

Szenarien der Emissionsminderung in der thüringischen Mast- schweineproduktion

Impressum

Herausgeber: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Naumburger Str. 98, 07743 Jena
Tel.: 03641 683-0, Fax: 03641 683-390
Mail: pressestelle@tll.thueringen.de

Autoren: **Ulrich Dämmgen** (Johann Heinrich von Thünen-Institut)
Dr. Simone Müller
Jürgen Müller

Juli 2014

Copyright:

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen und der foto-mechanischen Wiedergabe sind dem Herausgeber vorbehalten.

1 Einleitung

Die Schweinehaltung befindet sich in einem wachsendem Spannungsfeld zwischen ökonomischen Rahmenbedingungen sowie rechtlichen Anforderungen einerseits und gleichzeitig wachsender Kritik zunehmender Verbraucherkreise gegenüber den bestehenden Haltungsbedingungen andererseits. Diskussionspunkt sind u.a. die einstreulosen Stallhaltungssysteme, die sich in der Schweinehaltung weltweit durchgesetzt haben. In Deutschland werden 86 % aller Sauen und 94 % alle Mastschweine heute einstreulos gehalten, in Thüringen beträgt dieser Anteil 95 % resp. 93 %. Für die starke Verbreitung dieser Aufstallungsform sprechen sozio-ökonomische, gesundheitliche und produktqualitative Aspekte.

Dennoch bestehen zunehmende Forderungen, auch in der Schweinehaltung strohbasierte Haltungssysteme einzurichten, weil damit u.a. durch die bessere Möglichkeit des Auslebens natürlicher Verhaltensweisen auch ein höheres Tierwohl verbunden wird. Dennoch sind neben der Ausrichtung auf das Tierwohl u.a. der Emissions- und Arbeitsschutz mit einzubeziehen.

Internationale Bemühungen zur Emissionsminderung werden auch die Schweineproduktion betreffen. Während der Anteil der Landwirtschaft an den nationalen Treibhausgasemissionen recht gering ist und hier zunächst die Rinderhaltung betroffen sein wird, ist abzusehen, dass die Minderung der Ammoniakemissionen die Schweineproduktion betreffen werden: Die Vorschläge der Europäischen Union zur Minderung der Emissionen sehen Emissionsminderungen für Ammoniak (NH_3) von 5 % bis zum Jahre 2030, danach von 39 % vor (EU, 2013). Etwa ein Viertel der NH_3 -Emissionen aus der Tierhaltung entfällt auf Schweine ($2,8 \text{ Gg a}^{-1}$), die Hälfte davon auf Mastschweine ($1,4 \text{ Gg a}^{-1}$; Rösemann et al., 2013).

Erst ein ganzheitlicher Ansatz unter Einbeziehung von Risiken wie u.a. der Staub- und Klimabelastung, der Ammoniakemission und des Seuchenschutzes ermöglicht eine optimierte Ausrichtung der Produktionssysteme.

Das Anliegen der nachfolgenden Simulationsrechnungen bestand deshalb darin, die Emissionen von Treibhausgasen, Ammoniak und Stäuben für unterschiedliche Haltungs- und Produktionsverfahren vergleichend zu betrachten. Berücksichtigt werden:

1. Fest- und Flüssigmistverfahren,
2. die Abproduktlagerungsverfahren,
3. das Wachstumspotential von Herkünften
4. die Biogasnutzung von Schweinegülle und -mist sowie
5. die Nutzung von Abluftreinigungsanlagen,
6. alternative Fütterungskonzepte,

bei gleichem Flächenbesatz ($0,75 \text{ m}^2 \text{ Tier}^{-1}$) pro Tierplatz, um die je Kilogramm erzeugtes Schweinefleisch zu erwartenden Emissionen abschätzen zu können .

2 Material und Methoden

Die Simulationsrechnungen sollen verschiedene Formen eines Mastbetriebes mit Flächenbindung und eigener Abproduktlagerung und -ausbringung verkörpern, sowie die in ihnen anzutreffenden Haltungsbedingungen für Mastschweine berücksichtigen.

In Thüringen werden 93% alle Mastschweine heute einstreulos gehalten. 20,5 % der Mastschweine stehen in Ställen mit weniger als 1000 Mastplätzen, während 53,5% der Tiere in Anlagen mit bis zu 10.000 Mastplätzen stehen.

Die Gülleausbringung erfolgt in Thüringen mit folgenden Verfahren (Zorn et al., 2013)

- 8 % breitflächig (Prallteller, Prallkopf, Schwenkdüse),
- 48 % bodennah (Schleppschlauch, Schleppschuh) und
- 44 % Injektion (Grubber, Schlitzgerät für Grünland).

49 % der angegebenen Gülle- und Jauchemenge bringen Thüringer Landwirtschaftsbetriebe mit eigener Technik aus, Dienstleistungsunternehmen bzw. Kooperationspartner bringen die Gülle (> 50 %) fast ausschließlich bodennah bzw. mittels Injektionstechnik aus.

2.1 Die Szenarien

Die Emissionen aus gegenwärtigen und möglichen zukünftigen Verfahren der Schweinemast in Thüringen sollen anhand von Szenarien berechnet werden, die unterschiedliche Haltungsverfahren, Leistungsstufen bzw. Verfahren zur Abproduktlagerung und –ausbringung berücksichtigen. Dabei wird zwischen Fest- und Flüssigmistverfahren unterschieden. Die vorgenommenen schrittweisen Änderungen zwischen den einzelnen Szenarien sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt, der jeweils geänderte Faktor ist rot hervorgehoben.

In **allen Szenarien** werden die Lebendmassen (LM) zu Mastbeginn und Mastende und damit der Zuwachs je Tier gleichgehalten. Sie entsprechen der derzeit üblichen Praxis in Thüringen, ebenso die tägliche Zunahme und damit die Zahl der Umtriebe sowie die dreiphasige Fütterung (Beginn bis 50 kg Tier⁻¹, 50 bis 90 kg Tier⁻¹, 90 kg Tier⁻¹ bis Mastende). Gleich bleibend ist auch die Stallfläche je Tier.

Tabelle 1: Übersicht über die behandelten Flüssigmist-Szenarien (zu den Abkürzungen siehe Text). Die Änderungen sind jeweils rot hervorgehoben.

		Szenario					
		S_11	S_12	S_13	S_14	S_15	S_12R
LM Mastbeginn	Einheit kg Tier ⁻¹	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
LM Mastende	kg Tier ⁻¹	117,5	117,5	117,5	117,5	117,5	117,5
Zunahme	g Tier ⁻¹ d ⁻¹	850	950	950	950	950	950
MFA	%	59	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5
tgl. N-Ansatz	g/d	22,6	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
Stall		Flüssig- mist	Flüssig- mist	Flüssig- mist	Flüssig- mist	Flüssig- mist	Flüssig- mist
Umtriebe	Tier Platz ⁻¹ a ⁻¹	3,10	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42
Lager		O	O	RF	T	T	O
Futter		Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	R
Ausbringung		SsE	SsE	SsE	SsE	SsE	SsE
Biogasanlage		-	-	-	B	B	-
Abluftreinigung		-	-	-	-	A	-

Tabelle 2: Übersicht über die behandelten Festmist-Szenarien (Erläuterungen wie Tabelle 1)

		Szenario					
		S_21	S_22	S_23	S_24	S_25	S_12R
LM Mastbeginn	Einheit kg Tier ⁻¹	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
LM Mastende	kg Tier ⁻¹	117,5	117,5	117,5	117,5	117,5	117,5
Zunahme	g Tier ⁻¹ d ⁻¹	850	950	950	950	950	950
MFA	%	59	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5
tgl. N-Ansatz	g/d	22,6	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
Stall		Festmist	Festmist	Festmist	Festmist	Festmist	Festmist
Umtriebe	Tier Platz ⁻¹ a ⁻¹	3,10	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42
Lager		MH	MH	MF	T	T	MH
Futter		Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	R
Ausbringung		breit	breit	breit	SsE	SsE	SsE
Biogasanlage		-	-	-	B	B	-
Abluftreinigung		-	-	-	-	A	-

Die Mast in Flüssigmistsystemen und in Festmistsystemen wird so beschrieben, dass möglichst viele Parallelen erkennbar sind: Emissionsmindernde Maßnahmen werden in beiden Systemgruppen in vergleichbarer Weise eingesetzt.

