

Friedhelm Herbst¹, Jürgen Augustin², Oliver Spott³, Wolfgang Gans¹

Vergleich der Freisetzung von Stickstoffgasen (NH₃, N₂O, N₂) nach Gärrestapplikation

Comparison of the release of nitrogen gases (NH₃, N₂O, N₂) after application of fermentation residues

92

Zusammenfassung

Anhand von acht Laborversuchen wird die Wirkung von Einflussfaktoren auf die Freisetzung von Stickstoffgasen nach einer Gärrestapplikation demonstriert und werden dazu Vergleiche zwischen den Gasen vorgenommen. Übereinstimmungen ergaben sich bei der NH₃- und N₂O-Freisetzung in Bezug auf die Temperatur und die Art der Düngung. Unterschiede zeigten sich im zeitlichen Verlauf der Gasfreisetzungen und in der Reaktion auf die Applikationsmethode, die Bodenfeuchte, die Gärrest-N-Menge und den Zusatz von Stroh sowie eines Nitrifikationsinhibitoren. Die N₂O- und N₂-Freisetzungen nahmen mit steigender Bodenfeuchte zu. Im hohen Bodenfeuchtebereich stieg besonders die N₂O-Freisetzung an und lag über der Freisetzung von N₂. Der Zusatz von Stroh zur Gärrestapplikation kann einen differenzierten Einfluss auf die N₂O- und N₂-Freisetzungen ausüben, der offensichtlich vom Bodenfeuchtegehalt abhängig ist.

Stichwörter: Gärrest, Emission, Ammoniak, Lachgas, elementarer Stickstoff

Abstract

On the basis of eight laboratory experiments, the effect of factors is demonstrated on the release of nitrogen gases after fermentation residue application and comparisons between gases are made. Similarities were found in the behaviour of NH₃ and N₂O release with respect to the in-

fluence of temperature and the applied fertilizer. Differences occurred in the temporal dynamics of gas release and in response to the application method, the soil moisture content, the rate of fertilizer N application and the addition of straw and a nitrification inhibitor. The N₂O and N₂ release increased with increasing soil moisture. At high soil moisture, particularly N₂O release increased and was partially above the release rate of N₂. The addition of straw to the application of fermentation residue showed a differential influence on N₂O and N₂ release, which is obviously dependent on soil moisture content.

Key words: Fermentation residue, emission, ammonia, nitrous oxide, elemental nitrogen

Einleitung

Der Einsatz von Gärresten in der Pflanzenproduktion ist mit der Freisetzung zahlreicher Gase verbunden, zu denen u.a. NH₃, N₂O und N₂ gehören. Ihre Freisetzung aus dem Boden in die Atmosphäre stellt nicht nur einen Stickstoffverlust für die Pflanzenernährung dar, sondern ist im Fall von NH₃ und N₂O auch mit negativen Folgen für die Umwelt verbunden (FOWLER et al., 2013). Die Zielstellung muss deshalb sein, die mit der Düngung einhergehenden Stickstoff- und auch Kohlenstoff-Verluste auf ein Minimum zu reduzieren (DÖHLER et al., 2002; SUTTON, 2011).

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

Institut

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Professur für Pflanzenernährung, Halle¹
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V., Institut für Landschaftsbiogeochemie, Müncheberg²
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Bodenphysik, Halle³

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

7. Februar 2015

bei dem die Prüfung von Applikationsmethoden und Zusatzstoffen zur Verlustminderung im Vordergrund stand. Dazu fanden von 2008 bis 2013 zahlreiche Feld-, Mikroparzellen-, Gewächshaus- und Laborversuche statt, in denen neben den oben genannten Gasen auch CO₂ und CH₄ untersucht wurden. In insgesamt 33 Laborversuchen erfolgte vor allem die Prüfung von Einflussfaktoren auf die Gasfreisetzungen. Aus diesem Versuchspool sind 8 Versuche ausgewählt worden, an denen die Wirkung von Einflussfaktoren auf die Freisetzung stickstoffhaltiger Gase exemplarisch demonstriert wird und dabei Vergleiche der Gasfreisetzungen angestellt werden.

Material und Methoden

In den Versuchen mit der Kennung „L“ wurden die NH₃- und N₂O-Freisetzung und im Versuch mit der Kennung „N4“ die N₂O- und N₂-Freisetzungen erfasst und verglichen (Tab. 1). Alle Untersuchungen mit der Kennung „L“ erfolgten bei Tageslichtbedingungen und soweit nicht anders dargestellt bei Raumtemperatur. Als Reaktionsgefäße dienten bei den Versuchen mit der Kennung „L“ Saugflaschen aus Glas (Volumen 1,1 L, Bodenoberfläche 86 cm²) und im Versuch „N4“ Stechzylinder (Durchmesser 6,7 cm, Höhe 6,0 cm). In den Versuchen wurden jeweils 5 Varianten mit jeweils 3 Wiederholungen pro Variante (Versuche mit der Kennung „L“) bzw. 4 Wiederholungen pro Variante im Versuch „N4“ geprüft. Die Prüffragen und Varianten sind im Ergebnisteil aufgeführt.

In den Versuchen mit der Kennung „L“ wurde während des gesamten Versuches ein Luftstrom (Außenluft) mittels Schlauchpumpe durch die Reaktionsgefäße mit einer Fließ-

rate von 3,8 ml pro Minute geleitet. Die aus den Gefäßen abströmende Luft wurde über jeweils ein 20 ml Septum-Vial sowie nachfolgend eine 50 ml DURAN-Flasche (mit 2%iger Borsäure gefüllt) geleitet. In den Vials wurde die N₂O-Konzentration gaschromatographisch (GC-14B, Shimadzu) und in den Waschflaschen die adsorbierte NH₃-Menge potentiometrisch bestimmt. Parallel dazu erfolgten in dreifacher Wiederholung die gleichen Bestimmungen in der in die Gefäße einströmenden Außenluft. Die Flussraten der untersuchten Gase ergaben sich aus der Differenz der Konzentrationen zwischen einströmender und abströmender Luft, bezogen auf Gefäß, Volumenstrom und Zeit.

