

Friedhelm Herbst<sup>1</sup>, Edgar Peiter<sup>1</sup>, Oliver Spott<sup>2</sup>, Wolfgang Gans<sup>1</sup>

## Freisetzung von klimarelevanten Gasen aus verschiedenen Böden unter Laborbedingungen

Release of greenhouse gases from different soils under laboratory conditions

### Zusammenfassung

In zwei Laborversuchen wurde die Freisetzung von Ammoniak, Lachgas, Kohlendioxid und Methan aus zehn verschiedenen Böden ohne und mit Zusatz von Gärrest geprüft. Ohne Zusatz von Gärrest kam es nur zu einer Freisetzung von CO<sub>2</sub>. Mit Gärrestzusatz traten alle untersuchten Gase auf. Bei den gedüngten Böden lag eine hohe Streubreite bei den N<sub>2</sub>O-, CO<sub>2</sub>- und NH<sub>3</sub>-Freisetzungen vor. Die engste Beziehung zwischen den untersuchten Bodenparametern und den Gasfreisetzungen bestand zwischen dem Sandgehalt und der NH<sub>3</sub>-Freisetzung. Bei Gärrestzusatz erfolgte die höchste Freisetzung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Summe aller vier Gase) bei den lehmigen Sandböden.

**Stichwörter:** Böden, Gärrest, Emission, Ammoniak, Lachgas, Kohlendioxid, Methan

### Abstract

In two laboratory experiments, the release of ammonia, nitrous oxide, carbon dioxide and methane from ten different soils was tested with and without the addition of fermentation residue. Without the addition of fermentation residue, there was only a release of CO<sub>2</sub>. With application of fermentation residue all investigated gases were released. In the fertilized soils, high scatter was present in the N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> release. The closest relationship between the studied soil parameters and the gas release existed between sand content and NH<sub>3</sub> release. After application of fermentation residue the highest release of CO<sub>2</sub> equivalents (sum of all four gases) was found in the loamy sand soils.

**Key words:** Soils, fermentation residue, emission, ammonia, nitrous oxide, carbon dioxide, methane

### Einleitung

Der Einsatz von stickstoff- und kohlenstoffhaltigen Düngestoffen in der Pflanzenproduktion führt zu einer Freisetzung von klimarelevanten Gasen, zu denen vor allem CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und NH<sub>3</sub> zählen. Die Freisetzung dieser Gase trifft für organische Düngemittel, wie Gülle und Gärrest, in einem stärkeren Maße zu als für mineralische Düngemittel (SENBAYRAM et al., 2009; HERBST et al., 2012; EISSNER et al., 2013).

Bei der Suche nach Maßnahmen zur Minderung dieser Emissionen stößt man auf die Frage, ob eine Abhängigkeit der Freisetzungen von der Bodenherkunft/Bodenart besteht. Solche Auswertungen sind bisher nur für NH<sub>3</sub> bekannt (DÖHLER et al., 2002) und wurden für die anderen Gase erst begonnen (AUGUSTIN, 2012; KÖSTER et al., 2013; SEIZ et al., 2013; ABUBAKER et al., 2013). Die Klärung dieser Frage ist relevant, weil bei bestehenden Unterschieden sich die Maßnahmen zur Minderung der Freisetzungen vor allem auf jene Böden richten sollten, welche ein hohes Freisetzungspotential aufweisen. Bei der Prüfung dieser Frage ist entscheidend, dass verschiedene Böden unter vergleichbaren Bedingungen getestet werden. Dies ist unter Freilandbedingungen nur mit einem erheblichen Aufwand möglich, so dass, zumindest in der Anfangsphase solcher Untersuchungen, Modellversuche herangezogen werden.

Die hier dargestellten Untersuchungen erfolgten im Rahmen eines FNR-Projektes zur Minderung der Freisetzung von klimarelevanten Gasen beim Einsatz von Gärresten, bei dem die Prüfung von Applikationsmethoden

### Institut

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Professur für Pflanzenernährung, Halle<sup>1</sup>  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Bodenphysik, Halle<sup>2</sup>

### Kontaktanschrift

Dr. Friedhelm Herbst, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Professur für Pflanzenernährung, Betty-Heimann-Str. 3, 06120 Halle/Saale, E-Mail: herbst.halle@gmail.com

### Zur Veröffentlichung angenommen

11. April 2014

und Zusatzstoffen zur Verlustminderung im Vordergrund stand. In Modellversuchen unter Laborbedingungen wurden dabei verschiedene Böden ohne und mit dem Zusatz von Gärrest auf die Freisetzung der genannten Gase geprüft, was in zwei nacheinander folgenden Versuchsansätzen erfolgte.

### Material und Methoden

Es wurde Bodenmaterial aus der Ackerkrume von 10 über Deutschland verteilte Feldversuchsstandorte untersucht: Halle (Ha), Bad Lauchstädt (La), Speyer (Sp), Weihestephan (We), Cunnersdorf (Cu), Dornburg (Do), Dedelow (De), Ascha (As), Gülzow (Gü) und Hohenschulen (Ho) (Tab. 1). Die Probenahme erfolgte im Oktober 2010 nach den Vorfrüchten Winterweizen (WW), Mais oder Gras mittels Spaten. Sichtbare Ernte- und Wurzelrückstände wurden bei der Probenaufbereitung entfernt. Dabei wurde der Boden auf kleiner als 5 mm zerkleinert. Die Bodenproben waren je nach vorangegangenen Witterungsbedingungen unterschiedlich feucht. Die Böden wurden entweder getrocknet oder angefeuchtet mit der Zielstellung, dass sie nach Zugabe von 28,3 g Gärrest einen Wassergehalt von 40% der maximalen Wasserkapazität aufwiesen. Der Wassergehalt des Bodens nahm während der Versuchsdurchführung nur geringfügig ab. Die eingesetzte Menge an absolut trockenem Boden betrug bei allen

Böden 350 g pro Gefäß (feuchter Boden zwischen 380 und 402 g/Gefäß).

Im ersten Versuchsansatz wurden die auf den jeweiligen Wassergehalt eingestellten Böden ohne Zusatz geprüft. Im nachfolgenden Versuchsansatz erfolgte eine Zugabe von 28,3 g Gärrest, bei dem als Gärsubstrate Rindergülle, Stallmist, Maissilage und Maisschrot eingesetzt wurden (Tab. 2). Die Versuchsböden wurden für beide Versuchsansätze gleich behandelt und zwischenzeitlich bei 2°C gelagert. Die Einsatzmenge des Gärrestes wurde äquivalent 100 kg NH<sub>4</sub>-N ha<sup>-1</sup> bemessen (entsprechend 86 mg NH<sub>4</sub>-N pro Gefäß). Der Gärrest wurde oberflächlich appliziert und nachfolgend eingearbeitet, wobei ein geringer Teil an der Oberfläche verblieb.

