

Der Einfluss der Futterkonfektionierung bei Mastschweinen und Broilern auf die Emission von Treibhausgasen und Ammoniak – Betrachtung der gesamten Produktionskette

Ulrich Dämmgen*, Wendy Liermann**, Verena Bösch***, Andreas Berk** und Sven Dänicke**

Zusammenfassung

Konfektionierung (Vermahlen, Pelletieren, Expandieren) und Zusammensetzung der Futter haben Einfluss auf die Emissionen von Treibhausgasen (THG) und Ammoniak (NH₃) der gesamten Produktionskette. Umfangreiche Fütterungsversuche wurden ausgewertet, um Emissionen der Tierhaltung mit Futterpflanzenbau, Mineraldüngerherstellung, Kalkgewinnung, Bereitstellung von Wasser und Energie zu quantifizieren und Reduktionspotenziale zu erkennen.

Die Emissionen je Tier sind wesentlich von der Menge des aufgenommenen Futters bestimmt, die allerdings von der Konfektionierung beeinflusst wird. Mit Ausnahme der Pelletierung sind die auf die Lebendmassezunahmen der Tiere bezogenen Emissionen vergleichsweise wenig durch die Konfektionierung beeinflusst. Pelletierung wirkt in jedem Fall emissionsmindernd (bei Mastschweinen etwa 5 %, bei Broilern fast 20 % der auf die Massezunahme bezogenen THG-Emissionen bzw. 7 und 11 % der entsprechenden NH₃-Emissionen). Die auf die Konfektionierung der Futter unmittelbar zurückzuführenden Emissionen fallen aber bei Betrachtung der Gesamtemissionen kaum ins Gewicht. Beide Tierarten haben unterschiedliche Emissionsmuster hinsichtlich der Stoffe und der Entstehungsorte, die durch die Lagerung der Exkremente gekennzeichnet sind. Die Ansprüche an das Stallklima bei Broilern führen zu erheblichen THG-Emissionen durch die Bereitstellung elektrischer Energie.

Der vermehrte Einsatz heimischer Futtermittel ist hinsichtlich der Emissionen nicht vorteilhaft.

Schlüsselwörter: *Mastschweine, Broiler, Futterkonfektionierung, Emissionen, Ammoniak, Treibhausgase*

Abstract

The effect of feed conditioning and composition on greenhouse gas and ammonia emissions from fattening pigs and broilers along the entire production chain

Changes in feed conditioning (grinding, pelleting, expanding) and feed composition result in increased or reduced greenhouse gas (GHG) and ammonia (NH₃) emissions from fattening pigs and broilers along the entire production chain. Extensive feeding experiments were evaluated to quantify emission reduction potentials (emissions from animals, feed, fertilizer and lime productions and provision of water and energy).

Emissions per animal are dominated by their feed intake which is dependent on feed conditioning. With the exception of pelleting, emissions related to live weight gain were comparatively little influenced by feed conditioning. Pelleting has a favourable effect (relative GHG emission from fattening pigs and broilers reduced by about 5 % and almost 20 %, respectively, NH₃ emissions by 7 and 11 %).

Operations during feed conditioning vary with respect to their energy consumption and hence the emissions originating from energy provision. They are of minor importance. Emissions from pigs and broilers differ with respect to their gas mixtures as well as their origins (reflecting different processes during handling of wet vs. solid manures, availability of oxygen). Broilers are produced in air-conditioned houses, leading to extensive electricity consumption and hence to considerable GHG emissions for electricity generation.

With respect to emissions, increased use of regionally produced feeds is unfavourable.

Keywords: *fattening pigs, broilers, feed conditioning, emissions, ammonia, greenhouse gases*

* Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Agrarclimatschutz, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

** Friedrich-Loeffler-Institut (FLI), Institut für Tierernährung, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

*** Internationale Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e.V., Forschungsinstitut, Frickenmühle 1, 38110 Braunschweig

1 Einleitung

Tierproduktion ist stets mit Emissionen verbunden. Es ist mittlerweile unumstritten, dass das Ausmaß dieser Emissionen begrenzt werden muss, da die veränderten Eigenschaften der Atmosphäre erhebliche unerwünschte Wirkungen haben. Bei der Suche nach emissionsmindernden Maßnahmen sind die zahlreichen Nebenwirkungen zu beachten. Hierzu zählen etwa der Flächenverbrauch bei Extensivierung, Energieverbrauch und bauliche Aufwendungen bei technischen Lösungen oder auch die Einflüsse auf Tiergesundheit und -wohlbefinden, schließlich auch die Einkommenssituation der Landwirte.