Im Versuch „N4“ wurde zur simultanen Ermittlung von aktuellen N₂- und N₂O-Flussraten eine Modifikation der sogenannten Heliuminkubationsmethode vorgenommen (BUTTERBACH-BAHL et al., 2002). Dazu wurden von den gedüngten Varianten Substratmischungen hergestellt und mit definierter Lagerungsdichte in Stechzylindern (250 cm³) eingefüllt. Diese wurden in gasdichte Inkubationsgefäße überführt. Danach musste in den Inkubationsgefäßen die normale Luft im Zuge mehrerer Evakuierungs- und Spülzyklen durch ein künstliches, N₂-freies Helium-Sauerstoff-Spuren gasgemisch (21,3% O₂, 78,6% He, 337 ppm CO₂, 374 ppb N₂O, 1882 ppb CH₄ und ca. 5 ppm N₂) ersetzt werden. Diese Gasmischung durchströmte dann fortlaufend bei einer Temperatur von 20°C den Headspace der Inkubationsgefäße. Die Bestimmung der N₂-Konzentration erfolgte gaschromatographisch mithilfe eines Micro-GC (Agilent Technologies, 3000 Micro GC, Detektor: TCD) und die Bestimmung der N₂O-Konzentration wie oben beschrieben. Die Berechnung der Flussraten fußte ebenfalls auf dem oben beschriebenen Ansatz.

Tab. 1. Eingesetzte Böden und Gärreste
Used soils and fermentation residues

Parameter	Versuch							
	L2	L4	L9	L12	L19	L25	L26	N4
	Böden							
Herkunft ¹	Lau	Lan	Hal	Cun	Hal	Hal	Dor	Dor
Bodenart	L	L	IS	sL	IS	IS	L	L
pH-Wert	5,9	6,1	6,3	6,4	6,2	6,3	7,4	7,4
N _{min} mg/100g	0,8	0,2	0,4	2,9	1,1	0,4	2,2	2,2
N _t %	0,141	0,127	0,090	0,116	0,113	0,090	0,085	0,085
C _t %	1,69	0,14	1,13	1,18	1,42	1,13	1,57	1,57
Menge g/Gef.	500	350	400	350	400	55	55	270
	Gärreste							
TS %	8,2	10,1	6,6	8,8	4,4	4,4	4,4	4,4
pH-Wert	8,1	7,6	8,6	7,9	7,8	7,8	7,8	7,7
NH ₄ -N % FM	0,320	0,112	0,139	0,304	0,251	0,251	0,251	0,245
N _t % in FM	0,575	0,624	0,266	0,563	0,444	0,444	0,444	0,444

¹ Bodenherkunft: Lau = Bad Lauchstädt, Lan = Langendorf, Hal = Halle, Cun = Cunnersdorf, Dor = Dornburg

In den Versuchen wurden verschiedene Böden aus der Ackerkrume sowie unterschiedliche Gärreste verwendet (Tab. 1). Der Bodenfeuchtegehalt war gemäß dem Zustand bei der Probenahme unterschiedlich und wurde nicht auf ein einheitliches Ausgangsniveau eingestellt. Durch den Gärrestzusatz wurde der Boden in jedem Fall angefeuchtet. Im Versuchsverlauf nahm der Wassergehalt des Bodens in der Regel nur geringfügig ab. Die Einsatzmenge an Boden lag zwischen 55 und 500 g pro Gefäß. Die Einsatzmenge an Gärrest wurde auf der Grundlage des NH_4 -Gehaltes festgelegt und lag in allen Versuchen – außer bei Versuchen mit variabler Aufwandmenge – bei äquivalent 100 kg $\text{NH}_4\text{-N/ha}$ bezogen auf die Bodenoberfläche der Reaktionsgefäße. Die Versuchsdauer schwankte für die Versuche mit der Kennung „L“ zwischen 17 und 38 Tagen. Dabei wurden die N_2O -Messungen in der Regel einige Stunden nach der Applikation, danach in den ersten Tagen täglich (Spüldauer der Vials 24 h) und nachfolgend im Abstand von 2 bis 3 Tagen vorgenommen. Die Messung der NH_3 -Freisetzung erfolgte täglich und so lange wie NH_3 auftrat. Im Versuch „N4“ wurden täglich bis 10 Tage nach Versuchsansatz N_2O und N_2 analysiert.

Das in den Versuchen eingesetzte Weizenstroh war auf ca. 1 cm Länge zerkleinert und wurde dem Boden zusammen mit dem Gärrest in einer Aufwandmenge von äquivalent 50 dt/ha untergemischt. Der Nitrifikationsinhibitor PIADIN wurde der Gärrestmenge zugesetzt und mit dieser vermischt.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt für die Versuche mit der Kennung „L“ in freigesetzte N-Menge pro Gefäß und Tag und für den Versuch „N4“ in freigesetzte N-Menge pro Quadratmeter und Stunde. In den Abbildungen werden nicht die Unterschiede zwischen den Prüfvarianten betrachtet, sondern wird nur ein Vergleich der Verläufe der Freisetzung der Gase vorgenommen. Es wird deshalb auf die Angabe der Standardabweichungen verzichtet, da dadurch die Übersichtlichkeit stark eingeschränkt werden würde. Außerdem wäre ein Vergleich der Standardabweichung zwischen den Abbildungen nicht möglich, da –

wiederum zur besseren Übersichtlichkeit – unterschiedliche Maßeinteilungen der Gasfreisetzung verwendet werden. Die Angabe der Standardabweichung in den Abbildungen könnte daher beim Vergleich der Gase gegebenenfalls zu Fehlinterpretationen führen.

Ergebnisse

Im Versuch „L2“ erfolgte eine Prüfung verschiedener Applikationsmethoden (Abb. 1). Wenn der applizierte Gärrest an der Oberfläche verblieb, trat die höchste NH_3 -Freisetzung auf. Je mehr der Gärrest in den Boden eingebracht wurde, umso mehr wurde diese Freisetzung reduziert. Beim N_2O war dies nicht der Fall. Eine Minderung der Freisetzung trat nur auf, wenn eine Einarbeitung des Gärrestes erfolgte. Eine Injektion des Gärrestes in den Boden, sowohl vollständig als auch teilweise, führte zur gleich hohen N_2O -Freisetzung wie bei der oberflächigen Applikation.

Im Versuch „L4“ wurde der Zusatz des Nitrifikationsinhibitors PIADIN zur Gärrestapplikation geprüft (Abb. 2). Für die NH_3 -Freisetzung konnte kein Effekt des eingesetzten Inhibitors festgestellt werden, während die N_2O -Freisetzung deutlich vermindert wurde.

Im Versuch „L9“ wurde der Zusatz von Gärrest mit dem Zusatz einer Ammoniumsulfat-Lösung, jeweils mit und ohne Strohzugabe, verglichen (Abb. 3). Bei der Gärrestdüngung kam es sowohl zu einer NH_3 - als auch N_2O -Freisetzung, welche bei der Ammoniumsulfatdüngung nicht auftraten. Der Strohzusatz zum Gärrest reduzierte die Freisetzung von Ammoniak und verhinderte die Freisetzung von Lachgas fast vollständig.