Die Untersuchungen erfolgten im Labor bei Raumtemperatur und Tageslichtbedingungen. Als Reaktionsgefäße dienten Saugflaschen aus Glas (Volumen 1,1 Liter, Bodenoberfläche 86 cm<sup>2</sup>). Die Untersuchungen erfolgten an 3 Wiederholungen pro Variante, so dass insgesamt 30 Gefäße zum Einsatz kamen. Durch die Reaktionsgefäße wurde mittels Schlauchpumpe ein Luftstrom mit Außenluft und einer Fließrate von 3,8 ml min<sup>-1</sup> geleitet, der bis Versuchsende anhielt. Die aus den Gefäßen entweichende Luft wurde in 20-ml-Vials erfasst und in 50-ml-DURAN-Flaschen weitergeleitet, welche mit 2%iger Borsäure gefüllt waren (Abb. 1a). In den Vials wurde die Konzentration an CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O gaschromatographisch und in den Waschflaschen die adsorbierte NH<sub>3</sub>-Menge potentiomet-

**Tab. 1. Parameter der geprüften Böden**  
Characters of studied soils

Parameter	Bodenherkunft									
	Ha	La	Sp	We	Cu	Do	De	As	Gü	Ho
Vorfrucht	WW	WW	Mais	Gras	WW	Mais	Mais	Mais	WW	Mais
Max. WK Gew.-%	36,8	44,5	35,5	45,7	39,3	42,5	38,7	40,8	34,7	36,6
pH-Wert (CaCl <sub>2</sub> )	6,3	7,6	5,6	6,7	6,5	6,4	7,5	6,6	7,4	7,4
NO <sub>3</sub> -N mg 100g <sup>-1</sup>	2,1	0,1	1,8	2,7	2,9	1,2	1,6	2,0	1,7	0,7
NH <sub>4</sub> -N mg 100g <sup>-1</sup>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gesamt-N %	0,09	0,13	0,09	0,14	0,12	0,12	0,12	0,13	0,08	0,10
Kohlenstoff %	1,28	1,78	1,15	1,14	1,18	1,01	1,36	1,21	0,93	1,03
C/N-Verhältnis	14,2	13,4	13,5	8,4	10,2	8,4	11,4	9,3	11,6	10,0
Humus %	3,3	6,3	2,6	5,4	3,6	5,2	3,6	4,1	2,4	3,5
Nitrifikat.-Aktivität µg NH <sub>4</sub> -N g <sup>-1</sup> 2 h <sup>-1</sup>	6,0	6,8	2,0	6,0	2,6	13,9	8,5	8,0	10,0	7,4
Korngrößen										
Sand %	75	8	74	21	41	3	50	53	62	60
Schluff %	15	69	16	54	47	67	39	35	32	26
Ton %	10	23	10	25	12	30	11	12	6	14
Bodenart*	IS	Lö	IS	L	sL	L	IS	sL	IS	sL
Bodengruppe**	2	4	2	4	3	4	2	3	2	3

\* Einstufung nach der 5 stufigen Klassifizierung S – IS – sL – L/Lö – T

\*\* Einstufung gemäß der Bodenart mit den Bodengruppen 1 bis 5

**Tab. 2. Parameter des eingesetzten Gärrestes**  
*Characters of applied fermentation residue*

Parameter	Maßeinheit	Wert
Trockensubstanz	%	8,8
pH-Wert	–	7,9
Ammonium-N	% in FM	0,304
Nitrat-N	% in FM	0
Gesamt-Stickstoff	% in FM	0,563
Kohlenstoff	% in TM	35,4
C/N-Verhältnis	–	5,5

risch gemessen. Zusätzlich zu den Gasmessungen der Reaktionsgefäße wurde die Konzentration der in die Gefäße fließenden Außenluft ebenfalls mit 3 Wiederholungen erfasst.

Im ersten Versuch ohne Zusatz erfolgten die Messungen bis 15 Tage nach Versuchsansatz, wobei diese bis zum 6. Tag täglich (Spüldauer der Vials 24 Stunden) und danach im Abstand von 1 bis 2 Tagen erfolgten. Der zweite Versuch mit Gärrest wurde bis 35 Tage nach Ansatz durchgeführt. Der erste Messtermin erfolgte nach 7 Stunden (außer  $\text{NH}_3$ ), nachfolgend bis zum 10. Tag täglich und danach im Abstand von 2–4 Tagen (zu insgesamt 21 Terminen). Die Messung der  $\text{NH}_3$ -Freisetzung wurde solange wie eine solche auftrat bis zum 10. Versuchstag täglich vorgenommen.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in freigesetzter Gasmenge pro Gefäß. Für Ammoniak wurden diese Mengen pro Messtermin direkt gemessen. Bei den übrigen Gasen wurde pro Messtermin das Produkt aus den gemessenen Gaskonzentrationen mit der Luftdurchsatzmenge und nachfolgend die Differenz zur Kontrolle ohne Boden (Außenluft) gebildet. Daraus ergaben sich die aus dem Boden bzw. Boden mit Gärrest freigesetzten Gasmengen, welche für den gesamten Versuchszeitraum summiert wurden.

Zum Vergleich der Gase und zu ihrer Summenbildung erfolgte eine Umrechnung in  $\text{CO}_2$ -Äquivalente. Dazu wurden die Faktoren des IPCC, 2. Assessment report climate change von 1995 zugrunde gelegt:  $\text{CO}_2$ : 1,  $\text{CH}_4$ : 21,  $\text{N}_2\text{O}$ : 310 und  $\text{NH}_3$ : 3,1 (nach MOSIER et al., 1998, wird ca. 1% des  $\text{NH}_3$  in  $\text{N}_2\text{O}$  umgewandelt). Die freigesetzten Gasmengen wurden mit diesen Faktoren multipliziert und nachfolgend addiert. Die Berechnungen wurden zum Zwecke der statischen Auswertung getrennt für jedes Gefäß pro Variante vorgenommen. In den Abbildungen sind dazu der Mittelwert und zusätzlich  $\pm$  Standardabweichung dargestellt, soweit dadurch die Übersichtlichkeit nicht eingeschränkt wird. Die sonstigen Signifikanzprüfungen wurden mittels Tukey-Test vorgenommen. Für den zweiten Versuchsansatz mit Gärrestzugabe wurden Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen der Freisetzung der Gase untereinander und zwischen den Bodenparametern und den Gasfreisetzungen ermittelt.

