A high resolution FTIR spectroscope analyses the concentrations of NH_3 , CH_4 , N_2O and CO_2 . This article describes in detail the new developed measurement technique.

Key words: ammonia, methane, dinitiousoxide (N_2O), measurement technique, agriculture.

Zusammenfassung

Die landwirtschaftliche Nutztierhaltung emittiert u. a. Ammoniak (NH_3), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O). Ammoniakemissionen führen zur Eutrophierung von Ökosystemen und sind am Waldsterben beteiligt. Methan und Lachgas sind treibhauswirksam. Zur Reduzierung der Emissionen muß die gesamte Verfahrenskette vom Stall über die Lagerung bis hin zur Ausbringung untersucht werden. Hierfür wurde am ILUET ein großer mobiler Emissionsmeßraum entwickelt. Dieser wird über die jeweiligen emissionsaktiven Oberflächen gestellt und fängt die freiwerdenden Emissionen auf. Ein hochauflösendes FTIR-Spektrometer analysiert die Konzentrationen von NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2 . Der Beitrag beschreibt detailliert die neu entwickelte Meßeinrichtung.

Schlagworte: Ammoniak, Methan, Lachgas, Meßtechnik, Landwirtschaft.

Tabelle 1: Emission von NH_3 , CH_4 und N_2O und Anteil der LandwirtschaftTable 1: Emission of NH_3 , CH_4 and contribution of agriculture

	Ammoniak (NH_3)	Methan (CH_4)	Lachgas (N_2O)
Global Anteil der Landwirtschaft	63 Mio. t. $\text{NH}_3\text{-N}^{1)}$ 51 %	615 Mio. t $\text{CH}_4^{3)}$ 46 %	14 Mio. t $\text{N}_2\text{O}^{3)}$ 48 %
Österreich Anteil der Landwirtschaft	98,2 kt $\text{NH}_3^{2)}$ 79,1 %	630 kt $\text{CH}_4^{4)}$ 56 %	1,4–10,2 kt $\text{N}_2\text{O}^{5)}$?

¹⁾ ISERMANN, 1994⁴⁾ ORTHOFER et al., 1991²⁾ KNOFLACHER et al., 1990⁵⁾ ÖAK WISS., 1994³⁾ IPCC, 1990

Die Angaben zum Emissionsumfang aus der Landwirtschaft beruhen bislang größtenteils auf Schätzungen, da exakte Messungen der Emissionen – insbesondere unter österreichischen Klima- und Produktionsbedingungen – nicht vorliegen. Die Datengrundlage ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Gezielte Maßnahmen zur Emissionsminderung können jedoch nur auf Basis gesicherter Meßergebnisse und bei Kenntnis der emissionsbeeinflussenden Faktoren entwickelt werden.

Das Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur (ILUET) führt deshalb ein Projekt durch, dessen Ziel es ist, Emissionen aus der Nutztierhaltung in Österreich zu messen, Einflußfaktoren zu ermitteln und Minderungsmöglichkeiten zu erarbeiten. Das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft fördert dieses Projekt.

2. Stand des Wissens

Beim Abbau stickstoffhaltiger Verbindungen entsteht Ammonium (NH_4). Gelöstes Ammonium steht mit Ammoniak in einem Reaktionsgleichgewicht. Je größer der Konzentrationsgradient zwischen Ammonium in der Lösung und Ammoniak in der umgebenden Luft, desto größer ist die Ammoniakfreisetzung. Des weiteren fördern ein hoher pH und hohe Temperaturen die Ammoniakfreisetzung (DENMEAD et al., 1982; GRONAUER, 1993). Große emissionsaktive Oberflächen und erhöhte Windgeschwindigkeiten steigern ebenfalls die Ammoniakemission. Maßnahmen zur Minderung der Ammoniakemissionen aus Flüssigmist-

systemen sind bereits umfangreich untersucht und dokumentiert (u. a. BLESS, 1990; OOSTHOEK et al., 1991; HARTUNG et al., 1995). Die Untersuchungen sind jedoch unter anderen Haltungs-, Fütterungs- und Klimabedingungen entstanden als sie in Österreich vorherrschen und können deshalb nicht direkt übertragen werden. Ammoniakemissionen aus Festmistssystemen sind bislang kaum untersucht.