Im Versuch „L12“ wurde die Wirkung unterschiedlicher Bodenfeuchten geprüft. Die in der Abb. 4 aufgeführten Feuchtegehalte stellen die bei verschiedenen Ausgangsgehalten, die durch Wasserzugabe bzw. Bodentrocknung geschaffen wurden, nach der Gärrestzugabe im Boden vorliegenden Wassergehalte dar. Steigende Feuchtegehalte führten zur Abnahme der NH_3 -Verflüch-

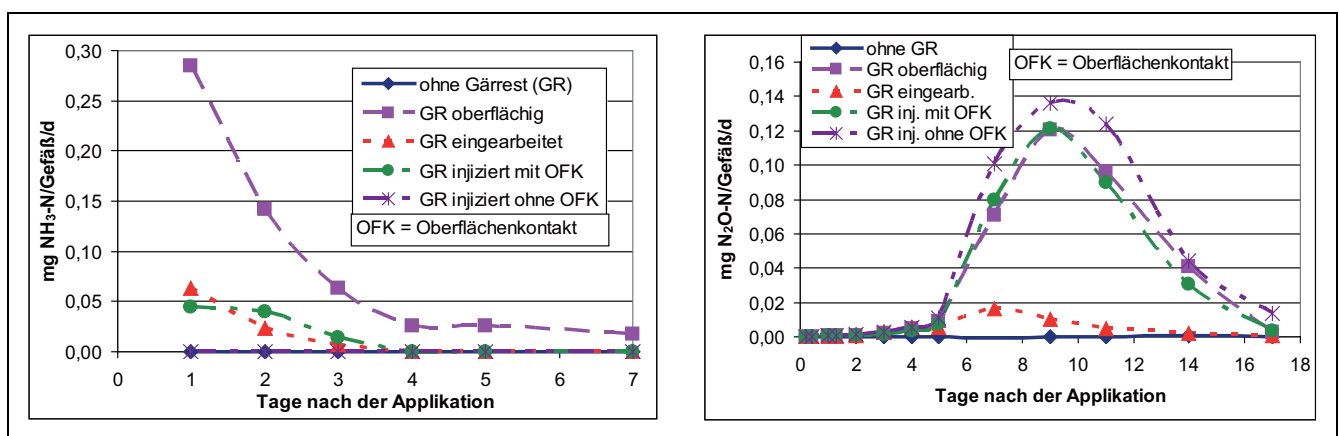


Abb. 1. Einfluss der Applikationsart auf die Freisetzung von Ammoniak (links) und Lachgas (rechts).
Effect of the type of application on the release of ammonia (left) and nitrous oxide (right).

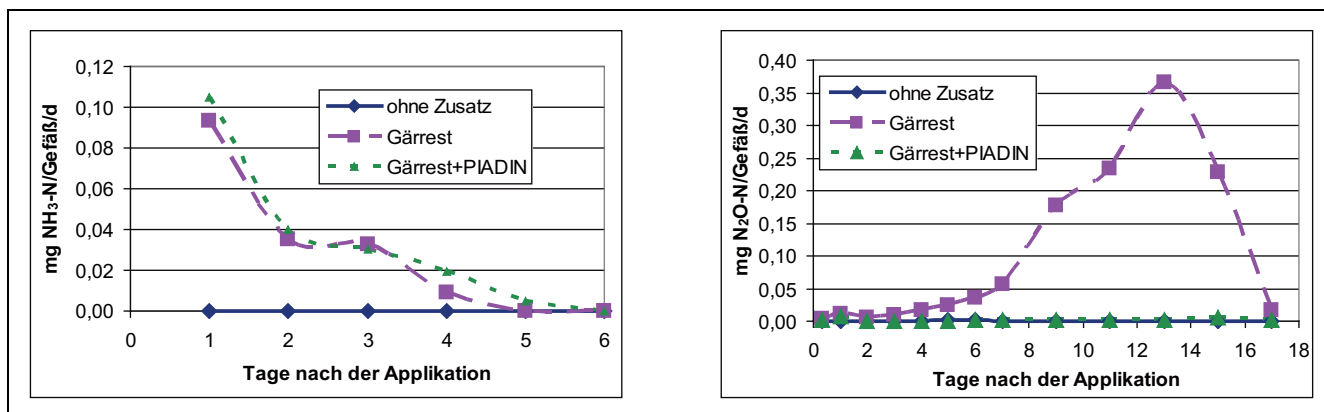


Abb. 2. Einfluss des Zusatzes des Nitrifikationsinhibitors PIADIN auf die Freisetzung von Ammoniak (links) und Lachgas (rechts).
Effect of the addition of the nitrification inhibitor PIADIN on the release of ammonia (left) and nitrous oxide (right).

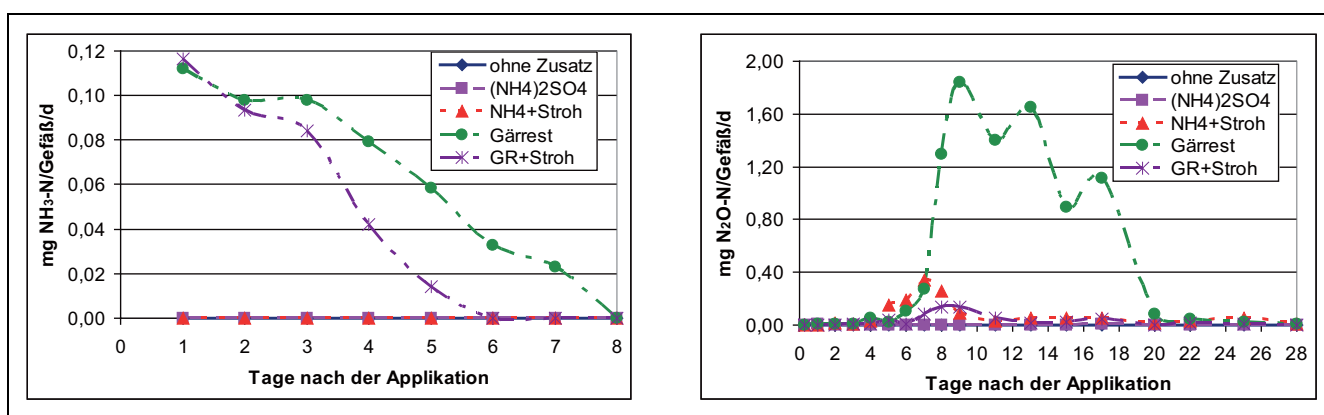


Abb. 3. Einfluss der Düngerart und des Zusatzes von Stroh auf die Freisetzung von Ammoniak (links) und Lachgas (rechts).
Effect of the addition of fertilizer and straw on the release of ammonia (left) and nitrous oxide (right).