**Abb. 1a. Versuchsanlage mit Schlauchpumpe, Reaktionsgefäßen, Vials und Waschflaschen.**  
*Experimental setup.*

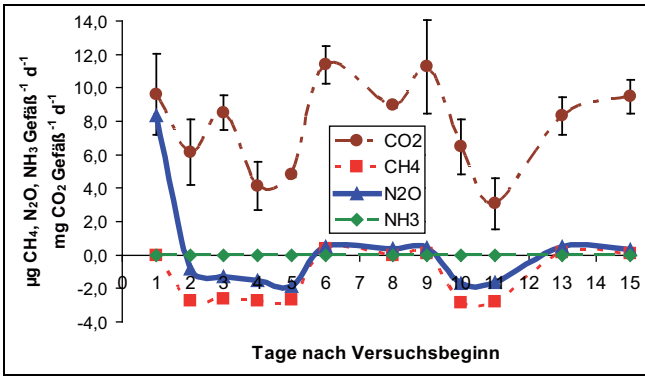
## Ergebnisse

Bei den grafischen Darstellungen zum Verlauf der Gasfreisetzungen werden nur einzelne Böden mit typischen Verläufen aufgeführt, wobei jeder Boden einmal dargestellt wird. Die Abb. 1 und 2 beinhalten einen Vergleich der Verläufe für alle 4 gemessenen Gase; in Abb. 1 für einen Boden ohne Zusatz (Cunnersdorf) und in Abb. 2 für einen Boden mit Gärrestzusatz (Halle).

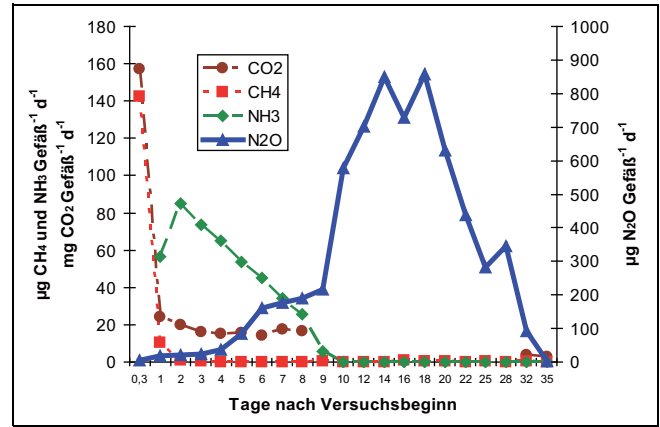
In den Böden ohne Zusatz, welche vor der Probenahme auch nicht frisch gedüngt worden waren, kam es nur zu einer gesicherten Freisetzung von  $\text{CO}_2$ . Eine  $\text{NH}_3$ -Freisetzung wurde in keinem Boden festgestellt. Die  $\text{CH}_4$ - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Freisetzungen schwankten um den Nullpunkt, wobei auch Messwerte im negativen Bereich auftraten. Eine erhöhte  $\text{N}_2\text{O}$ -Freisetzung zum ersten Messtermin, wie z.B. im Boden Cunnersdorf (Abb. 1), trat nicht bei allen Böden auf. Bei dem Boden Speyer lag jedoch die  $\text{N}_2\text{O}$ -Freisetzung zu Versuchsbeginn noch höher als im Boden Cunnersdorf und hielt auch noch bis zum 6. Messtag an.

Im zweiten Versuchsansatz mit Gärrestzugabe kam es in allen Böden zu einer Freisetzung der Gase, mit Ausnahme von  $\text{NH}_3$ . Ein typischer Verlauf der Gasfreisetzungen nach Gärrestzugabe ist in der Abb. 2 dargestellt. In den Abb. 3 bis 6 sind die Verläufe zu den einzelnen Gasen bei Gärrestzugabe an jeweils zwei Böden aufgezeigt. Die Kurvenverläufe der Gasfreisetzungen bei den gedüngten Böden unterscheiden sich wesentlich von denen der ungedüngten Böden. Auch zwischen den Gasen sind die Unterschiede bei den gedüngten Böden größer als bei den ungedüngten.

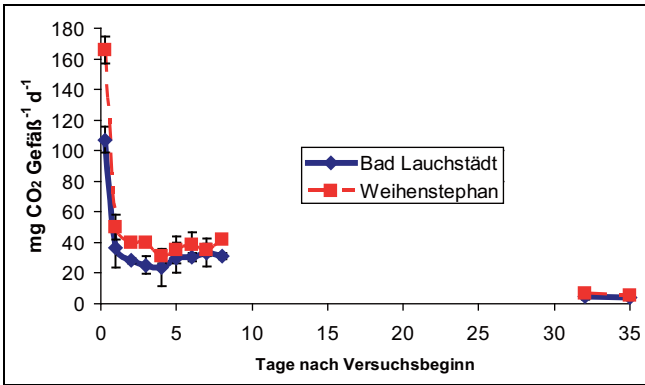
Die  $\text{CO}_2$ -Freisetzung bei den Böden mit Gärrestzusatz (Abb. 3) wies zum ersten Messtermin, 7 Stunden nach Versuchsansatz, bei allen Böden ein Maximum auf. Die Freisetzung fiel bis zum zweiten Messtermin nach 24 Stunden stark und danach langsamer ab. Da vom 9. bis 28. Messtag die  $\text{CO}_2$ -Messwerte gestört waren, fehlen diese in den Abb. 2 und 3. In allen anderen dazu durchgeführten



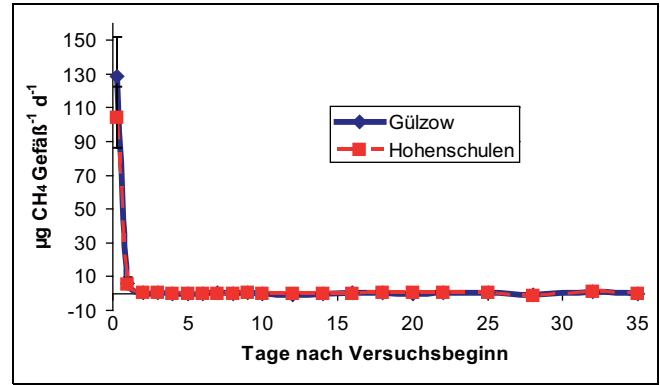
**Abb. 1.** Verlauf der Freisetzung der Gase aus dem Boden Cunnersdorf (sL) ohne Zusatz (pro Messpunkt n = 3, Standardabweichung ist nur bei CO<sub>2</sub> angegeben).  
 Progress of gas release from the Cunnersdorf soil (sL) without fermentation residue (n = 3, standard deviations for CO<sub>2</sub> only).