Die Methanbildung steht am Ende des anaeroben Abbauprozesses. Voraussetzung sind Abwesenheit von Sauerstoff und Dunkelheit sowie geringe Nitratkonzentrationen, ein pH zwischen 6 und 8 und ein Wassergehalt über 50 % (HEYER, 1994). Die mikrobiologischen Grundlagen der Methanbildung sind gut bekannt, quantitative Aussagen zur tatsächlichen Emission aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung lassen sich daraus jedoch nur begrenzt ableiten. Messungen liegen auf diesem Gebiet bislang kaum vor. Studien zum Umfang der Methanemissionen stützen sich auf „Methankonversionsfaktoren“. Diese schätzen die Methanbildung aus tierischen Exkrementen unter verschiedenen Bedingungen. Die Schätzungen sind jedoch nur grob und bedürfen dringend einer Überprüfung durch Messungen in der Praxis. Erst dann lassen sich gezielt Reduzierungsmaßnahmen ableiten.

Lachgas wird im Zuge der Nitrifizierung und Denitrifizierung gebildet (FIRESTONE und DAVIDSON, 1989). Bei der Nitrifizierung wird Ammonium in Nitrat umgewandelt. Dieser Prozeß ist aerob und wird wesentlich durch die Ammoniumverfügbarkeit geregelt. Er braucht Temperaturen über 5° C und einen Wassergehalt von etwa 60 %. Im Laufe der Nitrifizierung kann es zur Bildung und Freisetzung von Lachgas kommen. Das gebildete Nitrat kann in einem zweiten Schritt über N_2O zu N_2 denitrifiziert werden. Die Denitrifizierung läuft unter Sauerstoffmangel ab, N_2 ist das letzte Glied in der Kette und entsteht nur bei vollständiger Denitrifizierung. Aerobe Nitrifizierung und anaerobe Denitrifizierung können in einem Substrat nebeneinander ablaufen: hohe aerobe mikrobielle Aktivität kann auch bei guter Durchlüftung zu Sauerstoffmangel führen, weil mehr Sauerstoff verbraucht als nachgeliefert wird. Ähnlich wie bei der Methanemission gibt es auch zur Lachgasemission aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung kaum Messungen, die Wissenslücken sind hier groß.

Zwischen den Bildungsmechanismen von NH_3 , N_2O und CH_4 bestehen komplexe Wechselwirkungen. Emissionsmindernde Maßnahmen für eine dieser Komponenten können zur Erhöhung der Emission einer anderen Komponente führen. Emissionsmessungen müssen deshalb diese

Gase gemeinsam berücksichtigen, wenn die Gesamtumweltverträglichkeit eines Verfahrens verbessert werden soll (GRONAUER et al., 1995).

Die Milieubedingungen in tierischen Exkrementen, die Einfluß auf den Umfang der Emissionen haben, sind äußerst komplex und können im Labor kaum realistisch simuliert werden. Realitätsnahe Emissionsmessungen müssen in der Praxis durchgeführt werden. Die in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung emittierenden Substrate sind sehr inhomogen entsprechend große Flächen müssen beprobt werden, um repräsentative Werte zu erhalten.

Aufgrund ihrer Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen laufen die mikrobiologischen Bildungsprozesse von NH_3 , N_2O und CH_4 diskontinuierlich ab und haben deutliche tages- und jahreszeitliche Schwankungen. Emissionsmessungen müssen demnach kontinuierlich durchgeführt und in den Jahreszeiten wiederholt werden, wenn ein repräsentativer Überblick über den Umfang der Emissionen gewonnen werden soll (OLDENBURG, 1989).

Emissionen von NH_3 , N_2O und CH_4 entstehen in den verschiedenen Bereichen der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung: im Stall, während der Lagerung der Exkremente und während und nach der Ausbringung. Emissionen aus Verfahrensketten der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung müssen in ihrer Gesamtheit gemessen und beurteilt werden. Es kann sonst sein, daß Emissionen nur von einem Bereich in den anderen verlagert werden. Emissionsmindernde Maßnahmen müssen die Summe an Emissionen eines Verfahrens mindern.