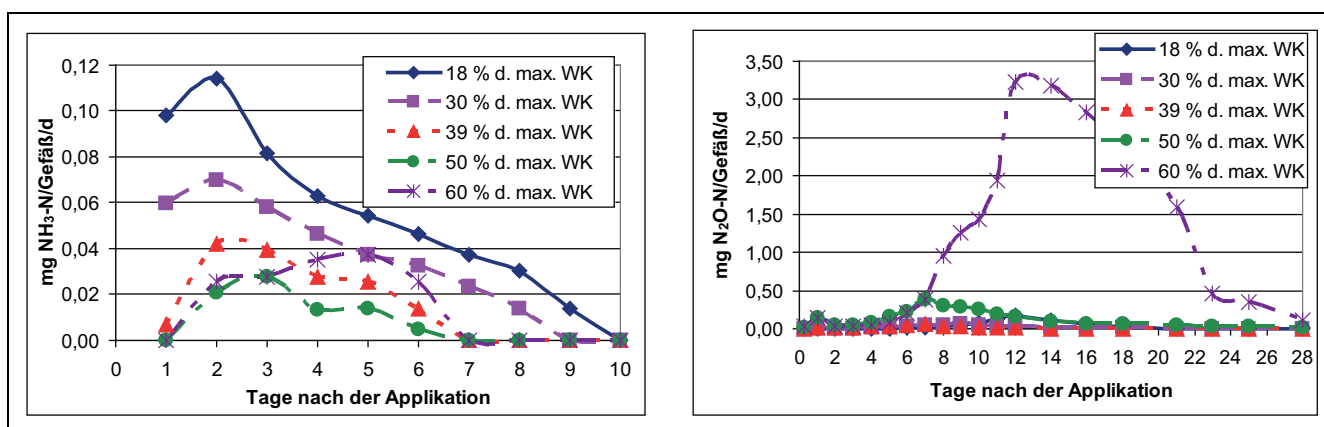


Abb. 4. Einfluss der Bodenfeuchte auf die Freisetzung von Ammoniak (links) und Lachgas (rechts).
Effect of soil moisture on the release of ammonia (left) and nitrous oxide (right).

tigung. Die N_2O -Freisetzung verhielt sich gegensätzlich zur NH_3 -Verflüchtigung. Sie stieg mit zunehmender Bodenfeuchte an und erreichte beim höchsten Feuchtegehalt ein deutliches Maximum.

Im Versuch „L19“ erfolgte eine Prüfung von verschiedenen Düngungsvarianten bei drei Temperaturstufen.

Dazu wurden die Reaktionsgefäße im Kühlschrank ($2^\circ C$), im Klimaschrank ($12^\circ C$) und im Labor ($22^\circ C$) aufgestellt. Für die Darstellung der Ergebnisse wurde die Düngungsvariante „Gärrest oberflächlich appliziert ohne Einarbeitung“ ausgewählt (Abb. 5). Die NH_3 -Freisetzung war nach Versuchsansatz bei $22^\circ C$ am höchsten und bei $2^\circ C$

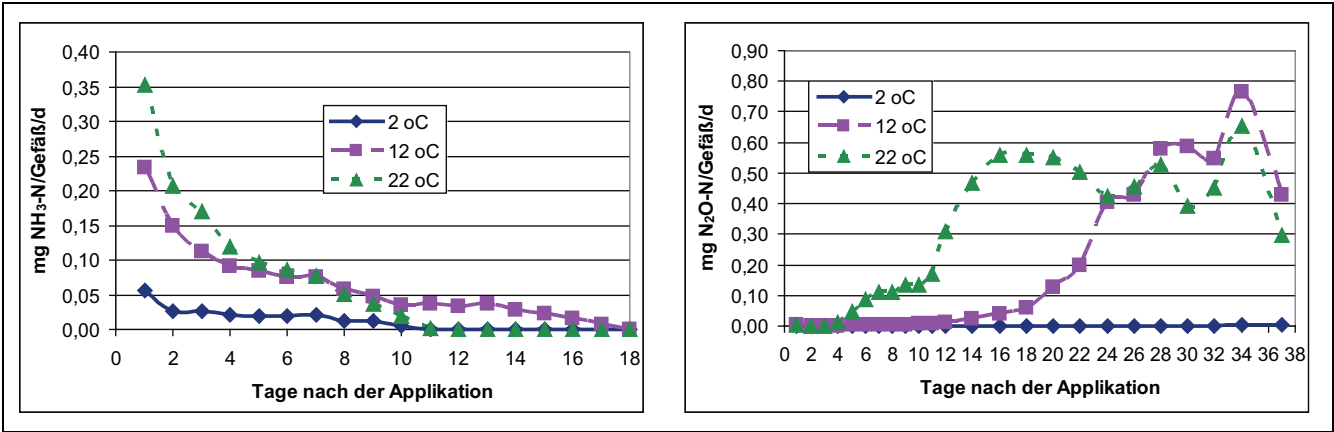


Abb. 5. Einfluss der Temperatur auf die Freisetzung von Ammoniak (links) und Lachgas (rechts).
Effect of temperature on the release of ammonia (left) and nitrous oxide (right).

am niedrigsten. Bei diesen beiden Temperaturstufen war die Freisetzung bereits nach 10 Tagen beendet, wohingegen sie bei 12°C bis 17 Tage nach der Applikation anhält. Beim Lachgas begann die Freisetzung zuerst bei der höchsten Temperaturstufe. Bei 2°C wurde im Untersuchungszeitraum von 38 Tagen keine N₂O-Freisetzung festgestellt.

In den Versuchen „L25“ mit lehmigem Sandboden und „L26“ mit Lehm Boden wurde der Einfluss steigender Gärrest-N-Mengen geprüft. Um Änderungen der Bodenfeuchte bei steigender Gärrest-Applikationsmenge zu vermeiden, wurde die Zunahme der Gärrest-N-Menge durch die Zugabe von Ammoniumsulfat zum Gärrest simuliert. Die in den Abbildungen aufgeführten N-Stufen stellen die nach der Düngung im Boden vorliegende Menge an mineralischem Stickstoff dar. In beiden Versuchen erfolgte im Versuchsverlauf eine nochmalige Befeuchtung des Bodens, um diesen Effekt zu prüfen. Steigende Gärrest-N-Mengen führten in beiden Versuchen zu einer zunehmenden NH₃-Freisetzung (Abb. 6 und 7). Die zwischenzeitliche Bodenbefeuchtung senkte diese Freisetzung. Im lehmigen Sandboden war die Freisetzung höher

als im Lehm Boden und hielt über einen längeren Zeitraum an. Jedoch war auch im Lehm Boden die anhaltend hohe Freisetzung bei der höchsten N-Stufe beachtlich.