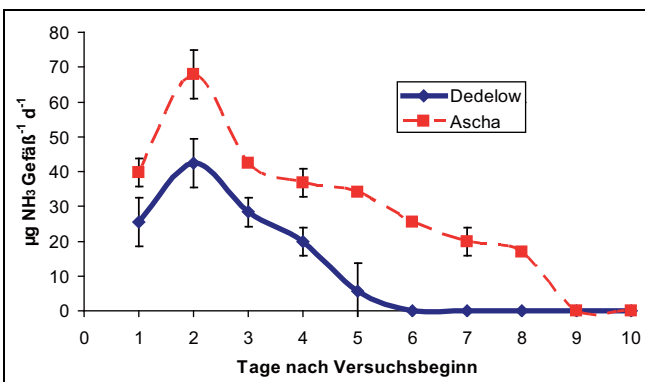
**Abb. 2.** Verlauf der Freisetzung der Gase aus dem Boden Halle (IS) mit Gärrest (pro Messpunkt n = 3, ohne Angabe der Standardabweichung, die CO<sub>2</sub>-Messwerte waren vom 9. bis 28. Messtag gestört und sind nicht angegeben).  
 Progress of gas release from the Halle soil (IS) with fermentation residue (n = 3, CO<sub>2</sub> measurements were disturbed on days 9 to 28).



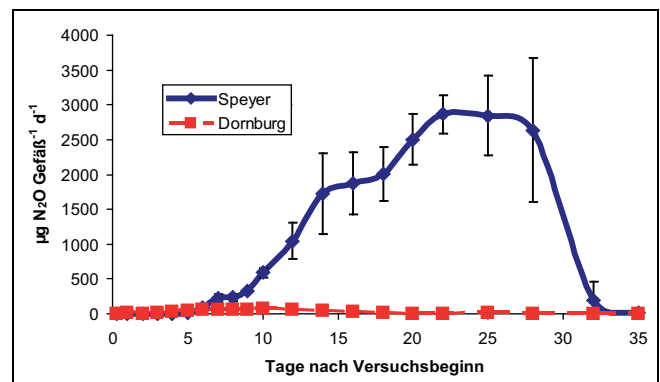
**Abb. 3.** Verlauf der Kohlendioxid-Freisetzung aus Böden mit Gärrest bei den Böden Bad Lauchstädt (Lö) und Weihenstephan (L) (pro Messpunkt n = 3; die Messwerte vom 9. bis 28. Messtag waren gestört und sind nicht angegeben).  
 Progress of CO<sub>2</sub> release from the Bad Lauchstädt (Lö) and Weihenstephan (L) soils with fermentation residue (n = 3, measurements were disturbed on days 9 to 28).



**Abb. 4.** Verlauf der Methan-Freisetzung aus Böden mit Gärrest bei den Böden Gülzow (IS) und Hohenschulen (sL) (pro Messpunkt n = 3).  
 Progress of CH<sub>4</sub> release from the Gülzow (IS) and Hohenschulen (sL) soils with fermentation residue (n = 3).



**Abb. 5.** Verlauf der Ammoniak-Freisetzung aus Böden mit Gärrest bei den Böden Dedelow (IS) und Ascha (sL) (pro Messpunkt n = 3).  
 Progress of NH<sub>3</sub> release from the Dedelow (IS) and Aschs (sL) soils with fermentation residue (n = 3).



**Abb. 6.** Verlauf der Lachgas-Freisetzung aus Böden mit Gärrest bei den Böden Dornburg (L) und Speyer (IS) (pro Messpunkt n = 3).  
 Progress of N<sub>2</sub>O release from the Dornburg (L) and Speyer (IS) soils with fermentation residue (n = 3).

Versuchen war es im weiteren Versuchsverlauf bei nicht veränderten Versuchsbedingungen zu keinem zwischenzeitlichen Anstieg oder starken Abfall der CO<sub>2</sub>-Freisetzung gekommen.

Ein ähnliches Bild wie die CO<sub>2</sub>-Freisetzung zeigte die CH<sub>4</sub>-Freisetzung (Abb. 4). Bei allen Böden trat wiederum ein deutliches Maximum zum ersten Messtermin auf. Noch deutlicher als beim CO<sub>2</sub> nahm danach die CH<sub>4</sub>-Freisetzung ab. Im Gegensatz zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung blieb die CH<sub>4</sub>-Freisetzung nicht bestehen, sondern lag nach 2 bis 4 Tagen auf dem Niveau der ungedüngten Böden, d.h. es traten auch negative Messwerte auf.

Bei der NH<sub>3</sub>-Freisetzung kam es zu differenzierteren Ergebnissen als bei CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>. Von den 10 geprüften Böden trat bei 3 Böden keine NH<sub>3</sub>-Freisetzung auf (Bad Lauchstädt, Weihenstephan und Dornburg). Auch der Verlauf der Freisetzung zeigte ein abweichendes Bild zu den anderen Gasen. Zum ersten Messtermin nach 24 Stunden trat zwar Ammoniak auf, aber das Maximum wurde erst nach 2 Tagen festgestellt. Danach fiel die NH<sub>3</sub>-Freisetzung kontinuierlich ab, wobei das Ende der Freisetzung zwischen dem 5. (Dedelow) und 10. Tag (Speyer) nach Versuchsbeginn lag.

Eine N<sub>2</sub>O-Freisetzung aus den Böden mit Gärrest trat bei allen Böden auf, und es bestanden bei diesem Gas die größten Differenzen zwischen den Böden. Dies betraf sowohl den Verlauf als auch das Ausmaß, wobei sich der Verlauf grundsätzlich von dem der anderen Gase unterschied. Nach Versuchsbeginn lag bei allen Böden zunächst nur eine geringe N<sub>2</sub>O-Freisetzung vor, welche nachfolgend anstieg. Das Maximum der Freisetzung wurde zwischen dem 6. (z.B. Hohenschulen) und dem 22. Tag (Speyer) nach Versuchsbeginn erreicht. Nach dem Maximum fiel die Freisetzung wieder ab, hielt aber bei allen Böden bis zum Versuchsende (35. Versuchstag) auf einem geringen Niveau an. Dabei traten in keinem Boden negative Messwerte auf.

In der Tab. 3 ist die Summe der in den Untersuchungszeiträumen aus den Böden ohne und mit Gärrest freigesetzten Gasmengen enthalten. Diese Summenwerte machen die große Streubreite zwischen den Böden in der Freisetzung der Gase deutlich. Eine hohe Streubreite kommt bei den ungedüngten Böden vor allem beim N<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> und bei den gedüngten Böden zusätzlich beim NH<sub>3</sub> zum Ausdruck. Der Vergleich der Werte mit und ohne Gärrestapplikation zeigt die Wirkung des Gärrestzusatzes auf die Gasfreisetzung auf. Dieser Zusatz führte bei allen Gasen zu einem Anstieg in der Freisetzung, welcher bei den einzelnen Gasen unterschiedlich stark ausfiel.