Emissionsmessungen müssen den Massenstrom, also die Menge an emittierten Gasen erfassen, um einen Vergleich verschiedener Verfahren zu ermöglichen. Dazu ist neben der Messung der Gaskonzentration auch die Bestimmung der Luftrate erforderlich:

$$\dot{m}_x = c_x \cdot \dot{V}$$

$$\dot{m}_x = \text{Emissionsrate von Gas } x \text{ [g/h]}$$

$$c_x = \text{Konzentration von Gas } x \text{ [g/m}^3\text{]}$$

$$\dot{V} = \text{Luftrate [m}^3\text{/h]}$$

An eine Meßeinrichtung zur Erfassung der Emission klimaa- und umweltrelevanter Gase aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung sind zusammenfassend folgende Anforderungen zu stellen:

- gleichzeitige Erfassung von NH_3 , CH_4 und N_2O
- kontinuierliche Messung der Emissionen
- Einsatz vor Ort, unter praktischen Bedingungen
- Beprobung möglichst großer Flächen

- Erfassung der gesamten Verfahrenskette vom Stall über die Lagerung bis hin zur Ausbringung
- Erfassung von Gaskonzentration und Luftrate

3. Meßeinrichtung des ILUET zur Erfassung der Emissionsraten aus Verfahrensketten der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung

Die Meßeinrichtung des ILUET besteht aus zwei Teilen: der Analyse der Gaskonzentrationen mittels eines hochauflösenden FTIR-Spektrometers und der Probenahme und Bestimmung der Luftrate mittels eines eigens entwickelten großen mobilen Emissionsmeßraumes.

3.1 Gaskonzentrationsmessungen

Die Konzentrationen von NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2 werden mittels eines hochauflösenden FTIR-Spektrometers gemessen. Die FTIR-Spektrometrie nutzt die Eigenschaften von Gasen, Licht im infraroten Wellenbereich zu absorbieren. Die Wellenbereiche, in denen Licht absorbiert wird, sind charakteristisch für jedes Gas, die Menge an absorbiertem Licht ist proportional zur Gaskonzentration.

Die Abluft aus Stallungen, während der Lagerung und Ausbringung der Exkremente kann bis zu 200 verschiedene Gase enthalten. Einige dieser Gase absorbieren Licht in gleichen oder sehr nahe beieinanderliegenden Wellenlängenbereichen. Es kommt zu Querempfindlichkeiten zwischen den Gasen, die eine exakte Analyse nur eines Gases erschweren. Eine gute Trennung der einzelnen Absorptionsspeaks ist bei Konzentrationsmessungen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung unerlässlich. Dies erfordert ein hohes Auflösungsvermögen des FTIR-Spektrometers. Das FTIR-Spektrometer des ILUET hat ein Auflösungsvermögen von $0,25 \text{ cm}^{-1}$, es ist für den mobilen Einsatz in der Praxis geeignet; NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2 werden gleichzeitig und kontinuierlich erfaßt.

Eine exakte Kalibrierung ist Voraussetzung für genaue Konzentrationsanalysen. Die Kalibrierungsmische müssen alle zu messenden Gase gleichzeitig und in wechselnder Zusammensetzung enthalten. Der bei den Messungen erwartete Konzentrationsbereich muß in kleinen Stufen vollständig abgedeckt werden. Für den Einsatzbereich des FTIR-Spektrometers am ILUET waren insgesamt 88 Kalibrierstandards unterschiedlicher Zusammensetzung erforderlich. Diese können mit Hilfe einer Gasmischstation

erzeugt werden (KRAHL et al., 1995). Die Kalibrierung erfolgte an der Gasmischstation des Institutes für Biosystemtechnik der FAL Braunschweig-Völkenrode.

3.2 Probenahme und Bestimmung der Luftrate

In geschlossenen Ställen mit Zwangsentlüftung sind eine repräsentative Probenahme und die Messung der Luftrate im zentralen Abluftkamin möglich, da die gesamte Stallluft an dieser Stelle den Stall verläßt. Der Trend zu tiergerechten und kostengünstigen Haltungssystemen bringt den vermehrten Bau freibelüfteter Ställe mit sich. Hier sind sowohl Probenahme als auch die Erfassung der Luftrate schwierig. Auch während der Fest- und Flüssigmistlagerung, während Umsetzvorgängen im Zuge der Festmistkompostierung und während und nach der Ausbringung der Wirtschaftsdünger ist eine spezielle Technik zur Erfassung der Luftrate notwendig.