Szenarien S_11 und S_21: Bäuerlicher Familienbetrieb, spezialisiert auf Schweinemast

Die Tiere werden dreiphasig mit Standardfuttermischungen (Sf) gefüttert.

S_11 beschreibt die Emissionen bei Aufstallung im Flüssigmiststall mit Teilspaltenboden. Als Lager dient ein konventioneller oben offener Rundtank (O). Die Bildung einer Schwimmdecke wird nicht angenommen. Die Ausbringung erfolgt mit Schleppschläuchen und sofortiger Einarbeitung durch Grubbern (SsE).

In **S_21** werden die Emissionen der Produktion bei Einsatz von Festmist berechnet. Die Tiere stehen im planbefestigten Festmiststall. Rund 600 g Tier⁻¹ d⁻¹ Stroh werden eingesetzt. Der Mist wird im Misthaufen (MH) ohne Abdeckung gelagert, breit verstreut ausgebracht und innerhalb einer Stunde eingearbeitet. Bei diesem Verfahren fällt keine Jauche an.

Die **Szenarien S_12 und S_22** berücksichtigen Fortschritte durch Genetik mit höherer Wachstumsintensität. Bei sonst gleichen Bedingungen wie in den Szenarien S_12 und S_22 wird mit einer höheren täglichen Zunahme der Tiere gerechnet. Dadurch erhöht sich gleichzeitig die Zahl der Umtriebe.

Szenarien S_13 und S_23: Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Bedingungen wird nun im das Lager abgedeckt. Das Futter bleibt das gleiche wie in S_11 und S_21.

In **S_13** wird der Gülle-Rundbehälter mit einer Folie (RF) abgedeckt. In **S_23** wird das Mistlager mit einer Folie (MF) versehen. Das deutsche Emissionsinventar sieht eine solche Abdeckung nicht vor. (Zur Ableitung eines Emissionsfaktors siehe Anhang B)

Szenarien S_14 und S_24 berücksichtigen die Nutzung von Gülle und Mist zur Energieproduktion über eine Biogasanlage (B). Den hohen CH₄-Ausbeuten stehen CH₄-Verluste (Leckagen) von wenigen Prozenten gegenüber. Konventionsgemäß wird hier mit KTBL (2012) eine Leckagerate von 1 % verwendet.

In **S_14** wird die gleichzeitig die Abdeckung geändert: Statt der Folie wird ein dichtes Tragluftdach (T) verwendet. Die Gärreste werden unter den gleichen Bedingungen wie zuvor ausgebracht (SsE).

S_24 vergärt Festmist unter geeigneten Bedingungen unter einem dichten Tragluftdach (T). Die flüssigen Gärreste werden wie die Gärreste aus Güllevergärung ausgebracht und eingearbeitet (SsE).

In den **Szenarien S_15 und S_25** wird die Stallanlage jeweils mit einer hochwirksamen Abluftreinigung (A) (3-stufig) mit hohem Wirkungsgrad für NH₃ (90 %) und Stäube (100 %) betrieben. Die Ausbringung erfolgt wie in den zuvor beschriebenen Szenarien (SsE). Die beim Auswaschprozess anfallende Ammoniumsulfat-Lösung ((NH₄)₂SO₄) wird als Mineraldünger in der Pflanzenproduktion eingesetzt.

In den **Szenarien S_12R und S_22R** wird zusätzlich der Einfluss von N-reduziertem Futter untersucht. Dazu wird unter den in den S_11 und S_21 beschriebenen Bedingungen statt des Standardfutters wird nun ein N-P-reduziertes Futter (R) eingesetzt.

2.2 Rechenverfahren

Als Rechenverfahren wurden das für die Emissionsberichterstattung genutzten Modul PFP_V10 der Modellfamilie GAS-EM genutzt. Die aktuelle Zusammenfassung findet sich in Rösemann et al. (2013). Das Modell berechnet aus Lebendmassen und täglichen Zunahmen den Bedarf an umsetzbarer Energie (ME) für eine Schweinepopulation aus Börgen und Sauen (Haenel et al., 2011a). Aus der Futterzusammensetzung werden dann die CH₄-Emissionen aus der Verdauung wie in Dämmgen et al. (2012a) berechnet, ebenso die Ausscheidungen von organischer Masse (volatile solids, VS) (Dämmgen et al., 2011a).

Die Berechnung der fäkalen und renalen N-Ausscheidungen setzt die Kenntnis des retinierten N voraus. Zu Einzelheiten siehe Dämmgen et al. (2010a). Mit Hilfe eines Massenflussverfahrens werden organisches N und ammoniakalisches N (TAN) auf dem Weg durch Stall, Lager und Ausbringung bis zum Eintrag in den Boden verfolgt (Dämmgen und Hutchings, 2008) und die Emissionen von NH₃, NO, N₂O und N₂ berechnet (siehe Abbildung 1).