Die N₂O-Freisetzung zeigte ein gegensätzliches Bild. Mit steigender Gärrest-N-Menge nahm die N₂O-Freisetzung im Untersuchungszeitraum prinzipiell ab. Im lehmigen Sandboden setzte diese erst nach der Bodenbefeuchtung bei der niedrigsten N-Stufe ein. Die Bodenbefeuchtung erhöhte im Gegensatz zur NH₃-Freisetzung die N₂O-Freisetzung.

Im Versuch „N4“ wurde die N₂O- und N₂-Freisetzung eines Lehm Bodens bei zwei Feuchtestufen nach Zugabe von Gärrest, mit und ohne Zusatz von Stroh, untersucht (Abb. 8 und 9). Nach der Zugabe des Gärrestes betrug der Wassergehalt eines anfangs lufttrockenen Bodens 5,4 Gew.-% und eines anfangs feuchten Bodens 15,8 Gew.-%. Die Erhöhung der Bodenfeuchte ging zwangsläufig mit der Verringerung des Anteils luftgefüllter Poren am gesamten Porenvolumen des Bodens einher (nicht dargestellt). Zu einer erhöhten N₂O-Freisetzung kam es nur bei feuchtem Boden und bei einem gemeinsamen Einsatz von Gärrest und Stroh. Das Stroh hatte so-

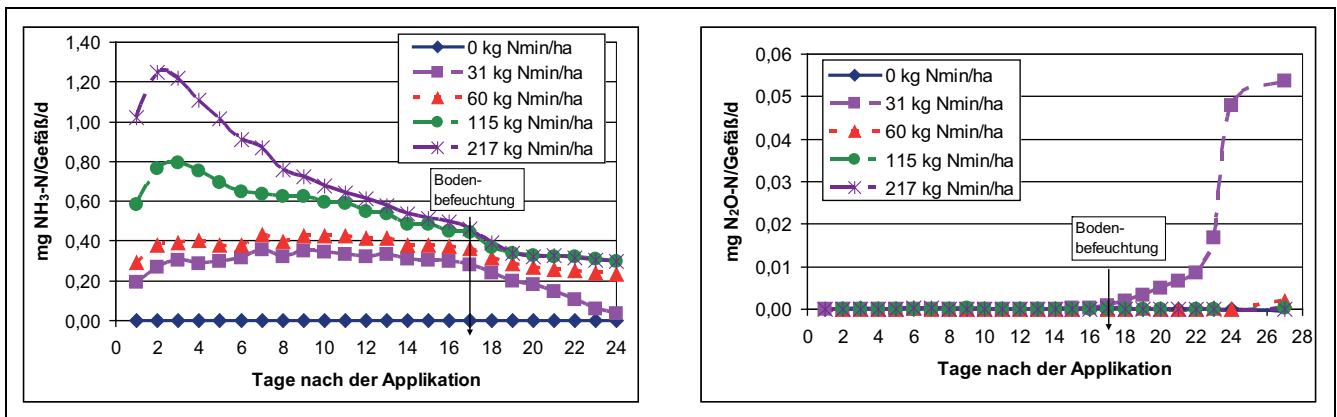


Abb. 6. Einfluss der mineralischen Gärrest-N-Menge auf die Freisetzung von Ammoniak (links) und Lachgas (rechts) in einem lehmigen Sandboden (L25).
Effect of fermentation residuemineral N rate on the release of ammonia (left) and nitrous oxide (right) in a loamy sand soil (L25).

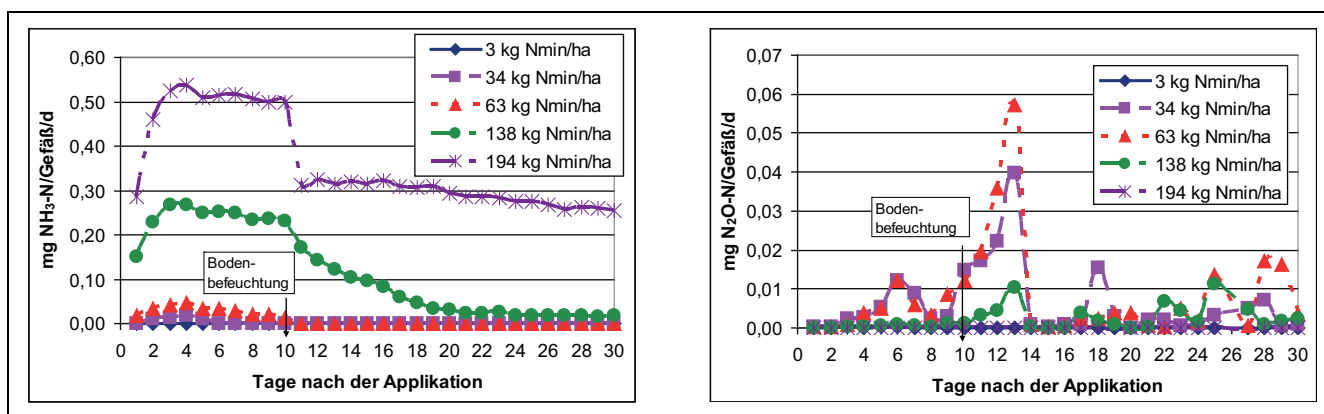


Abb. 7. Einfluss der mineralischen Gärrest-N-Menge auf die Freisetzung von Ammoniak (links) und Lachgas (rechts) in einem Lehmboden (L26).
Effect of fermentation residuemineral N rate on the release of ammonia (left) and nitrous oxide (right) in a loamy soil (L26).