Vor allem bei Emissionsmessungen aus Böden sind „closed-chambers“ und „open-dynamic-chambers“ verbreitet. Es handelt sich um Kammern mit meist kleiner Grundfläche, die auf die jeweilige emissionsaktive Oberfläche gestellt werden. Bei der „closed-chamber-Methode“ wird die Kammer während eines Meßzyklusses luftdicht verschlossen und der Anstieg der Gaskonzentration während dieser Zeit erfaßt. Aus Gaskonzentrationsanstieg und Fläche unter der Kammer kann die Emissionsrate errechnet werden (HUTCHINSON and MOSIER, 1981). Bei der „open-dynamic-chamber-Methode“ wird ebenfalls eine Kammer über die emissionsaktive Oberfläche gestellt. Hier wird kontinuierlich Luft mit definierter Geschwindigkeit durch die Kammer gesaugt. Aus der Konzentrationsdifferenz zwischen der eintretenden und der austretenden Luft in Verbindung mit der eingestellten Luftrate kann die Emissionsrate errechnet werden (LOCKYER, 1984; FALK, 1994). Beide Methoden haben den Nachteil, daß sie nur sehr kleine Flächen beproben. Aufgrund der inhomogenen Substrate kommt es beim Einsatz dieser Methoden in Verfahrensbereichen der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung zu sehr großen Variabilitäten innerhalb eines Substrates. So ergab beispielsweise der Einsatz einer 0,14 m²-großen Kammer an unterschiedlichen Stellen eines Festmisthaufens aus der Schweinehaltung Variabilitäten in der Methanemission von bis zu 415 % (HUSTED, 1993). Dies ermöglicht weder die zuverlässige Bestimmung der Gesamtemission des Festmisthaufens noch den Nachweis von Unterschieden in der Emissionsrate bei unterschiedlicher Behandlung. Emissionsmindernde Maß-

nahmen sind mit diesen Methoden nur eingeschränkt ableitbar. Darüber hinaus sind Manipulationen wie Umsetzvorgänge oder Ausbringen der Exkremente bei aufgebauter Kammer nicht möglich, die während dieser Vorgänge fre werdenden Emissionen können nicht erfaßt werden.

Bislang angewendete Kammermethoden lösen somit das Problem, Emissionsraten über freibelüfteten Flächen zu bestimmen, nicht. Entweder sie unterbinden einen Luftaustausch während der Meßzeit („closed-chamber“) oder sie erzeugen einen künstlichen Luftstrom („open-dynamic-chamber“). Aufgrund ihrer geringen Grundfläche haben die Kammermethoden aber Nachteile bei der repräsentativen Probenahme. Am ILUET wurde deshalb die „open-dynamic-chamber-Methode“ zu einem großen mobilen Emissionsmeßraum weiterentwickelt (Abb. 1). Er hat eine große Grundfläche von 18 m², ist transportabel und kann in allen Verfahrensbereichen der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung über die jeweiligen emissionsaktiven Oberflächen gestellt werden. So ist es möglich, alle Verfahrensbereiche mit einheitlicher Meßtechnik unter praktischen Bedingungen zu erfassen.

Der Meßraum hat eine Grundfläche von 3 * 6 m und eine Höhe von 2 m. Er ist modular aufgebaut. An der Stirnseite des Meßraumes wird Frischluft angesaugt, welche die emissionsaktiven Oberflächen überstreicht und sich dabei mit den emittierten Gasen anreichert. Am Ende wird der Querschnitt des Meßraumes mittels eines Trichters auf den Durchmesser des Gebläses verengt. Dieses saugt die Luft durch den Meßraum. Ein Drehzahlsteller stellt die gewünschte Luftrate ein. Vor dem Gebläse sitzt ein Meßventilator, der die Luftrate bestimmt. Er deckt den gesamten Querschnitt des Rohres ab, seine Drehzahl ist abhängig von der Luftrate. Die Kalibrierung des Meßventilators erfolgte im Windkanal des Institutes für Landtechnik der TU-München. Ein Gleichtrichter am Ende des Meßraumes sorgt für ein gleichmäßiges Strömungsprofil im Meßraum. An der Zuluftöffnung des Meßraumes ist ein Windschutznetz angebracht. In Vorversuchen konnte festgestellt werden, daß Windböen an der Zuluftseite in den Meßraum hineingelangen können und einen Teil der Emissionen mit sich nehmen. Das Windschutznetz bricht hohe Windgeschwindigkeiten. Die Windböen können so nicht mehr in den Meßraum eintreten.