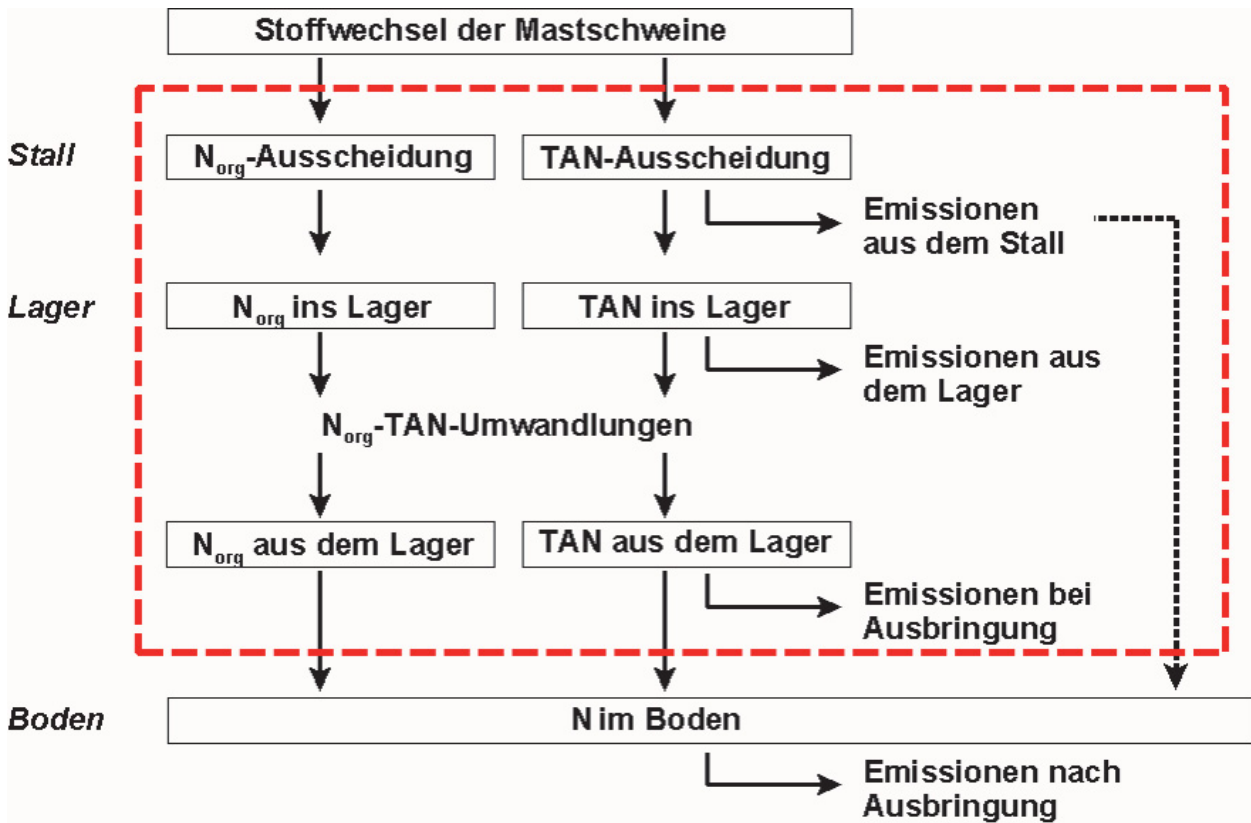


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der betrachteten N-Flüsse. N-Vorräte sind durch Rahmung gekennzeichnet. Der rot umrandete Bereich ist Gegenstand der Arbeit. Die gestrichelte Linie zeigt den N-Fluss aus dem Lager mit Waschlagen bei Betrieb einer Abluftreinigungsanlage. Weitere Erläuterungen zu diesem Schema finden sich im Text. Eine detaillierte Übersicht findet sich in Rösemann et al. (2013), Kap. 3.3.4.3.

Die Emissionen werden dabei aus den jeweils vorhandenen N-Vorräten mit Hilfe von Emissionsfaktoren berechnet:

$$E_{A,O} = M_{N,O} \cdot EF_{A,O}$$

mit

$E_{A,O}$ Emission einer Spezies A an einem Ort O

$M_{N,O}$ Masse des am Ort O jeweils vorhandenen wirksamen N (meist TAN)

$EF_{A,O}$ Emissionsfaktor für eine Spezies A an einem Ort O

Die hier verwendeten Emissionsfaktoren sind im Anhang zusammen gestellt.

Folgende Einzelheiten erscheinen wichtig:

Im **Stall** wird aus dem mit dem Harn ausgeschiedenen ammoniakalischen Stickstoff (TAN) Ammoniak (NH₃) freigesetzt. Der um diese N-Menge verringerte TAN und das gesamte organische N gelangen ins Lager. Das NH₃ gelangt über die Lüftung in die Außenluft, sofern keine Abluftreinigungsanlage vorhanden ist. Für unsere Betrachtungen wird in den Szenarien 15 und 25 eine mehrstufige Abluftreinigungsanlage nach dem Stand der Technik mit hohem Abscheidungsgrad

angenommen. Die Emissionsminderungen durch Einsatz einer Abluftreinigungsanlage für Stallluft werden nach Dämmgen et al. (2010b) ermittelt.

Die teilweise Umwandlung von organischer Masse (VS) in **Stall und Lager** führt zu Methan (CH_4)-Emissionen.¹ Zu deren Berechnung wurden deutsche und internationale experimentelle Datensätze in Dämmgen et al. (2012b) für Flüssigmistsysteme zusammengestellt und bewertet. Das Verfahren berücksichtigt auch die Fermentation zum Zweck der Biogaserzeugung mit hohen Gasausbeuten.² Die Berechnung der CH_4 -Emissionen aus Festmistsystemen berücksichtigt auch die Emissionen, die aus dem Abbau von Stroh herrühren.

Die Berechnung der Emissionen **bei der Ausbringung** der Wirtschaftsdünger oder von Biogasgülle berücksichtigt ausschließlich NH_3 .

Berechnet werden die **Einträge in den Boden** mit den Wirtschaftsdüngern bzw. der $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ -Lösung aus der Abluftreinigung. Sie können dort zu direkten Lachgas (N_2O)- und NH_3 -Emissionen (nur $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) führen, aber auch die Ursache für indirekte N_2O -Emissionen aus Einträgen in Oberflächen und Grundwässer sein. Diese Emissionen sind aber nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. In einer ordnungsgemäßen Landwirtschaft werden die Wirtschaftsdünger im Pflanzenbau eingesetzt. Die hier mit der Düngergabe direkt oder über Oberflächenabfluss oder Austrag ins Grundwasser indirekt entstehenden Emissionen werden deshalb entsprechend der Konvention dem Pflanzenbau zugerechnet. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Minderung von NH_3 -Emissionen entscheidend ist für den Düngerwert der Wirtschaftsdünger. Je geringer die NH_3 -Verluste im Stall, bei der Lagerung und der Ausbringung sind, umso weniger Mineraldünger muss als Ergänzung der Wirtschaftsdünger eingesetzt werden. Im Kontext einer integrierenden Emissionsbewertung, die sowohl die Schweinehaltung als auch die Futtererzeugung einschließt, ist der Düngerersatzwert der Wirtschaftsdünger eine entscheidende Größe.

Die Emissionen von NH_3 und Stickstoffmonoxid (NO) aus Stall, Lager und Ausbringung führen zu Depositionen von gasförmigem NH_3 sowie von NH_4 und NO_3 mit Partikeln, die auf Grund ihrer Düngewirkung wiederum N_2O freisetzen. Diese sog. **indirekten N_2O -Emissionen** aus der Deposition solcher N-Verbindungen, die aus der Schweinemast emittiert werden, werden nach IPCC (1996) quantifiziert und den Quellen zugeordnet.

Für die Berechnung der CH_4 -Emissionen aus dem Lager wird angenommen, dass sie den VS-Einträgen ins Lager proportional sind. Sie werden mit einem (konstanten) maximalen CH_4 -Freisetzungsanteil ($0,45 \text{ m}^3$ je kg VS), der Dichte von CH_4 bei Normalbedingungen ($0,67 \text{ kg m}^{-3}$) und einem temperatur- und lagertypabhängigen Methan-Umwandlungsfaktor multipliziert.

Das in der Emissionsberichterstattung zur Berechnung der Staubemissionen eingesetzte Verfahren nach EMEP (2009) ist ein einfaches Verfahren, das eine Schätzung von Emissionen PM 2.5 und PM 10 ermöglicht.

Alle relevanten Emissionsfaktoren finden sich im Anhang.