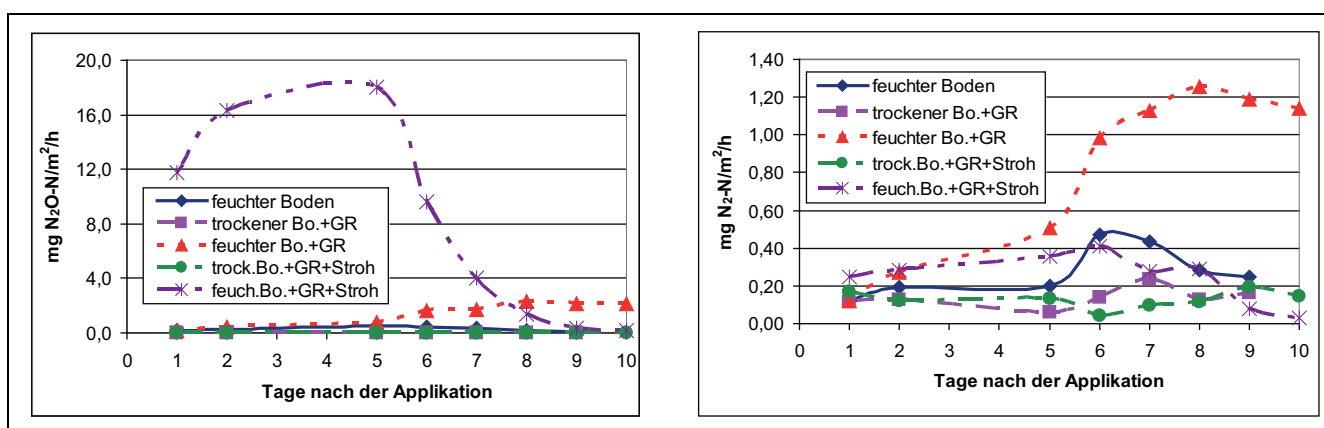


Abb. 8. Einfluss der Bodenfeuchte und des Zusatzes von Gärrest und Stroh auf die Freisetzung von Lachgas (links) und elementarem Stickstoff (rechts).
Effect of soil moisture and the addition of fermentation residue and straw on the release of nitrous oxide (left) and elemental nitrogen (right).

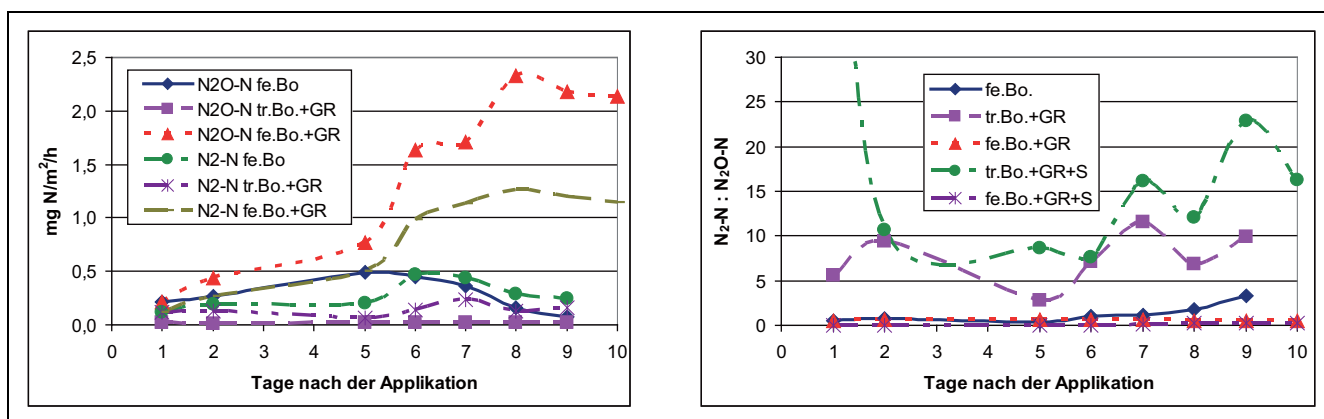


Abb. 9. Vergleich der N_2O -N- und N_2 -N-Freisetzungen (links) und des N_2 -N: N_2O -N-Verhältnisses (rechts) in Abhängigkeit von Bodenfeuchte sowie Zusatz von Gärrest und Stroh.
Comparison of N_2O -N and N_2 -N-releases (left) and the N_2 -N: N_2O -N ratio (right) as affected by soil moisture and the addition of fermentation residue and straw.

mit eine stimulierende Wirkung auf die N_2O -Freisetzung. Dagegen wurde mit Stroh weniger N_2 freigesetzt. Hierbei lag nur bei feuchtem Boden mit alleinigem Zusatz von Gärrest eine erhöhte N_2 -Freisetzung vor. In ausgangs trockenem Boden hatte der Gärresteinsatz mit und ohne

Strohzusatz keine Erhöhung sowohl der N_2O - als auch der N_2 -Freisetzung zur Folge. Bei den feuchten Bodenvarianten verschob sich das N_2 : N_2O -Verhältnis in Richtung N_2O -Freisetzung und lag die N_2O -Freisetzung fast doppelt so hoch wie die N_2 -Freisetzung (Abb. 9).

Diskussion

Eine NH_3 -Freisetzung aus dem Boden ergibt sich insbesondere nach der Zufuhr von NH_4^+ -haltigen Düngemitteln aus einer chemischen Gleichgewichtsreaktion zwischen NH_4^+ und NH_3 , welche vor allem vom pH-Wert des Milieus abhängig ist (PAUL und BEAUCHAMP, 1989). Lachgas wird im Wesentlichen auf mikrobiellem Wege aus NH_4^+ im Zuge der Nitrifikation und/oder aus NO_3^- im Zuge der Denitrifikation gebildet (RUSSOW und KÖRSCHENS, 1996). Elementarer Stickstoff entsteht aus der weiterlaufenden mikrobiologischen oder chemischen Reduktion von N_2O .

Aufgrund der genannten Reaktionen haben sich in den durchgeführten Untersuchungen grundsätzliche Unterschiede im Verlauf des Auftretens der drei genannten Gase ergeben. Die NH_3 -Freisetzung wies nach einer Gärrestapplikation in fast allen Versuchen unmittelbar nach der Applikation die höchste Emissionsrate auf. Sie fiel danach relativ kontinuierlich ab und erreichte nach mehreren Tagen oder Wochen ihr Ende. Dieser Verlauf steht in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von VANDRE et al. (1997) sowie DÖHLER und HORLACHER (2010). Der Verlauf und das Ausmaß hingen von mehreren aufgezeigten Faktoren sowie weiteren Einflussgrößen ab. Dazu zählt u.a. die Konsumption des zugeführten Ammoniums durch die Nitrifikation, was in zusätzlichen, hier nicht dargestellten Versuchen festgestellt wurde. Wesentlich für die NH_3 -Freisetzung ist darüber hinaus, dass ein vollständiges Einbringen des Gärrestes in den Boden dessen Freisetzung ganz verhindern kann, was beim Lachgas nicht möglich erscheint.