Der Meßraum besteht aus einzelnen non-drop-beschichteten Polycarbonat-Doppelstegeplatten, die in eloxierte Aluminiumrahmen eingesetzt sind. Die einzelnen Flächen sind 2 * 3 m groß und werden mittels Schnallen gasdicht verbunden. Für den Aufbau des Meßraumes sind 2–3 Personen erforderlich, er nimmt etwa 40 Minuten in An-

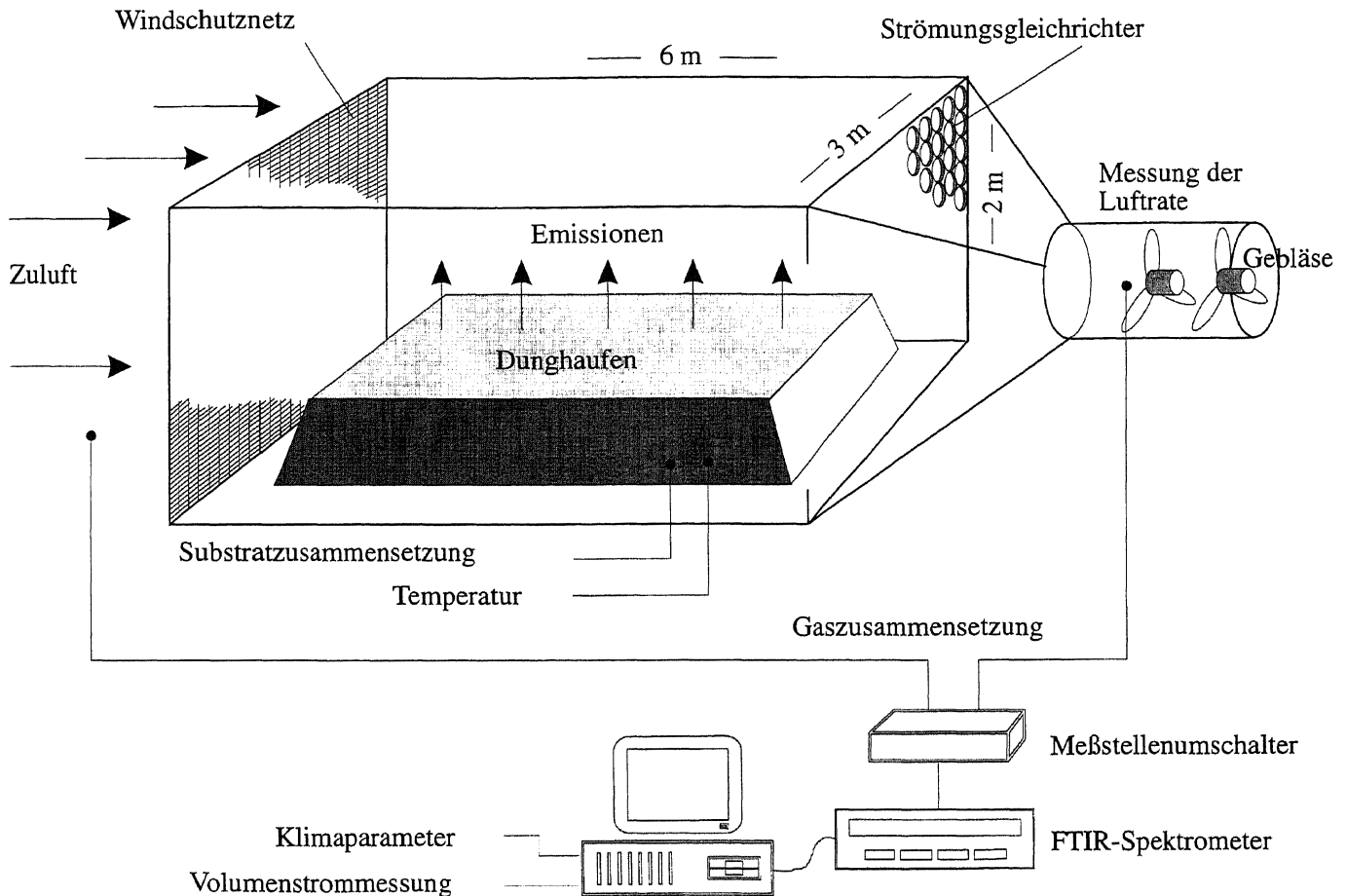


Abbildung 1: Mobiler Emissionsmeßraum des ILUET

Figure 1: Mobile large open-dynamic-chamber developed by the ILUET

spruch. In zerlegtem Zustand kann der Meßraum in einem mit speziellen Halterungen versehenen Anhänger transportiert werden. Bei aufgebautem Meßraum beherbergt dieser Anhänger das FTIR-Spektrometer, Rechner und Meßstellenumschalter und dient als Büroraum.

Gaskonzentrationen werden abwechselnd in der Zuluft-öffnung des Meßraumes und abluftseitig vor dem Gebläse gemessen. Die Differenz zwischen Gaskonzentration in der Zuluft und Gaskonzentration in der Abluft ergibt die im Meßraum emittierte Menge an Gasen. Die Erfassung der Gaskonzentrationen in der Zuluft ist v. a. beim Einsatz des Meßraumes auf einem landwirtschaftlichen Betrieb sehr wichtig. Vorversuche an der Landwirtschaftsschule Norbertinum in Tullnerbach-Pressbaum haben