CH_4 und N_2O sind Treibhausgase mit unterschiedlicher Klimawirksamkeit. Ihre Emissionen werden zu Treibhausgas- (THG-) Emissionen zusammengefasst und als CO_2 -Äquivalente angegeben, indem man sie mit Global Warming Potentials (GWP) multipliziert. Nach IPCC (2006) beträgt das GWP_{CH_4} $25 \text{ kg kg}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq}$, das $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ $298 \text{ kg kg}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq}$.

2.3 Futtereigenschaften

Die Berechnung der Ausscheidungen setzt die Kenntnis wichtiger Kenngrößen für die eingesetzten Futtermischungen voraus (ME-Gehalt für die Futtermenge; Gehalte von BFS für die CH_4 -Emissionen aus der Verdauung, Rohasche-Gehalt und die Verdaulichkeit von OM für VS; N-Gehalt und -Verdaulichkeit für die Berechnung der N-Ausscheidungen).

¹ Im Kohlenstofffluss durch das System werden nur die CH_4 -Emissionen - zusammengefasst aus Stall und Lager - betrachtet. Eine Quantifizierung der CO_2 -Emissionen entfällt, da die Mengen an CO_2 zuvor durch Photosynthese gebunden wurden. Insgesamt werden die Produktionsprozesse in der Landwirtschaft (vereinfacht) als CO_2 -neutral angesehen.

² Im Emissionsinventar werden bei der Berechnung der Emissionen mittlere Temperaturen, mittlere Lagerungsdauern, mittlere Zusammensetzungen etc. angenommen, da exakte Werte praktisch nicht erfassbar sind.

Die Zusammensetzung der hier verwendeten Futtermischungen orientiert sich an in Thüringen üblichen Industriefuttern. Die für die Berechnungen wichtigen Parameter wurden aus Daten in Beyer et al. (2004) abgeleitet. Sie sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Futtereigenschaften (bezogen auf Trockenmasse, zu weiteren Einzelheiten siehe Text)

Eigenschaft	Einheit	Futter *					
		3.1 S	3.2 S	3.3 S	3.1 R	3.2 R	3.3 R
ME-Gehalt	MJ kg ⁻¹	15,1	14,7	14,6	15,2	15,2	14,6
Verdaulichkeit von Energie	MJ MJ ⁻¹	0,842	0,841	0,837	0,857	0,842	0,818
Umsetzbarkeit	MJ MJ ⁻¹	0,804	0,802	0,801	0,819	0,811	0,786
N-Gehalt	kg kg ⁻¹	0,031	0,031	0,027	0,031	0,029	0,026
Verdaulichkeit von N	kg kg ⁻¹	0,772	0,804	0,794	0,830	0,795	0,787
Verdaulichkeit von OM	kg kg ⁻¹	0,850	0,852	0,858	0,883	0,867	0,844
Rohaschegehalt	kg kg ⁻¹	0,053	0,046	0,044	0,045	0,047	0,054
BFS-Gehalt **	kg kg ⁻¹	0,073	0,083	0,079	0,073	0,077	0,083

* 3.1 S: Standardfutter für 3-phasige Mast, 1. Abschnitt; 3.2 S: Standardfutter für 3-phasige Mast, 2. Abschnitt; usw.;
3.1. R: N-P-reduziertes Futter für 3-phasige Mast, 1. Abschnitt, usw.

** BFS: Biologisch fermentierbare Substanz

3 Ergebnisse

3.1 Ausscheidungen

Bei gleicher Leistung und gleichem Futter bleiben die CH₄-Emissionen aus der Verdauung, die Ausscheidungen an organischer Masse (VS) und die N-Ausscheidungen gleich. Die Leistungserhöhung (S_{1.2} → S_{1.3}; S_{2.2} → S_{2.3}) führt zu einem geringen Anstieg der Ausscheidungen: Verringerte Ausscheidungen je Tier werden durch die erhöhte Zahl der Durchgänge mehr als kompensiert. Emissionserhöhend wirkt auch die Abnahme des N-Gehalts im Zuwachs von 2,66 % auf 2,58 % mit der Folge geringfügig verringerter N-Retention.

Der Einsatz von N-P-reduziertem Futter (S_{1.2} → S_{1.2R}; S_{2.2} → S_{2.2R}) resultiert wieder in einer geringen Minderung. Ähnliches wurde auch in Dämmgen et al. (2011b) beobachtet. Dies deutet darauf hin, dass die Standardfutter gut an den Bedarf angepasst sind und bereits recht hohe Verdaulichkeiten für N aufweisen.

Biogasanlage und Abluftreinigungsanlage haben naturgemäß keinen Einfluss auf die Ausscheidungen.

3.2 Emissionen pro Tierplatz in Flüssigmistsystemen

Im ersten Schritt werden nach der oben skizzierten Vorgehensweise die relevanten Ausscheidungen und die daraus resultierenden Emissionen je Tierplatz (pl) berechnet (Tabelle 3).

Das Lagern unter der Folie (S_{1.2} → S_{1.3}) bewirkt lediglich eine Minderung der NH₃-Emissionen, da diese vom Transport an der Lageroberfläche abhängen. Als Folge sinken die auf die NH₃-Emissionen zurückzuführenden indirekten N₂O-Emissionen. Die CH₄-Bildung verläuft ungestört.

Die Vergärung im dicht geschlossenen Behälter (S_{1.3} → S_{1.4}) unterbindet alle Emissionen aus dem Lager mit Ausnahme der Leckage. Als nutzbare Emission tritt nun das CH₄ im Biogas hinzu, das VS aus den Ausscheidungen umwandelt.

Die Vergärung der Gülle im Reaktor (S_{1.4}, S_{2.4}) verändert die Zusammensetzung des Substrats. Während der Fermentation wird 50 % des organisch gebundenen N zu TAN umgewandelt (Reinhold et al., 2012). Das hieraus freigesetzte NH₃ wird teilweise mit dem Gasstrom abgeführt, löst sich aber gut im Kondensat des Biogases. Bei ordnungsgemäßigem Betrieb gelangt deshalb meist kein NH₃ in die Verbrennungsmaschine. (LFU, 2012) Während der Umsetzungen im Reaktor steigt der pH-Wert der Gülle (vgl. Reinhold et al., 2012). Trotzdem steigen die zu

Emissionen führenden TAN-Mengen im Lager im Vergleich zur Nichtvergärung. Der Emissionsfaktor ist wegen des erhöhten pH-Wertes auch im Lager gegenüber dem von unbehandelter Gülle mehr als verdoppelt. Wegen der Art der Abdeckung wird allerdings kaum NH₃-N aus dem Lager emittiert. Angenommen werden wie bei CH₄ 2 % der gebildeten Menge.

Für das Ausbringen von Biogas-Gülle werden höhere Emissionsfaktoren angesetzt als für nicht behandelte Gülle. Bei Temperaturen um 10 °C wird angenommen, dass Schweinegülle breitverteilt ausgebracht einen Emissionsfaktor von 0,2 kg kg⁻¹ hat. Die in unseren Szenarien vorausgesetzte Ausbringung und Einarbeitung mit dem Gülle-Grubber-Verfahren unterbindet größere Emissionen; eine Emissionsminderung von 90 % wird in Übereinstimmung mit FNR (2013), S. 191, angenommen.