Die N_2O -Freisetzung zeigte ein grundsätzlich anderes Bild als die NH_3 -Freisetzung. In der Regel setzte in den Laboruntersuchungen bei Raumtemperatur die N_2O -Frei-

setzung erst einige Tage nach der Applikation ein, erreichte nach mehreren Tagen ein Maximum und fiel dann wieder bis auf nahe Null ab. Ähnlich war der Verlauf, aber etwas verzögert, in eigenen Feldmessungen (HERBST et al., 2010; EISSNER et al., 2013) sowie in den Untersuchungen von SENBAYRAM et al. (2009). Dieser Verlauf weist darauf hin, dass bereits bei der Nitrifikation des zugeführten Ammoniums N_2O freigesetzt wird. Die N_2 -Freisetzung zeigte, ähnlich wie die N_2O -Freisetzung, einen verzögerten Emissionsbeginn von einigen Tagen, wobei die N_2 -Freisetzung offensichtlich erst nach dem Einsetzen der N_2O -Freisetzung auftrat.

In der Tab. 2 sind die Wirkungen der untersuchten Einflussfaktoren auf die NH_3 - und N_2O -Freisetzung zusammengefasst aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Anzahl der Unterschiede in der Wirkung deutlich über der Anzahl der Übereinstimmungen liegt. Bei den Unterschieden wirkten einige Faktoren sogar gegensätzlich auf die Freisetzung der beiden Gase (N-Menge, Bodenfeuchte, Stroh). Dies hat zur Konsequenz, dass sich die Summe der N-Freisetzung beider Gase nur schwer reduzieren lässt, wenn keine vollständige Einbringung des Gärrestes in den Boden erfolgt. Beim Einfluss der Temperatur geht die Wirkung bei beiden Gasen in die gleiche Richtung. Steigende Temperaturen erhöhten sowohl die NH_3 - als auch die N_2O -Freisetzung und wahrscheinlich auch die N_2 -Freisetzung. Bei einem Einsatz der Gärreste nahe dem Gefrierpunkt treten deshalb die geringsten gasförmigen N-Verluste auf, was von DORLAND und BEAUCHAMP (1991) auch experimentell nachgewiesen wurde. In Untersuchungen von SANGER (2012) stieg die N_2O -Emission bei einer Erhöhung der Temperatur von $13,5^\circ\text{C}$ auf $23,5^\circ\text{C}$ um den Faktor 3,7 an, die CO_2 -Emission dagegen nur um den Faktor 1,7.

Tab. 2. Vergleich von NH_3 - und N_2O -Freisetzungen in den dargestellten Versuchen

Comparison of NH_3 and N_2O releases to the selected trials

Unterschiede	Übereinstimmungen
Zeitlichen Verlauf: sofortiger Beginn der NH_3 - und verzögerter Beginn der N_2O -Freisetzung	Wirkung der Temperatur: Anstieg von NH_3 - und N_2O -Freisetzung mit steigender Temperatur
Wirkung der Applikationsmethode: eine vollständig Einbringung kann NH_3 -Freisetzung vollständig ausschließen, beim N_2O kann eine Einarbeitung die Freisetzung nur reduzieren	Wirkung der Düngerart: NH_3 - und N_2O -Freisetzung nur bei Gärrest, nicht bei Ammoniumsulfat
Wirkung der Bodenfeuchte: steigende Bodenfeuchte senkte NH_3 - und erhöhte N_2O -Freisetzung	
Wirkung der N-Menge: steigende N-Menge erhöhte NH_3 - und senkte N_2O -Freisetzung	
Wirkung von Strohzusatz: Stroh senkte die NH_3 - und N_2 -Freisetzung, erhöhte die N_2O -Freisetzung bei feuchtem Boden und senkte sie bei trockenem Boden	
Wirkung eines Nitrifikationsinhibitors: senkte N_2O -, aber nicht NH_3 -Freisetzung	

Von den im Projekt geprüften Zusatzstoffen hat sich nur ein Nitrifikationsinhibitor als ein geeignetes Mittel erwiesen, die N-Verluste in Form von N_2O wirksam zu senken. Dies wurde sowohl in mehreren Laborversuchen als auch in Felduntersuchungen (KRAFT et al., 2011) nachgewiesen und ist ebenfalls von anderen Autoren (DE KLEIN et al., 1996; BENCKISER et al., 2013; SEIZ et al., 2013) festgestellt worden. In unseren Laboruntersuchungen war jedoch bei Einsatz des Nitrifikationsinhibitors in hier nicht dargestellten Versuchen teilweise ein geringfügiger Anstieg der NH_3 -Freisetzung aufgetreten, der sich aus der verzögerten Nitrifikation ergeben kann.

Die Ursache für die festgestellte hemmende Wirkung hoher N-Mengen auf die N_2O -Freisetzung liegt offensichtlich in einer Nitrifikationshemmung, was aus dem gleichzeitig untersuchten Verlauf der Nitrifikation im Boden entnommen werden kann (nicht dargestellt). Inwieweit es unter diesen Bedingungen zu einem späteren Zeitpunkt zu einer erhöhten N_2O -Freisetzung kommen kann, lässt sich aus den durchgeführten Versuchen nicht abschätzen. In den Untersuchungen von SENBAYRAM et al. (2009) verzögerte eine erhöhte Gärrestmenge ebenfalls die Lachgasfreisetzung, führte aber bei einem längeren Untersuchungszeitraum letztlich zu einer insgesamt höheren Emission. Die Wirkung hoher Gärrestmengen auf die N_2O -Freisetzung ist beim Vergleich einer Injektion des Gärrestes in den Boden (hohe Konzentration) mit einer Einarbeitung in den Boden (geringere Konzentration) von Bedeutung.

Zum Vergleich der N_2O - und N_2 -Freisetzung zeigten die Versuche, dass in dem feuchteren Boden die Gärrestapplikation bei beiden N-Formen zu einer höheren Freisetzung führte als in dem trockeneren Boden. Im feuchten Boden lag dabei die N_2O -Freisetzung höher als die N_2 -Freisetzung und im trockenen Boden war es umgekehrt. Das N_2 -N/ N_2O -N-Verhältnis von ca. 5–20/1 bei einem trockeneren Boden fiel bei einem feuchteren Boden auf ca. 1/1 ab. Bei dem feuchteren Boden wurde damit nicht nur mehr Stickstoff freigesetzt, sondern darüber hinaus in der für die Umwelt ungünstigeren Form N_2O . Die gleiche Wirkung einer steigenden Bodenfeuchte auf die Lachgasfreisetzung stellten auch RUSER et al. (2006) und SENBAYRAM et al. (2009) fest. Deren Untersuchungen ergaben ebenfalls, dass es im hohen Bodenfeuchtebereich besonders zu einem Anstieg der N_2O -Freisetzung kam und diese über der N_2 -Freisetzung lag.