Das Projekt „Vergleich der Umweltwirkungen von Futtermitteln unterschiedlicher Veredlungsniveaus für Schweine und Broiler unter Nachhaltigkeitsaspekten“, das in Kooperation der Internationalen Forschungsgemeinschaft Futtermitteltechnik e.V. (IFF) mit dem Institut für Tierernährung des Friedrich-Löffler-Instituts (FLI) durchgeführt wurde, sollte Aufschluss über Zuwachsraten der Tiere, Schlachtkörperigenschaften und Tiergesundheit geben, wenn Futter

unterschiedlich konfektioniert werden (Liermann et al., 2015 a, b, 2016). Die gewonnenen Datensätze wurden daneben genutzt, um Veränderungen der Emissionen von Treibhausgasen (THG) und reaktiven Stickstoff- (N)-Verbindungen, insbesondere von Ammoniak (NH_3), zu bewerten,

Gegenstand dieser Arbeit ist die Quantifizierung der prozesstypischen THG- und NH_3 -Emissionen bei der Produktion von Mastschweinen und Broilern in Abhängigkeit von der Futterkonditionierung und -zusammensetzung. Dabei sollen alle Emissionen erfasst werden, die im Laufe des betrachteten Lebensabschnittes der Mastschweine bzw. Broiler in der eigentlichen Tierhaltung sowie den vorgelagerten Bereichen (Herstellung der Futter, Bereitstellung der dafür benötigten Mineraldünger, von Wasser und von Energie) entstehen, wenn die Tiere prozesstypisch gehalten werden.

2 Material und Methoden

2.1 Übersicht

Die Berechnung der Emissionen erfordert die Betrachtung der möglichst vollständigen Energie- und Stoffflüsse