Tabelle 4: Ausscheidungen und Emissionen pro Tierplatz (Flüssigmist)

		Einheit *	Szenario					
			S_11	S_12	S_13	S_14	S_15	S_12R
Ausscheidungen								
CH ₄	Verdauung	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ CH ₄	0,96	1,02	1,02	1,02	1,02	0,99
VS		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ VS	93,7	99,4	99,4	99,4	99,4	92,8
N		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N	12,49	13,18	13,18	13,18	13,18	12,85
TAN		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N	8,40	8,84	8,84	8,84	8,84	8,66
Emissionen								
CH ₄	Lager	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ CH ₄	4,8	5,1	5,1	0,2	0,2	4,8
NH ₃	Stall	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NH ₃	3,1	3,2	3,2	3,2	0,3	3,2
	Lager	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NH ₃	1,1	1,1	0,2	0,2	0,2	1,1
	Ausbringung	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NH ₃	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
	insgesamt	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NH ₃	4,3	4,5	3,5	3,6	0,7	4,4
NO		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N ₂ O	Direkt aus Stall und Lager	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Indirekt aus NH ₃ und NO insgesamt	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N ₂ O	0,06	0,06	0,05	0,05	0,01	0,06
THG		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ CO ₂ -eq	161	170	166	45	34	160
PM 2.5		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ PM	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
PM 10		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ PM	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
N-Eintrag im Boden		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N	9,1	9,6	10,4	10,4	11,5	9,3
CH₄ im Biogas		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ CH ₄				23,7	23,7	

* pl: Tierplatz

Wird der Stall über eine Abluftreinigungsanlage entlüftet (S_1.4 → S_1.5), so sinken die NH₃-Emissionen aus dem Stall. Alle anderen Emissionen bleiben wie zuvor.

Die Einträge in den Boden werden jeweils erhöht, wenn bei den Emissionen „eingespart“ wurde. Hierdurch kann im Bereich der Futterproduktion, die in dieser Arbeit nicht bewertet wird, Mineraldünger eingespart werden, deren energieintensive Herstellung mit erheblichen Treibhausgasemissionen belastet ist.

3.3 Emissionen pro Tierplatz in Festmistssystemen

Tabelle 5 stellt die Ergebnisse zusammen. Die Ausscheidungen sind gegenüber Tabelle 4 unverändert.

Erhöhte tierische Leistung (S_2.1 → S_2.2) führt auch hier Erhöhung der Emissionen. (Bei CH₄ aus der Verdauung und NH₃ insgesamt müsste man hier weitere Nachkommastellen heranziehen.)

Tabelle 5: Ausscheidungen und Emissionen pro Tierplatz (Festmist)

		Einheit	Szenario					
			S_21	S_22	S_23	S_24	S_25	S_22R
Emissionen								
CH ₄	Lager	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ CH ₄	1,2	1,2		0,7	0,7	1,2
NH ₃	Stall	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NH ₃	4,1	4,3		4,3	0,5	4,2
	Lager	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NH ₃	2,5	2,7		0,6	0,6	2,6
	Ausbringung	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NH ₃	0,1	0,1		0,1	0,1	0,1
	insgesamt	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NH ₃	6,7	7,1		5,0	1,2	7,1
NO		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ NO	0,01	0,02		0,00	0,00	0,01
N ₂ O	Direkt aus Stall und Lager	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N ₂ O	0,11	0,11		0,00	0,00	0,11
	Indirekt aus NH ₃ und NO	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N ₂ O	0,09	0,09		0,07	0,02	0,09
	insgesamt	kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N ₂ O	0,19	0,20		0,07	0,02	0,20
THG		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ CO ₂ -eq	111	117		62	48	114
PM 2.5		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ PM	0,08	0,08		0,08	0,08	0,08
PM 10		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ PM	0,50	0,50		0,50	0,50	0,50
N-Eintrag in den Boden		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ N	7,7	8,1		10,1	7,7	7,9
CH₄ im Biogas		kg pl ⁻¹ a ⁻¹ CH ₄				68,7	68,7	

Das Lagern von Festmist unter der Folie (S_2.2 → S_2.3) kann nicht beschrieben werden (siehe Anhang B).

Wenn der Mist in einer Biogasanlage mit luftdichter Abdeckung vergoren wird (S_2.2 → S_2.4), ändern sich die Emissionen aus dem Lager erheblich. Außerdem fallen große Mengen an CH₄ im Biogas an. Das oben von der Umwandlung von organischem N zu TAN gesagte gilt hier sinngemäß. Die Gärreste aus der Verarbeitung von Festmist werden wie Gärreste aus Flüssigmist behandelt.

Der zusätzliche Betrieb einer Abgasreinigungsanlage (S_2.2 → S_2.4) führt auch hier zu einer drastischen Reduktion der NH₃-Emissionen aus dem Stall. Alle anderen bleiben gleich. Die dem Boden zugeführte N-Menge steigt dagegen.

3.4 Vergleich der Emissionen pro Tierplatz in Flüssig- und Festmistsystemen

Methan aus dem Lager: Anaerobe Bedingungen fördern die Bildung von CH₄ bei der Zersetzung von organischer Masse (VS). Der Vergleich von Flüssigmist und Festmist (S_1.1 → S_2.1) lässt dies deutlich erkennen, obschon im Festmistsystem deutlich größere VS-Mengen durch die Strohgaben zugegen sind.

Wird die Gülle im Biogasreaktor vergoren, so sind bei höheren Temperaturen und besseren Reaktionsbedingungen höhere CH₄-Freisetzungsraten möglich und erwünscht. Ein Teil dieses CH₄ entweicht ein Teil durch Lecks. Es wird angenommen, dass dies 1 % der gebildeten Menge ist. Dennoch verringert sich die Menge des in die Atmosphäre gelangenden CH₄ auf weniger als die Hälfte. Der erhebliche Anstieg der Biogas-Bildung geht auf die Vergärung von Stroh zurück. Dieser Anteil ist aber kein „Gewinn“, da dieses CH₄ sonst wahrscheinlich andernorts in Nawaro-Anlagen vergoren oder auf dem Acker eingepflügt würde und hier zur Erhöhung der C-Gehalte der Böden beitrüge bzw. zu CO₂ oxidiert würde.

Ammoniak-Emissionen: NH₃-Emissionen aus konventionellen Festmistsystemen sind höher als die von entsprechenden Flüssigmistsystemen (S_1.1 → S_2.1). Sie führen im Stall als auch im Misthaufen zu solch großen Ammonium-Stickstoff (TAN)-Verlusten, dass bei der Ausbringung so gut wie kein TAN mehr übrig ist, aus dem Emissionen stattfinden könnten. Der Wechsel von Fest- zu Flüssigmistsystemen führt zu zwar deutlich verringerten Emissionen aus dem Stall und aus dem Lager; es verbleibt aber mehr N in der Gülle. Dies führt bei der Ausbringung zu Mehremissionen. In

der Gesamtheit von stall-, lager-, und ausbringungsbedingten Emissionen entsteht bei Flüssigmistverfahren bei vergleichbarer Abproduktbehandlung weniger NH₃ je Tierplatz.

Emissionen von Stickstoffmonoxid und Lachgas: Weitgehender Luftabschluss unterbindet die Bildung von NO und N₂O. Festmist ermöglicht die Bildung von NO und N₂O. Die indirekten N₂O-Emissionen sind bei Flüssigmist stets deutlich höher als die direkten N₂O-Emissionen aus Stall und Lager. Bei nicht abgedecktem Festmist sind sie vergleichbar groß.