gezeigt, daß beim Aufbau des Meßraumes nahe eines Stalles oder Misthaufens die Zuluftkonzentrationen über den in der Literatur angegebenen Durchschnittswerten liegen und in Abhängigkeit von Tageszeit und Witterung deutlich schwanken.

Der große Meßraum des ILUET beeinflusst die natürlichen Umgebungsbedingungen wenig. Durch den ständigen Luftwechsel kommt es kaum zu einer Erwärmung des Innenraumes im Vergleich zur Außenluft. Lediglich bei starker Sonneneinstrahlung muß das Dach des Meßraumes beschattet werden, um eine Erwärmung zu verhindern.

Abbildung 2 zeigt ein Schema des gesamten Versuchsaufbaues. Ein Visual-Basic-Makro steuert Gasprobenahme, Spektrenaufnahme und -auswertung. Es aktiviert zunächst den Meßstellenumschalter, der abwechselnd das Ventil für die Gasprobe aus der Zuluft und aus der Abluft öffnet. Er kann auch auf Prüfgas schalten, um in regelmäßigen Abständen die Funktionsfähigkeit des Spektrometers zu überprüfen. Eine Pumpe saugt die Gasproben kontinuierlich durch die Gaszelle des Spektrometers. Nach der Öffnung des Ventils und einer zehnminütigen Spülung mit Zuluft bzw. Abluft steuert das Visual-Basic-Makro über die OMNIC-Software die Aufnahme des Absorptionsspektrums. Hat das