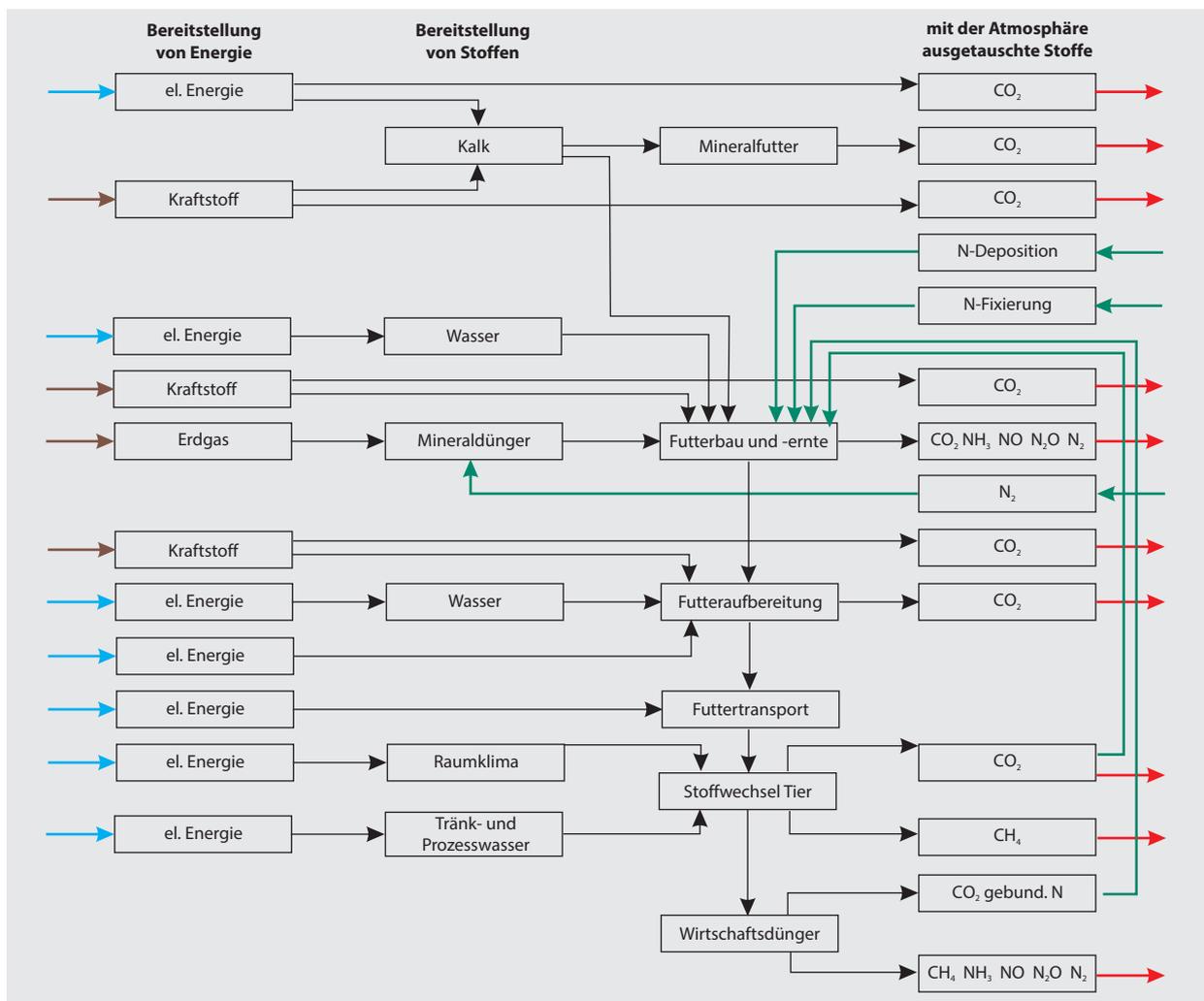


Abbildung 1

Stoffflüsse und Emissionen - eine Übersicht (Erläuterungen siehe Text)

(Abbildung 1). Bereits bei der Bereitstellung der Energieträger (am linken Rand) entstehen Emissionen. Die Energieträger dienen der Bereitstellung und dem Transport von Stoffen. Rote Pfeile am rechten Rand weisen auf Emissionen hin, die für das landwirtschaftliche Produktionssystem berechnet werden. Im Gegensatz hierzu werden die CO₂-Emissionen aus der Atmung der Tiere und aus dem Wirtschaftsdüngermanagement als bilanzneutral angesehen (grüne Pfeile): sie decken in guter Näherung den CO₂-Bedarf der Photosynthese (Grundannahme zur Berechnung der Emissionen von Kohlenstoff-Spezies in IPCC, 2006c; Vol. 4, Kap. 10). Die CO₂-Mengen aus der Umsetzung von Futterkalk im Tier werden dagegen als Emissionen betrachtet. Atmosphärische Einträge sind die N-Depositionen. Sie sind prinzipiell Teil der N-Bilanz (OECD, 2001), werden aber in der landwirtschaftlichen Praxis üblicherweise nicht in die Betrachtungen einbezogen; die vorliegende Arbeit folgt der Praxis. N-Fixierung in größerem Umfang findet bei Leguminosen statt. Dies wird in den Düngempfehlungen (z. B. LWK-Nds, 2013) berücksichtigt.

Die in dieser Arbeit eingesetzten Rechenverfahren orientieren sich im Prinzip an den in Dämmgen et al. (2016) aufgeführten Methoden. Fütterung, Metabolismus und Wirtschaftsdüngermanagement unterscheiden sich jedoch in den Einzelheiten deutlich von den dort für Rinder beschriebenen Wegen. Eine Beschreibung einzelner Rechenwege erscheint deshalb unumgänglich.

2.2 Die Mastversuche

Zur Bewertung der Auswirkungen der Futtermittelbehandlung bzw. -zusammensetzung auf die tierischen Leistungen und THG- und NH₃-Emissionen wurden am Institut für Tierernährung für die Tierkategorien Mastschwein (Schweinefleischerzeugung) und Broiler (Geflügelfleischerzeugung) jeweils 2 Fütterungsversuche nach den in den Abbildungen 2 und 3 (a und b) dargestellten Schemata durchgeführt.

Im ersten **Schweinemastversuch** kamen insgesamt 96 Tiere, einzeln einstreulos gehalten, in den dargestellten 8 Fütterungsvarianten (Abbildung 2) zum Einsatz. Die Verdaulichkeit der Rohnährstoffe wurde im klassischen Verdauungsversuch (GfE, 2005) mit jeweils 4 Tieren pro Fütterungsvariante (einschließlich der N-Bilanz) bestimmt (Liermann et al., 2015a). Im zweiten Schweinemastversuch kamen unter den gleichen Bedingungen 100 Tiere in 4 Fütterungsvarianten (Abbildung 3a) zum Einsatz. Die Verdaulichkeit der Rohnährstoffe (ohne N-Bilanz) wurde mittels Marker methode (GfE, 2005) bei je 12 Tieren während des Mastversuches bestimmt. Als Marker diente hier die im Futter enthaltene HCl-unlösliche Asche.