Treibhausgase insgesamt: Die THG-Emissionen sind meist von den CH₄-Emissionen geprägt. Ausnahmen sind S_2.1 und S_2.2, bei denen etwa die Hälfte der THG N₂O ist. Bei den Szenarien ohne Biogas sind die Festmistsysteme günstiger; bei Biogas schlägt die große VS-Menge zu Buche. Allerdings ist - wie bereits geschildert - zu berücksichtigen, dass die Emissionen aus CH₄ nun hier an anderer Stelle entstehen.

3.5 Vergleich der Szenarien

Im Einzelnen wirken sich die Schritte von Szenario zu Szenario wie folgt auf die Emission pro Tierplatz aus. Angegeben ist, wie viele Prozente des jeweils als zweiter genannter Wert vom erst genannten beträgt. Die Rechnungen wurden mit Datensätzen ohne Rundung durchgeführt.

- Flüssigmistsysteme
 - Wirkung erhöhter tierischer Leistung
S_1.1 und S_1.2: NH₃: 105 %; THG: 106 %
 - Wirkung einer nicht gasdichten Abdeckung
S_1.2 und S_1.3: NH₃: 79 %; THG: 98 %
 - Effekt der Biogasnutzung
(S_1.2 und S_1.4): NH₃ : 81 %; THG: 27 %
 - Effekt der Kombination aus Biogas und Abluftreinigungsanlage
(S_1.2 und S_1.6): NH₃: 16 %; THG: 20 %
 - Wirkung Nährstoffreduzierung über Futter:
(S_1.2 und S_1.2R): NH₃: 98 %; THG: 94 %

- Festmistsysteme
 - Wirkung erhöhter tierischer Leistung
S_2.1 und S_2.2: NH₃: 105 %; THG: 106 %
 - Effekt der Biogasnutzung
(S_2.2 und S_2.4): NH₃ : 71 %; THG: 53 %
 - Effekt der Kombination aus Biogas und Abluftreinigungsanlage
(S_2.2 und S_2.6): NH₃: 17 %; THG: 41 %
 - Wirkung Nährstoffreduzierung über Futter:
(S_2.2 und S_2.2R): NH₃: 100 %; THG: 98 %

- Vergleich Flüssigmist- und Festmistsysteme
(%-Angaben für Emission aus Festmist im Vergleich zu Flüssigmist)
 - S_1.1 und S_2.1: NH₃: 159 %; THG: 69 %
 - S_1.2 und S_2.2: NH₃: 159 %; THG: 69 %
 - S_1.2R und S_2.2R: NH₃: 162 %; THG: 71 %
 - S_1.4 und S_2.4: NH₃: 139 %; THG: 137 %
 - S_1.5 und S_2.5: NH₃: 169 %; THG: 139 %
 - Staub (PM10) (S_1 und S_2): 119 %

3.6 Produktbezogene Emissionen

Eine Optimierung des Emissionsgeschehens in der landwirtschaftlichen Produktion muss zum Ziel haben, die Emissionen je Einheit des verkaufsfähigen Produkts zu senken. Auch wenn im Rahmen der vorliegenden Untersuchung lediglich die Mast untersucht wurde, können aus Tabel-

le 4 die Emissionen bezogen auf das verkaufsfähige Produkt, d.h. dem Zuwachs pro Platz und Jahr in Abhängigkeit der verschiedenen Szenarien eingeschätzt werden.

Tabelle 6: Emissionen pro kg Zuwachs (Flüssigmistsysteme)

		Einheit	Szenario					
			S_1.1	S_1.2	S_1.3	S_1.4	S_1.5	S_1.2R
Emissionen								
CH ₄	insgesamt	g kg ⁻¹ CH ₄	20,7	19,9	19,9	4,1	4,1	18,7
NH ₃	insgesamt	g kg ⁻¹ NH ₃	15,2	14,5	11,5	11,8	2,4	14,2
NO		g kg ⁻¹ a ⁻¹ NO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N ₂ O	insgesamt	g kg ⁻¹ a ⁻¹ N ₂ O	0,2	0,2	0,1	0,2	0,0	0,2
THG		g kg ⁻¹ CO ₂ -eq	575	552	541	147	111	521
PM 2.5		g kg ⁻¹ PM	0,25	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
PM 10		g kg ⁻¹ PM	1,51	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36

Tabelle 7: Emissionen pro kg Zuwachs (Festmistsysteme)

		Einheit	Szenario					
			S_2.1	S_2.2	S_2.3	S_2.4	S_2.5	S_2.2R
Emissionen								
CH ₄	insgesamt	g kg ⁻¹ CH ₄	7,7	7,3		5,6	5,6	7,0
NH ₃	insgesamt	g kg ⁻¹ NH ₃	24,2	23,2		16,4	4,0	23,1
NO		g kg ⁻¹ a ⁻¹ NO	0,1	0,0		0,0	0,0	0,0
N ₂ O	insgesamt	g kg ⁻¹ a ⁻¹ N ₂ O	0,7	0,7		0,2	0,1	0,7
THG		g kg ⁻¹ CO ₂ -eq	398	379		202	154	371
PM 2.5		g kg ⁻¹ PM	0,29	0,26		0,26	0,26	0,26
PM 10		g kg ⁻¹ PM	1,79	1,62		1,62	1,62	1,62

Wie üblich, lohnt sich Leistungssteigerung bei allen emittierten Spezies.

Wie oben, sind beim Festmistverfahren niedrigere THG- und höhere NH₃-Emissionen zu beobachten. Verfahren der Biogasgewinnung aus Gülle oder der Abluftreinigung verringern die die THG-Emission aus der Schweineproduktion erheblich, so dass bei den Haltungsverfahren mit Biogasproduktion und Abluftreinigung eine einstreulose Haltung in beiden Emissionskomponenten im Vorteil ist.

4 Diskussion

4.1 Eignung der Rechenverfahren

Die Berechnungen vereinfachen im Einklang mit den international verbindlichen Regelwerken zur Emissionsberichterstattung (IPCC, 1996, 2000) die komplexen Vorgänge, indem sie etwa Emissionen stets aus der Masse von VS oder jeweils verfügbarem N und einem Emissionsfaktor quantifizieren, nicht aber auf emittierende Flächen beziehen.

Im Gegensatz zur Emissionsberichterstattung werden bei den hier durchgeführten Rechnungen die VS- und N-Mengen mit dem Stroheintrag berücksichtigt.

Bei den Stäuben wird nur nach Tierplätzen mit Fest- und Flüssigmist unterschieden.

Klimatische Einflüsse werden nicht berücksichtigt. Die Emissionsfaktoren spiegeln ein mittleres Klima mit mittleren Temperaturen, Niederschlagsmengen und -verteilungen und Windgeschwindigkeiten wider.

4.2 Sind die Emissionsfaktoren angemessen?

Die verwendeten Emissionsfaktoren beruhen auf Messungen. In Döhler et al. (2002) sowie Eulich-Menden et al. (2004, 2011) wurden Messungen zusammengestellt und ausgewertet. Als Mangel wurde hierbei neben der geringen Zahl verwertbarer Messungen auch der Umstand empfunden, dass sich die Autoren nur selten zur Übertragbarkeit der Daten äußern. So sind die in den nationalen und internationalen Regelwerken verwendeten Emissionsfaktoren fast immer Konventionswerte. Vergleichsrechnungen in Mittel- und Nordeuropa mit unterschiedlichen Modellansätzen liefern aber dennoch gut vergleichbare Ergebnisse (Reidy et al., 2008, 2009).