Die Pearson-Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen der Freisetzung der Gase untereinander waren mit Ausnahme der Beziehung zwischen CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>O-Freisetzung statistisch gesichert (Tab. 4). Die engste Korrelation lag zwischen der CH<sub>4</sub>- und NH<sub>3</sub>-Freisetzung vor ( $r = +0,92$ ). Die Beziehungen zwischen den Bodenparametern und den Gasfreisetzungen waren zu einem großen Teil ebenfalls statistisch gesichert, lagen in den meisten Fällen jedoch relativ niedrig (Tab. 5). Die engsten Beziehungen bestanden bei der NH<sub>3</sub>-Freisetzung zum Sandgehalt ( $r = +0,88$ ) und zum Humusgehalt ( $r = -0,83$ ). Keine gesicherten Beziehungen lagen bei allen Gasen zum C<sub>t</sub>-Gehalt und zum C/N-Verhältnis vor.

In den Abb. 7 und 8 sind Vergleiche der Böden für die Summe der freigesetzten Gase, ausgedrückt als CO<sub>2</sub>-Äquivalente, dargestellt. In den Böden ohne Zusatz wurde diese Freisetzung stark von der CO<sub>2</sub>-Emission dominiert. Der Boden aus Dedelow wies dabei die höchste Freisetzung an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten auf. Ein bedeutender Anteil der N<sub>2</sub>O-Freisetzung konnte nur beim Boden aus Speyer festgestellt werden. In den Böden mit Gärrestzusatz gewann N<sub>2</sub>O generell an Bedeutung aufgrund der starken Emissionszunahme sowie wegen seines hohen CO<sub>2</sub>-Äquivalentes. Dadurch hat sich die Reihenfolge der Böden im Vergleich zu den ungedüngten Böden verschoben. Die

**Tab. 3. Freisetzung von klimarelevanten Gasen im Untersuchungszeitraum**

*Total release of greenhouse gases*

Gas	Einheit pro Gefäß	Bodenherkunft										GD*
		Ha	La	Sp	We	Cu	Do	De	As	Gü	Ho	
Böden ohne Zusatz (15 Versuchstage)												
CO <sub>2</sub>	mg	44,1	26,7	56,4	66,9	100,5	39,1	123,3	62,2	54,5	47,0	20,0
CH <sub>4</sub>	µg	-1,73	-1,67	-0,35	-0,62	-0,58	-0,62	-1,68	-2,75	-2,87	0,06	4,10
N <sub>2</sub> O	µg	43,5	4,2	141,0	9,9	12,3	4,5	13,0	5,3	3,1	2,9	25,3
NH <sub>3</sub>	µg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Böden mit Gärrest (35 Versuchstage)												
CO <sub>2</sub>	mg	1163	696	1186	945	1112	815	992	893	802	900	309
CH <sub>4</sub>	µg	154	88	194	108	138	86	110	125	137	111	76
N <sub>2</sub> O	mg	6,4	1,1	19,2	0,8	1,6	0,6	3,1	0,5	10,1	0,7	4,1
NH <sub>3</sub>	µg	445	0	496	0	215	0	122	283	363	116	226

\* Grenzdifferenz bei Signifikanzniveau 5% im Tukey-Test

**Tab. 4. Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen der Freisetzung der Gase untereinander**  
 Pearson correlation coefficients for total release among different gases

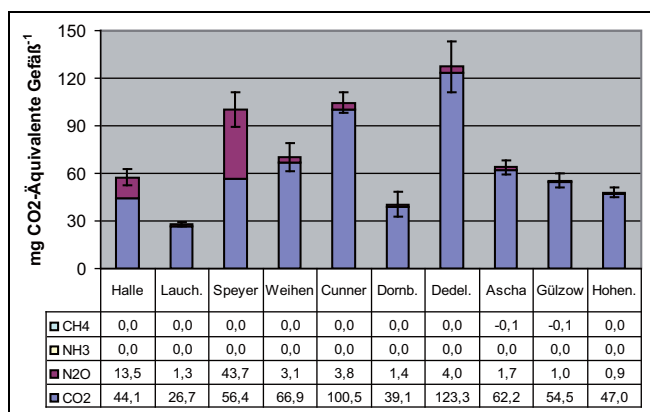
Gase	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>
CO <sub>2</sub>	-	0,79*	0,49	0,64*
CH <sub>4</sub>	0,79*	-	0,85*	0,92*
N <sub>2</sub> O	0,49	0,85*	-	0,78*
NH <sub>3</sub>	0,64*	0,92*	0,78*	-

\* signifikant bei einem Niveau von 5%

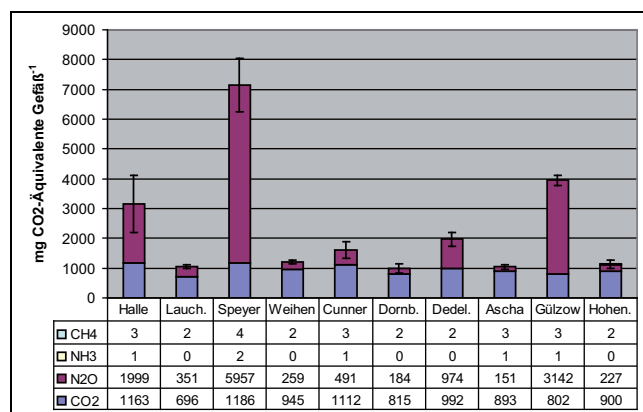
**Tab. 5. Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen den Bodenparametern und den Gasfreisetzungen**  
 Pearson correlation coefficients for soil characters and total release of different gases

Bodenparameter	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>
pH-Wert	-0,67*	-0,66*	-0,49	-0,52
Bodengruppe	-0,57	-0,73*	-0,67*	-0,83*
Sandanteil	0,64*	0,81*	0,61	0,88*
Tonanteil	-0,47	-0,70*	-0,53	-0,81*
N <sub>T</sub> -Gehalt	-0,42	-0,72*	-0,78	-0,79*
C <sub>T</sub> -Gehalt	-0,18	-0,25	-0,20	-0,26
C/N-Verhältnis	0,31	0,53	0,61	0,58
Humusgehalt	-0,57	-0,77*	-0,66*	-0,83*
Nitrifikations-Aktivität	-0,68*	-0,67*	-0,40	-0,44

\* signifikant bei einem Niveau von 5%



**Abb. 7. Freisetzung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in den Böden ohne Zusatz.**  
 Total release of CO<sub>2</sub> equivalents from soils without fermentation residue.



**Abb. 8. Freisetzung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in den Böden mit Gärrest-zusatz.**  
 Total release of CO<sub>2</sub> equivalents from soils with fermentation residue.

höchsten Freisetzungen an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ergaben aufgrund ihrer hohen N<sub>2</sub>O-Freisetzung die Böden aus Speyer, Gülzow und Halle, welche alle die Bodenart „lehmiger Sand“ aufwiesen.