Die **Broilermastversuche** wurden mit Mastgruppen zu jeweils 13 (Versuch 1) bzw. 12 Tieren (Versuch 2) durchgeführt. Im ersten Broilermastversuch (Liermann et al., 2015b) wurden insgesamt 624 Eintagsküken (6 Fütterungsvarianten zu je 8 Gruppen zu 13 Tieren) (Abbildung 2 ohne GEx und FEx) eingestallt. Die Haltung erfolgte auf Einstreu (Häckselstroh), die bei Bedarf nachgestreut wurde. Der entsprechende Verdauungsversuch wurde mit 36 Tieren (6 je Fütterungsvariante) im Alter von 21 Tagen in Einzeltierkäfigen ohne

Einstreu über 6 Tage durchgeführt. Der zweite Broilermastversuch wurde mit 768 Eintagsküken in 4 Fütterungsvarianten (Abbildung 3b) mit 16 Mastgruppen (12 Tiere je Fütterungsvariante) durchgeführt. Der Verdauungsversuch wurde analog dem ersten Broilermastversuch jedoch mit 4 Sammeltagen durchgeführt.

Die Rechnungen arbeiten mit einer konstanten Gruppengröße von 10 Broilern pro Gruppe.

Zur Berechnung der Emissionen aus der Vorkette wurden die eingesetzten Futtermengen benötigt. Sie wurden aus den Versuchen bereitgestellt. Aus den Ausscheidungen der Tiere wurden die Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement und die Mineraldüngergaben abgeleitet. Dazu wurden in allen vier Versuchen die Lebendmasseentwicklung der Tiere sowie der Futtermittelverbrauch wöchentlich erfasst. Die daraus ermittelten Daten des Futteraufwandes (kg Futter je kg Lebendmassezunahme), die Daten zu Futtermengen und -zusammensetzung sowie die Daten aus den Verdauungsversuchen (Verdaulichkeit der Rohnährstoffe) waren die Grundlage zur Berechnung der Ausscheidungen (Menge und Zusammensetzung).

2.3 Mischfutterherstellung und -konfektionierung

Die entscheidende Variable im Versuch ist die Zusammensetzung und Herstellung der Mischfütter. In einem ersten Schritt sollte dabei für die jeweilige Tierart die günstigste Variante der Konfektionierung einer Futtermischung ermittelt werden (zu den Kombinationen von Vermahlung und Konfektionierungen siehe Abbildung 2). In einem zweiten Schritt sollten die beiden hinsichtlich der Leistung und der gesundheitlichen Beurteilung besten Varianten an zwei unterschiedlichen Futtermischungen geprüft werden. Dazu kam jeweils eine „konventionelle“ Mischung auf Basis von Getreide und Sojaextraktionsschrot im Vergleich zu einer Mischung auf Basis vermehrt „heimischer“ Proteinträger zum Einsatz. Die Abbildungen 3a und 3b geben die gewählten Kombinationen wieder.

Futtermischung	Vermahlung	Konfektionierung	Bezeichnung
Standardrezeptur	grob vermahlen (35 bis 45 % > 1000 µm)	mehlförmig	GM
		pelletiert	GP
		expandiert	GEx
		expandiert und pelletiert	GExP
	fein vermahlen (80 bis 90 % < 1000 µm)	mehlförmig	FM
		pelletiert	FP
		expandiert	FEx
		expandiert und pelletiert	FExP

Abbildung 2

Behandlungsvarianten für die im jeweils ersten Versuch eingesetzte Futtermischung (-variante) (im Geflügelversuch ohne Varianten GEx und FEx)

Futtertyp	Vermahlung	Konfektionierung	Bezeichnung
Standardrezeptur (Sojaextraktionsschrot)	grob vermahlen fein vermahlen	grob vermahlen (mehlförmig)	GM _{kon}
		fein vermahlen und pelletiert	GP _{kon}
Rezeptur mit vermehrt heimischen Futtermitteln	grob vermahlen fein vermahlen	grob vermahlen (mehlförmig)	FM _{heim}
		fein vermahlen und pelletiert	FP _{heim}

Abbildung 3a
Versuchsdesign des zweiten Mastversuches, Schweine

Futtertyp	Vermahlung	Konfektionierung	Bezeichnung
Standardrezeptur (Sojaextraktionsschrot)	grob vermahlen fein vermahlen	expandiert und pelletiert	GEX _{kon}
		pelletiert	FP _{kon}
Rezeptur mit vermehrt heimischen Futtermitteln	grob vermahlen fein vermahlen	expandiert und pelletiert	GEX _{heim}
		pelletiert	FP _{heim}

Abbildung 3b
Versuchsdesign des zweiten Mastversuches, Broiler

2.4 Emissionen beim Anbau der Futterpflanzen

2.4.1 Futtermengen und -zusammensetzungen

Die Schweinemastversuche waren dreiphasig im Mastabschnitt von ca. 28 kg bis 120 kg Lebendmasse (LM) angelegt, die Broilerversuche (1. bis 35. Lebenstag) einphasig. In den Versuchen 1 und 2 mit Schweinen kamen die in den Tabellen 1 und 2 aufgeführten Futtermischungen zum Einsatz.