Für die vorliegende Arbeit ist wichtig, dass diese Konventionswerte untereinander abgestimmt sind und relative Änderungen besser beschreiben als die absolute Größe. Untersuchungen zur Unsicherheit der Inventare haben für die nationalen NH_3 -Emissionen einen Wert von 16,4 % (halbes 95-%-Konfidenzintervall) ergeben. Die Unsicherheit der THG-Emissionen ist deutlich höher. Dies ist vor allem durch die Unsicherheiten der N_2O -Emissionen bedingt. Zu Einzelheiten siehe Rösemann et al. (2013), Kapitel 13.

Die Berechnungen der Staubemissionen haben den Charakter einer ersten Schätzung. Sie geben wahrscheinlich die zutreffende Größenordnung wieder.

4.3 Repräsentativität

Die hier vorgestellten Rechnungen beschreiben nur einen Ausschnitt aus der Schweineproduktion in Thüringen (keine Sauen, keine Ferkel, kein Futterbereitstellung).

Die Lebendmassen entsprechen den im Inventar verwendeten Größen. Im Inventar werden im Mittel geringere Zunahmen verwendet. Die Zahl der Umtriebe in den Jahren 2009 bis 2011 betrug 2,85 Tiere Platz⁻¹ a⁻¹. Die für Deutschland insgesamt angenommenen Futtereigenschaften weichen von den Annahmen dieser Studie ab. (Rösemann et al., 2013, Tabellenanhang)

Etwa die Hälfte der Tiere wird momentan 3-phasig gefüttert. N-reduziertes Futter wird in Thüringen nicht berücksichtigt.

4.5 Fazit

Diese Studie kann prinzipiell nur Richtungen aufzeigen. Wichtig ist hierbei eine umfassende Untersuchung des gesamten Produktionsgeschehens unter Einbeziehung der Abprodukte. Folgende wesentliche Fakten werden für die Bewertung der Emissionen bei unterschiedlichen Verfahren der Schweinemast deutlich:

1. Einstreulose Haltungsverfahren erzeugen eine geringere NH_3 - und Staubemission als die Schweinemast mit Einstreu, aber höhere THG-Emissionen.
2. Die Art und Weise der Güllelagerung wirkt sich bei nicht gasdichten Abdeckungen (Folien) mindernd auf die Emissionen von NH_3 , bei gasdichten Abdeckungen ebenso auf die der THG-Emissionen aus.
3. Leistungssteigerungen durch Nutzung wachstumsintensiverer Genetik oder eine nährstoffangepasste Fütterung reduzieren die NH_3 - und THG-Emissionen je Tier geringfügig.
4. Wesentliche Emissionsminderungen sind zu erreichen durch die Nutzung der Gülle zur Biogasgewinnung und die Installation von Abluftreinigungsanlagen.

Dank

Die Futtereigenschaften orientieren sich an Futtermischungen, die von Dr. Heinrich Kleine Klausling, Deuka - Deutsche Tiernahrung Cremer GmbH & Co. KG, bereitgestellt wurden. Dr. John Webb, AEA, verdanken wir wichtige Hinweise zur Abdeckung von Festmistlagern.

Literatur

- Beyer M, Chudy A, Hoffmann L, Jentsch W, Laube W, Nehring K, Schiemann R (2004) Rostocker Futterbewertungssystem. Kennzahlen des Futterwertes und Futterbedarfs auf der Basis von Nettoenergie. Dummerstorf : Forschungsinstitut für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere. 392 S.
- Chadwick DR (2005) Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps: effects of compaction and covering. *Atmos. Environ.* 29, 787-799.
- Dämmgen U, Amon B, Gyldenkerne S, Hutchings NJ, Kleine Klausing H, Haenel H-D, Rösemann C (2011a) Reassessment of the calculation procedure for the volatile solids excretion rates of cattle and pigs in the Austrian, Danish and German agricultural emission inventories. *Landbauforsch*, 115-126
- Dämmgen U, Amon B, Hutchings NJ, Haenel H-D, Rösemann C (2012b) Data sets to assess methane emissions from untreated cattle and pig slurry and solid manure storage systems in the German and Austrian emission inventories. *Landbauforsch* 62, 1-19
- Dämmgen U, Brade W, Schulz J, Kleine Klausing H, Hutchings NJ, Haenel H-D, Rösemann C (2011b) The effect of feed composition and feeding strategies on excretion rates in German pig production. *Landbauforsch* 61, 327-342
- Dämmgen U, Haenel H-D, Rösemann C, Eurich-Menden B, Döhler H (2010a) Derivation of TAN related ammonia emission factors in pig production. *Landbauforsch* 60, 241-248
- Dämmgen U, Hahne J, Haenel H-D, Rösemann C (2010b) Die Modellierung der Emissionen von Stickstoffspezies, NMVOC und Staub aus Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehaltung im deutschen landwirtschaftlichen Emissionsinventar. *Gefahrstoffe - Reinh Luft* 70, 437-443
- Dämmgen U, Hutchings NJ (2008) Emissions of gaseous nitrogen species from manure management - a new approach. *Environ Pollut* 154, 488-497
- Dämmgen U, Schulz J, Kleine Klausing H, Hutchings NJ, Haenel H-D, Rösemann C (2012a) Enteric methane emissions from German pigs. *Landbauforschung* 62, 83-96
- DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs (2004) Management techniques to minimise ammonia emissions from solid manures. Unveröffentlichter Abschlussbericht
- EMEP (2009) - EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook, Technical Report No 6/2009 [online]. To be found at <<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>> [quoted 13.06.2013]
- EU - European Union (2013): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants and amending Directive 2003/35/EC/* COM/2013/0920 final - 2013/0443 (COD) */ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:DKEY=746863:EN:NOT>
- Eurich Menden B, Dämmgen U, Döhler H (2004) A collation and analysis of current ammonia research data available in German. A contribution to DEFRA project AM0123. Schlussbericht für das UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), London, Projekt Nr. AM 0123. Darmstadt und Braunschweig. 35 S.
- Eurich Menden B, Döhler H, Van den Weghe H (2011) Ammoniakemissionsfaktoren im landwirtschaftlichen Emissionsinventar - Teil 1: Geflügel und Mastschweine. *Landtechnik* 66, 60-63
- FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) (2013): Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung. 6. Aufl., Gülzow-Prüzen
- Haenel H-D, Dämmgen U, Laubach P, Rösemann C (2011a) Update of the calculation of metabolizable energy requirements for pigs in the German agricultural emission inventory. *Landbauforsch* 61, 217-228
- Haenel H-D, Dämmgen U, Rösemann C (2011b) Estimating numbers of piglets, weaners and fattening pigs for the German agricultural emission inventory. *Landbauforsch* 61, 229-236
- Hansen M N, Henriksen K, Sommer S G (2006) Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry. Effects of covering. *Atmos. Environ.* 40, 4172-4181
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (1996) Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories : vol 3 : Reference manual [online]. Zu finden unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories : vol 4 : Agriculture, forestry and other land use [online]. Zu finden unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2012) Dokumentation zur Datenaufbereitung der Aktivitätsdaten Biogas für den Nationalen Inventarbericht, Submission 2013 für 2011. (Stand: August 2012). KTBL, Darmstadt, pp 12