**Diskussion**

Die vorgestellten Untersuchungen erfolgten im Labor an gestörten Bodenproben. Eine solche Bodenbehandlung

wurde gewählt, da bei einem Einsatz von Gärresten in der Pflanzenproduktion eine Injektion oder eine sofortige Einarbeitung gefordert werden. Bei diesen Bearbeitungsmaßnahmen wird ebenfalls die Struktur von natürlich gelagerten Böden zerstört. Die Untersuchungen sind somit in Anlehnung an Feldbedingungen durchgeführt worden. Abweichend zu natürlichen Bedingungen lagen aber die Temperaturen ständig zwischen 20 und 22°C, erfolgte ein ständiger geringer Luftdurchfluss durch die Gefäße und unterlag der Wassergehalt des Bodens keinen Schwankun-

gen. Aufgrund dieser Bedingungen sind die im Untersuchungszeitraum freigesetzten Gasmengen nicht auf Freilandbedingungen übertragbar.

Die Freisetzung aller untersuchten Gase hängt wesentlich vom Feuchtegehalt des Bodens ab. Der Zusatz von Gärrest zum Boden erhöht immer den Wassergehalt, partiell und zeitweise bis zur Wassersättigung. Für die hier vorgestellte Versuchsdurchführung wurden feuchte Böden verwendet. Dabei wurde für alle Böden nach der Gärrestzugabe ein Wassergehalt von 40% der maximalen Wasserkapazität angestrebt. Eine andere Variante hätte die Verwendung von trockenem Ausgangsboden sein können. Nach der Gärrestzugabe hätten dann aber unterschiedliche Wassergehalte im Boden vorgelegen. Dies wäre für einen Vergleich der Böden weniger gut geeignet gewesen. Bei einer solchen Versuchsdurchführung würden andere, in der Regel geringere Gasmengen freigesetzt werden und würden andere Abstufungen zwischen den Böden zustande kommen. Andererseits spricht für einen Versuchsansatz mit trockenem Ausgangsboden, dass es bei Zufuhr gleicher (Regen-) Wassermengen auf den sandigen Böden eher zu einer Wassersättigung kommt als auf den tonreichen Böden. Eine solche Versuchsanstellung würde dann eher natürlichen Bedingungen entsprechen.

In nicht frisch gedüngten Böden kam es zu den einzelnen Messterminen nur zu einer gesicherten Freisetzung von  $\text{CO}_2$ . Eine  $\text{NH}_3$ -Freisetzung trat nicht auf. Die  $\text{CH}_4$ - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Messwerte schwankten um den Nullpunkt.

Der Gärrestzusatz zum Boden erhöhte bei allen Gasen die Freisetzung, ausgenommen eine  $\text{NH}_3$ -Freisetzung bei drei Böden. Dabei betrug dieser Anstieg im Mittel der 10 Böden – unter Berücksichtigung der kürzeren Versuchsdauer bei den ungedüngten Böden – beim  $\text{CO}_2$  etwa das 7-fache und beim  $\text{N}_2\text{O}$  etwa das 79-fache. Dies bedeutet, dass der gärrestbedingte Anstieg der Emission bei  $\text{N}_2\text{O}$  fast 10 mal höher war als bei  $\text{CO}_2$ . Werden dabei noch die negativen Umweltwirkungen ( $\text{CO}_2$ -Äquivalente) berücksichtigt, lag der Anstieg der aus dem Gärrest freigesetzten  $\text{N}_2\text{O}$ -Mengen etwa 3000 mal höher als für die freigesetzten  $\text{CO}_2$ -Mengen.

Für  $\text{CH}_4$  und  $\text{NH}_3$  lassen sich solche Werte wegen den fehlenden bzw. negativen Daten bei den ungedüngten Böden nicht ermitteln. Die Darstellungen in den Abb. 7 und 8 lassen aber erkennen, welchen geringen Anteil diese beiden Gase an der Gesamtfreisetzung aller 4 Gase, ausgedrückt als  $\text{CO}_2$ -Äquivalente, einnehmen. Wenn eine vollständige Einbringung des Gärrestes in den Boden vorgenommen wird, kann eine  $\text{NH}_3$ -Freisetzung auch vollständig ausgeschlossen werden (DÖHLER et al., 2002; HERBST und GANS, 2011). Bei den anderen Gasen bleibt dagegen immer eine Freisetzung bestehen. Bei einer Injektion von Gülle oder Gärrest in den Boden kann die  $\text{N}_2\text{O}$ -Freisetzung sogar ansteigen (WULF et al., 2002; MÖLLER und STINNER, 2009; HERBST und GANS, 2011).

Insgesamt wird ersichtlich, welche besondere Bedeutung der  $\text{N}_2\text{O}$ -Freisetzung zukommt. Deshalb müssen die Maßnahmen zur Minderung der Freisetzung von klimarelevanten Gasen vor allem auf dieses Gas gerichtet werden.

Ein positives Ergebnis der Untersuchungen für die Umwelt besteht darin, dass, wie bereits oft nachgewiesen (HÜTSCH, 2001; LEIDEL et al., 2000; DITTERT und MÜHLING, 2009), der Boden als Senke für  $\text{CH}_4$  fungiert. Das bei einem Gärresteinsatz freigesetzte  $\text{CH}_4$  stellt offensichtlich nur im Gärrest gelöstes  $\text{CH}_4$  dar, welches unmittelbar nach der Gärrestapplikation freigesetzt wird. Danach tritt keine weitere  $\text{CH}_4$ -Freisetzung mehr auf (LEIDEL et al., 2000; DITTERT und MÜHLING, 2009), während sie bei den anderen Gasen weiter anhält ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ) bzw. erst beginnt ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Der Einfluss der Bodenherkunft kommt deshalb bei  $\text{CH}_4$  nur an den ersten 1 bis 3 Tagen nach der Gärrestapplikation zum Tragen.

Wie beim  $\text{CH}_4$  kam es auch beim  $\text{CO}_2$  zum ersten Messtermin zur höchsten Freisetzung. Das freigesetzte  $\text{CO}_2$  stammte zu diesem Termin offensichtlich vor allem auch aus im Gärrest gelöstem  $\text{CO}_2$ . Nachfolgend kam es aber im Gegensatz zum  $\text{CH}_4$  zu einer weiteren  $\text{CO}_2$ -Freisetzung infolge der mikrobiellen Zersetzung der organischen Substanz des Gärrestes. Weiterführende Untersuchungen mit Gärrest-Feststoff haben dazu ergeben, dass der Gärrestzusatz die  $\text{CO}_2$ -Freisetzung aus dem Boden-Pool stimuliert hat (HERBST, 2013). Damit wurde der Boden durch den Gärresteinsatz zu einer verstärkten  $\text{CO}_2$ -Quelle.