Alle durchgeführten Versuche und insbesondere der Versuch „L9“ weisen auf die besondere Bedeutung von verfügbarem Kohlenstoff für die N_2O -Freisetzung hin. Bereits PFEIFFER und LEMMERMANN (1900) hatten auf eine denitrifikationssteigernde Wirkung von leicht löslichen organischen Substanzen aufmerksam gemacht, was auch aus den Untersuchungen von SENBAYRAM et al. (2009) hervorgeht. Die Erhöhung der N_2O -Freisetzung nach Zugabe von Stroh bei gleichzeitiger Senkung der N_2 -Freisetzung im Versuch „N4“ könnte so gedeutet werden, dass durch die erhöhte N_2O -Freisetzung weniger Stickstoff für die weitere Reduktion zur Verfügung stand.

Die unterschiedliche Wirkung des Strohzusatzes auf die N_2O -Freisetzung, wie sie bereits in einer vorangegangenen Auswertung mit weiteren Versuchen aufgezeigt wurde (HERBST et al., 2012), könnte mit unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten erklärt werden. Im trockenen Boden des Versuches „L9“ trat durch den Strohzusatz eine verringerte N_2O -Freisetzung auf; gegebenenfalls aufgrund einer gehemmten Strohzersetzung und einer verbesserten Durchlüftung des Bodens. Im feuchten Boden des Versuches „N4“ nahm dagegen die N_2O -Freisetzung zu, was mit dem höheren Strohumsatz infolge des höheren Bodenfeuchtegehaltes im Zusammenhang stehen kann. Wie ein nicht dargestellter Versuch („L24“) zeigte, korrespondierte das Maximum der CO_2 -Freisetzung mit dem Maximum der N_2O -Freisetzung. Möglicherweise führte in jenem Versuch und auch im Versuch „N4“ der O_2 -Verbrauch beim Strohumsatz zu anaeroben Bedingungen, in dessen Folge es zu einer Nitratreduktion und N_2O -Bildung gekommen war. In den Untersuchungen von SÄNGER (2012) hatte die mit steigender Temperatur verbundene erhöhte mikrobielle Aktivität einen abnehmenden O_2 -Gehalt im Boden zur Folge, welcher die Denitrifikationsrate zusätzlich begünstigte.

Danksagung

Die Arbeiten wurden mit Mitteln der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert (FKZ 22025207).

Literatur

- 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.
- BUTTERBACH-BAHL, K., G. WILLIBALD, H. PAPAN, 2002: Soil core method for direct simultaneous determination of N_2 and N_2O emissions from forest soils. *Plant and Soil* **240**, 105–116.
- 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.
- DÖHLER, H., H. MENZI, M. SCHWAB, 2002: Emissionen bei der Ausbringung von Fest- und Flüssigmist und Minderungsmaßnahmen. *KTBL-Schrift* **406**, 163–178.
- DÖHLER, H., D. HORLACHER, 2010: Ammoniakemissionen organischer Düngemittel. *KTBL-Schrift* **483**, 51–71.
- DORLAND, S., E.G. BEAUCHAMP, 1991: Denitrification and ammonification at low soil temperatures. *Can. J. Soil Sci.* **71**, 293–303.
- 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. Agrarwiss.* **24**, 60–68.
- FOWLER, D., M. COYLE, U. SKIBA, M.A. SUTTON, J.N. CAPE, S. REIS, L.J. SHEPPARD, A. JENKINS, B. GRIZZETTI, J.N. GALLOWAY, P. VITOUSEK, A. LEACH, A.F. BOUWMAN, K. BUTTERBACH-BAHL, F. DENTENER, D. STEVENSON, M. AMANN, M. VOSS, 2013: The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Phil. Trans. R. Soc. B* **368**, 20130164, <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>.
- HERBST, F., J. AUGUSTIN, W. GANS, 2010: Wirkung eines Nitrifikationsinhibitors und einer Strohdüngung auf die Freisetzung klimarelevanter Gase nach Gärrestapplikation. *KTBL-Schrift* **483**, 359–363.
- HERBST, F., O. SPOTT, W. GANS, 2012: Auswirkungen eines Strohzusatzes zur Gärrestdüngung auf Emissionen klimarelevanter Gase aus dem Boden. *Journal für Kulturpflanzen* **64**, 384–391.

- KRAFT, J.-U., F. HERBST, W. GANS, 2011: Zur Wirkung des Nitrifikationshemmers PIADIN bei Gülle- und Gärrest-Düngung. *Mitt. Agrarwiss.* **18**, 95-104.
- PAUL, J.W., E.G. BEAUCHAMP, 1989: Relationship between Volatile Fatty Acids, Total Ammonia and pH in Manure Slurries. *Biol. Wastes* **29**, 313-318.
- PFEIFFER, T., O. LEMMERMANN, 1900: Denitrifikation und Stallmistwirkung. *Landw. Versuchsstationen* **54**, 386-462.
- RUSER, R., H. FLESSA, R. RUSSOW, G. SCHMIDT, F. BUEGGER, J.C. MUNCH, 2006: Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biol. Biochem.* **38**, 263-274.
- RUSSOW, R., M. KÖRSCHENS, 1996: Nitrous oxide formation in black earth soil depending on the soil water content. In: VAN CLEEMPUT et al. (Eds.), *Progress in Nitrogen Cycling Studies*, Verl. Kluwer Akad. Publ., 607-611.
- SÄNGER, A., 2012: Application of biogas slurries from energy crops to arable soils and their impact on carbon and nitrogen dynamics. *Diss. Univ. Kassel*.
- SEIZ, P., A. HEGER, M. ARMBRUSTER, T. MÜLLER, F. WIESLER, R. RUSER, 2013: Einfluss von N-Düngung, Nitrifikationshemmstoff und Abfuhr von Ernterückständen auf die N₂O-Freisetzung von zwei gemüsebaulich genutzten Standorten. *VDLUFA-Schriftenreihe* **69**, 164-171.
- SENBAYRAM, M., R. CHEN, K.H. MÜHLING, K. DITTERT, 2009: Contribution of nitrification and denitrification to nitrous oxide emissions from soil after application of biogas waste and other fertilizers. *Rapid Commun. Mass Spectrum* **23**, 2489-2498.
- SUTTON, M., 2011: Too much of a good thing. *Nature* **472**, 159-191.
- VANDRE, R., J. CLEMENS, H. GOLDBACH, M. KAUPENJOHANN, 1997: NH₃ and N₂O Emissions after Landspreading of Slurry as Influenced by Application Technique and Dry Matter-Reduction. I. NH₃ Emissions. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* **160**, 303-307.