LFU - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2012): Biogashandbuch Bayern, Materialienband. <http://www.lfu.bayern.de/abfall/biogashandbuch/index.htm>

Reidy B, Dämmgen U, Döhler H, Eurich-Menden B, van Ewert FK, Hutchings NJ, Luesink HH, Menzi H, Misselbrook TH, Monteny G-J, Webb J (2008) Comparison of models used for national agricultural ammonia inventories in Europe: Liquid manure systems. *Atmos Environ* 42, 3452-3467

Reidy B, Webb J, Misselbrook TH, Menzi H, Luesink HH, Hutchings NJ, Eurich-Menden B, Döhler H, Dämmgen U (2009) Comparison of models used for national agricultural ammonia emission inventories in Europe: Litter based manure systems. *Atmos Environ* 43, 1632-1640

Rösemann C, Haenel H-D, Dämmgen U, Poddey E, Freibauer A, Wulf S, Eurich-Menden B, Döhler H, Schreiner C, Bauer B, Osterburg B (2013) Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2011. Report on methods and data (RMD) Submission 2013. *Thünen Report* 1, 2-386

Reinhold G, Riedel R, Zorn W, König V (2012) Merkblatt Eigenschaften von Biogasgülle. Jena : Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 10 S.

Webb J, Sommer S G, Kupper Th, Groenestein K, Hutchings N J, Eurich-Menden B, Rodhe L, Misselbrook Th H, Amon B (2012) Emissions of Ammonia, Nitrous Oxide and Methane During the Management of Solid Manures. *Sustainable Agriculture Reviews* 8, 67-107.

Zorn W, Heß H, König V (2013) Auswertung der Nährstoffvergleiche Thüringer Landwirtschaftsbetriebe des Düngejahres 2012. Zwischenbericht. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, unveröffentlicht

Anhang A

Liste der Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren beziehen sich stets auf N oder C. Sie sind für die Ermittlung der Gasemissionen mit den Molmassen umzurechnen:

- NH_3 17/14 kg kg^{-1}
- N_2O 44/28 kg kg^{-1}
- NO 30/14 kg kg^{-1}
- CH_4 16/12 kg kg^{-1}

Ammoniak

Stall	Festmist	0,40 kg kg^{-1}	von TAN
	Flüssigmist	0,30 kg kg^{-1}	von TAN
	Abluftreinigung		Minderung 90 % der Stallemissionen
Lager	Festmist	Misthaufen	0,60 kg kg^{-1} von TAN
	Gülle	offener Tank	0,15 kg kg^{-1} von TAN
		Schwimmdecke	Minderung 30 % gegenüber offen
		Folie	Minderung 85 % gegenüber offen
	Tragluftdach	Minderung 90 % gegenüber offen	
	Biogasgülle	offener Tank	0,208 kg kg^{-1} von TAN
		Tragluftdach	Minderung 90 % gegenüber offen
Ausbringung	Festmist	breit	0,90 kg kg^{-1} von TAN
		schnelle Einarbeitung	Minderung 90 % gegenüber breit
	Gülle	breit auf Acker	0,25 kg kg^{-1} von TAN
Gülle-Grubber		Minderung 84 % gegenüber breit	
	Biogasgülle	breit	0,20 kg kg^{-1} von TAN
		Gülle-Grubber	Minderung 90 % gegenüber breit

Lachgas

Stall, Lager	Festmist	Misthaufen	0,005 kg kg^{-1} von N
	Gülle	ohne Abdeckung	0,000 kg kg^{-1} von N
	Gülle	Schwimmdecke	0,005 kg kg^{-1} von N
		Folie	0,000 kg kg^{-1} von N
		Tragluftdach	0,000 kg kg^{-1} von N
aus Emissionen	indirekt	0,010 kg kg^{-1} von N emittiert als NH_3 oder NO	

Stickstoffoxide und Distickstoff

Für die Emissionen aus Stall und Lager wird für NO jeweils ein Zehntel der N₂O-Emissionen angenommen, für die N₂-Emissionen das Dreifache (jeweils ausgedrückt als N).

Methan-Umwandlungsfaktor für Methan aus dem Lager für 10 °C

Lager	Festmist	Misthaufen	0,020 kg kg ⁻¹ C
	Gülle	Schwimmdecke ohne Schwimmdecke	0,10 kg kg ⁻¹ C 0,17 kg kg ⁻¹ C
		Biogasreaktor	0,80 kg kg ⁻¹ C
Leckagerate für Biogasanlagen			0,01 kg kg ⁻¹ CH ₄

Partikelemissionen aus dem Stall

PM ₁₀	Festmist	0,500	kg pl ⁻¹ a ⁻¹
	Gülle, Spaltenboden	0,420	kg pl ⁻¹ a ⁻¹
PM _{2,5}	Festmist	0,081	kg pl ⁻¹ a ⁻¹
	Gülle, Spaltenboden	0,069	kg pl ⁻¹ a ⁻¹

Anhang B

Emissionsfaktoren für abgedeckte Festmistlager

Eine erste Literaturrecherche ergab, dass Emissionen aus abgedeckten Festmistlagern nur selten beschrieben wird. Verfügbar war eine Quelle für Rinderfestmist: Chadwick (2005) nennt drei Experimente, in denen die Emissionen aus abgedeckten Rindermisthaufen gegenüber gleichzeitig untersuchten nicht abgedeckten um 93 %, 64 % und 47 % abnahmen. Für N_2O ermittelte er Minderungen von 71 % beim ersten und 49 % beim dritten Experiment. Demgegenüber nahmen die CH_4 -Emissionen in allen Fällen zu. Hieraus lassen sich keine Mittelwerte ableiten. Die Rottevorgänge in Rindermist sind anders als im Schweinemist. Eine Übertragbarkeit wäre aus diesem Grund nicht möglich gewesen.

Außerdem wurde untersucht, ob und inwieweit eine Studie von Hansen et al. (2006) zur Lagerung aus dem Feststoff separierter Gülle nutzbar ist. Hier wurde eine Emissionsminderung von etwa 12 % beobachtet. Allerdings befindet sich der weitaus größte Anteil des für die NH_3 -Freisetzung verantwortlichen TAN in der flüssigen Fraktion. Die Ergebnisse erscheinen daher prinzipiell nicht übertragbar.

Eine (fast) aktuelle umfassende Literaturrecherche (Webb et al., 2012) lässt erkennen, dass weitere experimentelle Ergebnisse nicht veröffentlicht wurden.

Anfragen bei Experten ergaben den Hinweis auf eine unveröffentlichte britische Arbeit (DEFRA, 2004), in der der Effekt der Abdeckung von Schweinefestmist mit einer Plane untersucht wurde. Dabei wurde eine Minderung der Emissionen um etwa 75 % festgestellt. Die in zwei aufeinander folgenden Jahren angestellten Experimente unterscheiden sich deutlich. Die NH_3 -Emissionen aus den abgedeckten Lagern verhalten sich wie etwa 2 zu 1.

Es ist mit Sicherheit davon auszugehen, dass die Abdeckung des Festmistlagers mit einer Folie zu erheblichen Emissionsminderungen führt. Eine Quantifizierung dieses Effekts im Rahmen der vorliegenden Arbeit erscheint allerdings noch nicht angemessen.