Die ermittelten Korrelationskoeffizienten bestätigen die bekannte Tatsache, dass es auf tonarmem Boden zu einer erhöhten  $\text{NH}_3$ -Freisetzung kommt (DÖHLER et al., 2002). Da die geprüften lehmigen Sandböden einen relativ niedrigen Humusgehalt aufwiesen, bestand eine ebenso enge Beziehung auch zum Humusgehalt der Böden, aber mit negativem Vorzeichen.

Bemerkenswert ist die enge Beziehung zwischen der  $\text{NH}_3$ - und  $\text{CH}_4$ -Freisetzung. Dies bedeutet, dass es bei den ton- und humusarmen Böden auch zu einer erhöhten  $\text{CH}_4$ -Freisetzung gekommen ist, wofür ebenfalls der hohe Korrelationskoeffizient zum Sandanteil spricht. Offensichtlich weisen diese Böden ein geringeres Oxidationsvermögen für  $\text{CH}_4$  auf, denn dieses ist für die Senkenwirkung des Bodens für  $\text{CH}_4$  ein entscheidender Faktor (LEIDEL et al., 2000; HÜTSCH, 2001). Darin könnte der Hauptgrund für die unterschiedlichen  $\text{CH}_4$ -Freisetzungen liegen, wofür aber bei den durchgeführten Untersuchungen der analytische Nachweis fehlt.

Bemerkenswert ist auch das Ergebnis des Vergleiches der Verläufe der  $\text{NH}_3$ - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Freisetzung (Abb. 2). Zu einem deutlichen Anstieg der  $\text{N}_2\text{O}$ -Freisetzung war es erst gekommen, als die  $\text{NH}_3$ -Freisetzung im Abklingen war. Dieses Ergebnis ist kein Einzelfall, sondern wurde in gleicher Weise nicht nur bei den anderen Böden dieses Versuchsansatzes, sondern auch bei allen anderen Versuchsansätzen festgestellt. Offensichtlich wirkte das im Boden freiwerdende  $\text{NH}_3$  wachstumshemmend auf die nitrifizierenden und denitrifizierenden Mikroorganismen im Boden. Jedoch kam es auch in Böden und Versuchsansätzen ohne  $\text{NH}_3$ -Freisetzung erst nach mehreren Tagen zu einem Anstieg der  $\text{N}_2\text{O}$ -Freisetzung. Dies und der deutliche Abfall nach einem ausgeprägten Maximum sprechen dafür, dass bereits bei der Nitrifikation des zugeführten Ammoniums  $\text{N}_2\text{O}$  freigesetzt wird. Auch die in

eigenen Messungen und in anderen Untersuchungen (THOMPSON, 1989; DE KLEIN et al., 1996; KRAFT et al., 2011; SEIZ et al., 2013; BENCKISER et al., 2013) nachgewiesene Senkung der N<sub>2</sub>O-Freisetzung durch Nitrifikationsinhibitoren deuten auf die N<sub>2</sub>O-Freisetzung im Nitrifikationsprozess hin. Dafür spricht auch der unmittelbare Anstieg der N<sub>2</sub>O-Freisetzung nach wiederholter Ausbringung von ammoniumhaltigen Düngemitteln (MERBACH et al., 2001) und die höhere N<sub>2</sub>O-Freisetzung nach NH<sub>4</sub>-Düngung als nach NO<sub>3</sub>-Düngung (HERBST et al., 2012).

Unklar bleibt, weshalb die Böden mit der Bodenart „lehmiger Sand“ (Speyer, Gülzow, Halle, Dedelow) die höchste N<sub>2</sub>O-Freisetzung aufwiesen. Dabei liegt der Boden Speyer im Fokus der Betrachtungen, da er sowohl im ungedüngten als auch im gedüngten Boden mit Abstand die höchste N<sub>2</sub>O-Freisetzung zeigte. Gegebenenfalls könnte bei den sandigen Böden ein Wassergehalt von 40% der maximalen Wasserkapazität eine abweichende Wirkung aufweisen als bei den tonreichen Böden, denn der Wassergehalt des Bodens spielt eine überragende Rolle bei der N<sub>2</sub>O-Freisetzung (RUSER et al., 2006; SENBAYRAM et al., 2009; HERBST et al., 2013). Auch könnten spezifische Bodenparameter eine Rolle spielen. Zu diesen Fragen sind weitere Untersuchungen notwendig.

Vergleichende Untersuchungen zur Freisetzung der 4 beobachteten Gase nach Gärrestapplikation hat AUGUSTIN (2012) an den Standorten Gülzow, Dedelow, Ascha, Dornburg und Hohenschulen, welche alle in die dargestellte Laborprüfung einbezogen waren, vorgenommen. Bei der NH<sub>3</sub>-Freisetzung weichen die Unterschiede zwischen den Böden stark von den vorgestellten Laborversuchen ab, was neben unterschiedlichen Witterungsbedingungen und Gärresten vor allem dadurch bedingt ist, dass an den Standorten unterschiedliche Applikationsmethoden angewandt wurden. Bei der N<sub>2</sub>O-Freisetzung kam es am Standort Gülzow zur höchsten Freisetzung, was mit den Laborergebnissen in Übereinstimmung steht. Gründe für die Unterschiede zwischen den Standorten und für die hohe N<sub>2</sub>O-Freisetzung am Standort Gülzow konnten von AUGUSTIN (2012) nicht eindeutig identifiziert werden.

SEIZ et al. (2013) haben die N<sub>2</sub>O-Freisetzung am sandigen Standort Speyer mit der am lehmigen Standort Hohenheim verglichen. Dabei lag sie im Gegensatz zu den vorliegenden Laborergebnissen auf dem lehmigen Standort höher als auf dem sandigen. Dies wird auf die schlechtere Durchlüftung des lehmigen Bodens zurückgeführt. Diese kommt darin zum Ausdruck, dass das wassergefüllte Porenvolumen im Boden Speyer im Mittel bei ca. 30% und im Boden Hohenheim bei ca. 50% lag, was wiederum auf die besondere Bedeutung des Wassergehaltes bzw. des wassergefüllten Porenvolumens bei der N<sub>2</sub>O-Freisetzung hinweist (RUSER et al., 2006; AUGUSTIN, 2012).

Der von KÖSTER et al. (2013) angestellte Vergleich von 3 Böden unter Einbeziehung des sandigen Lehmbodens aus Hohenschulen führte in Inkubationsversuchen nach Zugabe einer KNO<sub>3</sub>-Lösung zu dem Ergebnis, dass die N<sub>2</sub>O-Freisetzung in diesem Boden zwischen der eines sandigen und eines tonigen Bodens lag. Dieses Ergebnis weicht damit vom Trend der dargestellten Laborversuche bei

Zugabe eines Gärrestes ab. In den Untersuchungen von ABUBAKER et al. (2013) war dagegen die N<sub>2</sub>O-Freisetzung nach Gärrest- und Gülleapplikation bei einem Sandboden höher als bei einem Tonboden.