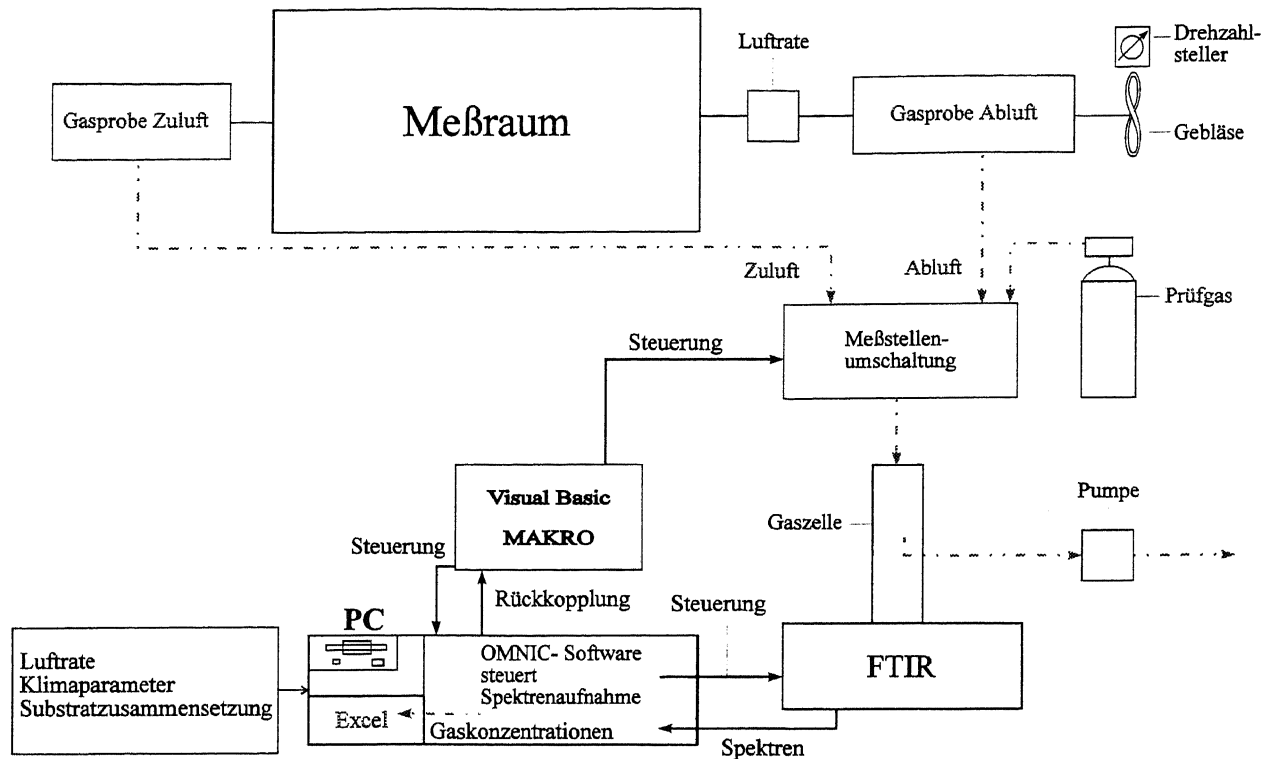


Abbildung 2: Schema des Versuchsaufbaues zur Emissionsratenbestimmung
 Figure 2: Design of experiment for determination of emission rates

Spektrometer eine Aufnahme beendet, so kommt eine Rückmeldung an das Makro. Die Gaskonzentrationen werden analysiert und die Werte in eine Datei geschrieben, welche mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel weiter bearbeitet werden kann. Nach der Aufnahme von je drei Spektren schaltet der Meßstellenumschalter auf die nächste Meßstelle weiter. Es folgt wiederum eine zehnminütige Spüldauer, dann beginnt erneut die Spektrenaufnahme. Dieser Zyklus wiederholt sich so lange, bis das Makro per Hand gestoppt wird. So ist eine kontinuierliche, automatische Erfassung der Gaskonzentrationen in Zuluft und Abluft möglich.

Klimaparameter und Luftrate werden ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet. Alle Werte fließen zur Datenauswertung in Excel zusammen.

Der mobile Emissionsmeßraum kam in diesem Jahr bei mehreren Versuchen an der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Gumpenstein zum Einsatz. Über Einsatzbereiche und Ergebnisse wird in einer der nächsten Ausgaben der Bodenkultur berichtet.

Literatur

- BLESS, H.-G. (1990): Ammoniakemission nach der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern. In: Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Univ. Kiel Nr. 72, 195–205.
- DENMEAD, O. T., L. R. FRENEY and J. R. SIMPSON (1982): Dynamics of ammonia volatilization during furrow irrigation of maize. Soil Sci. Soc. Am. J. 46, 149–155.
- Enquête-Kommission (EK): „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages (Hrsg.) (1995): Mehr Zukunft für die Erde: Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz. Economica Verlag, Bonn.
- FALK, R. (1994): Entwicklung und Einsatz eines Windtunnels zur Messung der Ammoniakemission bei der Ausbringung von Flüssigmist. MEG-Schrift Nr. 248, Dissertation an der Universität Hohenheim.
- FIRESTONE, M. K. and E. A. DAVIDSON (1989): Microbiological basis on NO- and NO₂-production and -consumption in soil. In: ANDREAE, M. O. and D. S. SCHIMMEL: Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. John Wiley and Sons, Chichester, 7–21.