Zusammengefasst haben die durchgeführten Laborversuche, in Anlehnung an die Ergebnisse von ABUBAKER et al. (2013), gezeigt, dass die Freisetzung von Lachgas nach Gärreisteinsatz auf den leichten Böden – entgegen häufiger Annahmen – höher liegen kann als auf den schweren Böden. Diese Aussage muss natürlich durch Feldmessungen überprüft werden, was aber nur unter vergleichbaren Bedingungen vorgenommen werden kann und deshalb mit einem sehr hohen Aufwand verbunden ist.

## Danksagung

Den genannten Feldversuchsstationen wird für die Bereitstellung der Böden und dem BMELV/FNR (FKZ 22025207) für die Bereitstellung von Finanzmitteln gedankt.

## Literatur

- ABUBAKER, J., M. ODLARE, M. PELL, 2013: Nitrous Oxide Production from Soils Amended with Biogas Residues and Cattle Slurry. *J. Environ. Qual.* **42**, 1046-1058.
- AUGUSTIN, J., 2012: (unveröffentlicht).
- BENCKISER, G., E. CHRIST, T. HERBERT, A. WEISKE, J. BLOME, M. HARDT, 2013: The nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole-phosphat (DMPP) - quantification and effects on soil metabolism. *Plant and Soil* **371**, 257-266.
- DE KLEIN, C.A.M., R.S.P. VAN LOGTESTIJN, H.G. VAN DE MEER, J.H. GEURINK, 1996: Nitrogen losses due to denitrification from cattle slurry injected into grassland soil with and without a nitrification inhibitor. *Plant and Soil* **183**, 161-170.
- DITTERT, K., K.H. MÜHLING, 2009: Emission klimarelevanter Spurengase in der intensiven Pflanzenproduktion. *J. Verbr. Lebensm.* **4**, 207-211.
- DÖHLER, H., H. MENZI, M. SCHWAB, 2002: Emissionen bei der Ausbringung von Fest- und Flüssigmist und Minderungsmaßnahmen. *KTBL-Schrift* **406**, 163-178.
- EISSNER, F., F. HERBST, J. AUGUSTIN, B. APELT, W. GANS, 2013: Die Wirkung von Düngestoffen und des Frostes/Auftauens auf die Freisetzung von klimarelevanten Gasen. *Mitt. Agrarwissenschaften* **24**, 60-68.
- HERBST, F., W. GANS, 2011: Freisetzung von klimarelevanten Gasen beim Einsatz von Gülle und Gärresten sowie Möglichkeiten ihrer Minderung. *Mitt. Agrarwissenschaften* **21**, 74-81.
- HERBST, F., O. SPOTT, W. GANS, 2012: Auswirkungen eines Strohzusatzes zur Gärrestdüngung auf Emissionen klimarelevanter Gase aus dem Boden. *J. f. Kulturpflanzen* **64** (10), 384-391.
- HERBST, F., J. AUGUSTIN, O. SPOTT, W. GANS, 2013: Der Einfluss unterschiedlicher Bodenfeuchten auf gasförmige N-Verluste aus dem Boden nach Gärrestdüngung. *Intern. wiss. Konf. 18./19.10.2012 in Bernburg-Strenzfeld* (im Druck).
- HERBST, F., 2013: (unveröffentlicht).
- HÜTSCH, B.W., 2001: Methane oxidation, nitrification, and counts of methanotrophic bacteria in soils from long-term fertilization experiment ("Ewiger Roggenbau" at Halle). *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **164**, 21-28.
- KÖSTER, J.R., R. WELL, K. DITTERT, A. GIESEMANN, D. LEWICKA-SZCZEBAK, K.-H. MÜHLING, A. HERRMANN, J. LAMMEL, M. SENBAYRAM, 2013: Soil denitrification potential and its influence on N<sub>2</sub>O reduction and N<sub>2</sub>O isotopomer ratios. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **27**, 1-11.
- KRAFT, J.-U., F. HERBST, W. GANS, 2011: Zur Wirkung des Nitrifikationshemmers PIADIN bei Gülle- und Gärrest-Düngung. *Mitt. Agrarwissenschaften* **18**, 95-104.
- LEIDEL, S., J. AUGUSTIN, D. KÖPPEN, W. MERBACH, 2000: Einfluss unterschiedlicher organisch-mineralischer N-Düngung auf die Lachgas- und Methanemission eines ackerbaulich genutzten Stand-



- ortes Norddeutschlands. Arch. Acker- u. Pfl.bau u. Bodenk. **45**, 453-469.
- MERBACH, W., J. AUGUSTIN, W. GANS, 2001: Nitrous Oxide Emission from Fen Mires in Dependence of Anthropogenic Activities. *J. Appl. Botany* **75**, 118-123.
- MOSIER, A.R., C. KROEZE, C. NEVISON, O. OENEMA, S. SEITZINGER, O. VAN CLEEMPUT, 1998: Closing the global N<sub>2</sub>O-budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. OECD/IPCC/IEA phase II development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **52**, 225-248.
- MÖLLER, K., W. STINNER, 2009: Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *Eur. J. Agron.* **30**, 1-16.
- RUSER, R., H. FLESSA, R. RUSSOW, G. SCHMIDT, F. BUEGGER, J.C. MUNCH, 2006: Emission of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biol. Biochem.* **38**, 263-274.
- SEIZ, P., A. HEGER, M. ARMBRUSTER, T. MÜLLER, F. WIESLER, R. RUSER, 2013: Einfluss von N-Düngung, Nitrifikationshemmstoff und Abfuhr von Ernterückständen auf die N<sub>2</sub>O-Freisetzung von zwei gemüsebaulich genutzten Standorten. VDLUFA-Tagung Berlin, Schriftenreihe **69**, 53.
- SENBAYRAM, M., R. CHEN, K.H. MÜHLING, K. DITTERT, 2009: Contribution of nitrification and denitrification to nitrous oxide emissions from soils after application of biogas waste and other fertilizers. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **23**, 2489-2498.
- THOMPSON, R.B., 1989: Denitrification in slurry-treated soil: Occurrence at low temperatures, relationship with soil nitrate and reduction by nitrification inhibitors. *Soil Biol. Biochem.* **21**, 875-882.
- WULF, S., M. MAETING, J. CLEMENS, 2002: Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide and methane emissions after spreading: II. Greenhouse gas emissions. *J. Environmental Quality* **31**, 1795-1801.