- GRONAUER, A. (1993): Einflußfaktoren auf die Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist als Grundlage verfahrenstechnischer Verbesserungen. In: Bayrisches Staatsministerium für ELuF, Gelbes Heft 47, München.
- GRONAUER, A., H. STANZEL, S. NESER, G. DEPTA, K. SCHÄFER, R. HAUS, S. HEINZ, J. KRAHL, W. LUTHER, A. MUNACK, H. HOPF, J. BOXBERGER, T. AMON, B. KIESSLING, CH, SALOW und J. SCIBORSKI (1995): Anforderungen und Lösungsansätze zur Bestimmung von Emissionsraten ökosystem- und klimarelevanter Gase aus der Landwirtschaft. In: Institut für Agrartechnik Bornim, MEG, KTBL, AEL (Hrsg.): Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. Potsdam-Bornim, 147–156.
- HARTUNG, E., W. BÜSCHER und T. JUNGBLUTH (1995): Grundlagenuntersuchungen zur Quantifizierung der Haupteinflußfaktoren auf die Freisetzung von Ammoniak. In: Institut für Agrartechnik Bornim, MEG, KTBL, AEL (Hrsg.): Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. Potsdam-Bornim, 139–146.
- HEYER, J. (1995): Methan. In: Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages, Studienprogramm Landwirtschaft, Kapitel C. Economica Verlag, Bonn, 1–91.
- HUSTED, S. (1993): An open chamber technique for determination of methane emission from stored livestock manure. *Atmospheric Environment*, 27 A, 11, 1635–1642.
- HUTCHINSON, G. L. and A. R. MOSIER (1981): Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 311–316.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (1990): Climate Change: The IPCC Scientific Assessment.
- ISERMANN, K. (1995): Ammoniak-Emission der Landwirtschaft, ihre Auswirkungen auf die Umwelt und ursachenorientierte Lösungsansätze sowie Lösungsaussichten zur hinreichenden Minderung. In: Enquête-Kommission (EK): „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages, Studienprogramm Landwirtschaft. Kapitel E. Economica Verlag, Bonn, 1–250.
- KNOFLACHER, M., E. HAUNOLD, W. LOIBL, H. ZÜGER und G. URBAN (1990): Ammoniak-Emission in Österreich: Berechnung und Abschätzung sowie Regionalisierung auf Basis politischer Bezirke. Umweltbundesamt, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
- KRAHL, J. et al. (1995): FT-Infrarotspektroskopie zur Bestimmung der Spurengasemission aus der Tierhaltung. In: VDI (Hrsg.) Düsseldorf 1995: VDI-Berichte Nr. 1211, VDI-Verlag, 215–218.
- LOCKYER, D. R. (1984): A system for the measurement in the field of losses of ammonia through volatilization. *J. Sci. Food Agric.* 35, 837–848.
- OLDENBURG, J. (1989): Geruchs- und Ammoniak-Emission aus der Tierhaltung. In: KTBL (Hrsg.): KTBL-Schrift Nr. 333, Darmstadt.
- OOSTHOEK, J., W. KROODSMA and P. HOEKSMA (1991): Ammonia emission from dairy and pig housing systems. In: NIELSEN, V., VEORBURG, J., L'HERMITE, P. (Hrsg.): Odour and ammonia emissions from livestock farming. London, 31–41.
- ORTHOFFER, R., M. KNOFLACHER, W. LOIBL und G. URBAN (1991): Abschätzung der Methanemission in Österreich. Forschungszentrum Seibersdorf, Hauptabteilung Umweltplanung.
- ÖSTERREICHISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN – KOMMISSION FÜR REINHALTUNG DER LUFT (1994): Umweltwissenschaftliche Grundlagen und Zielsetzungen im Rahmen des Nationalen Umweltplans für die Bereiche Klima, Luft, Lärm und Geruch. Wien.
- RÖMER, G., P. BOEKER, und P. SCHULZE-LAMMERS (1994): Ammoniakemissionen von Festmist. In: *Landtechnik*, 49, 2, 72–73.

Anschrift der Verfasser

o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. DDr. Josef Boxberger, Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Adolf Zaussinger, Dr. Dipl.-Ing. Thomas Amon, Dipl.-Ing. Barbara Amon, Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Str. 82, A-1190 Wien.
Dipl.-Ing. Alfred Pöllinger, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Referat Landtechnik, A-8952 Irdning.

Eingelangt am 1. Oktober 1996
Angenommen am 28. Oktober 1996