Tabelle 1
Futterzusammensetzung (g kg⁻¹) des 1. Schweinemastversuches

	Anfangsmast (AM) 25 bis 45 kg LM	Mittelmast (MM) 45 bis 75 kg LM	Endmast (EM) 75 bis 120 kg LM
Weizen	250,0	-	-
Gerste	324,1	200,0	250,0
Roggen	125,0	250,0	250,0
Triticale	-	261,0	246,0
Sojaextraktionsschrot	111,1	97,7	30,0
Weizenkleie	72,0	80,0	90,0
Sojabohnen getoastet	47,5	-	-
Rapsextraktionsschrot	-	50,0	70,0
Brotmehl getoastet	-	15,0	-
Hafer	-	10,0	20,0
Malzkeime	15,0	-	-
Leinsamen	5,0	-	-

Fortsetzung Tabelle 1, siehe nächste Spalte

Fettsäuren	-	10,0	5,0
Calciumcarbonat	12,0	10,0	13,0
Natriumchlorid	5,0	4,3	4,7
Sojaöl	11,0	-	-
Melasse	-	-	10,0
Calcium-Natrium-Phosphat	5,9	-	-
Säurenmix LIGRANA (Schaumann)	5,0	-	-
Lysin HCl	5,4	3,0	3,5
DL-Methionin	1,4	0,5	0,5
L-Threonin	1,9	-	-
Premix (Vitamine und Spurenelemente)	2,7	8,5	7,3

Tabelle 2
Futterzusammensetzung (g kg⁻¹) des 2. Schweinemastversuches

	Anfangsmast (AM) 25 bis 45 kg LM	Mittelmast (MM) 45 bis 75 kg LM	Endmast (EM) 75 bis 120 kg LM
Mischung 1: konventionelle Eiweißträger			
Sojaextraktionsschrot	206,6	184,0	114,0
Mais	250,0	250,0	188,5
Gerste	100,0	100,0	100,0
Weizen	271,0	226,6	288,0
Maisglutenmehl	-	-	61,5
Weizenkleie	33,8	100,8	110,0
Maismehl Costimex (Dacsa)	100,0	100,0	100,0
Premix (Vitamine u. Spurenelemente)*	23,2	22,0	20,0
Vinasse	10,0	10,0	10,0
Futteröl HL**	2,3	5,4	6,0
Lysin HCl	2,8	1,1	2,0
DL-Methionin	0,3	0,1	-
Mischung 2: einheimische Eiweißträger			
Rapsextraktionsschrot	150,0	150,0	150,0
Regionale Sojabohnen	87,4	62,0	-
Mais	331,0	330,0	323,0
Gerste	100,0	100,0	100,0
Weizen	217,5	218,0	273,6
Schlempe (DDGS, Protigrain®)	60,0	60,0	60,0
Maisglutenmehl	19,0	21,0	1,2
Weizenkleie	-	24,0	34,0
Maismehl Costimex (Dacsa)	-	-	26,0
Premix (Vitamine u. Spurenelemente)*	20,2	21,8	19,0
Vinasse	10,0	10,0	10,0
Lysin HCl	4,8	3,2	3,2
DL-Methionin	0,1	-	-

* CaCO₃: Es wird angenommen, dass die Futterkalk- und Futterphosphat-Gehalte in Premix in Versuch 2 denen in Versuch 1 gleichgesetzt werden können.
** In den Rechnungen wurde angenommen, dass es sich um Sojaöl handelt.

In den Broilerversuchen wurden die in den Tabellen 3 und 4 beschriebenen Futtermischungen eingesetzt.

Tabelle 3
Futterzusammensetzung (g kg⁻¹) des 1. Broilermastversuches

Mais	240,0
Weizen	353,8
Weizenmehl	30,0
HP-Sojaextraktionsschrot	250,0
Rapskuchen	60,0
Pflanzenöl	35,0
Calciumcarbonat	12,4
Calcium-Natrium-Phosphat	3,8
Mono-Calcium-Phosphat	3,0
Premix (Vitamine und Spurenelemente)	12,0

Tabelle 4
Futterzusammensetzung (g kg⁻¹) des 2. Broilermastversuches

	erhöhter Anteil konventioneller Eiweißträger	erhöhter Anteil einheimischer Eiweißträger
Mais	240,0	240,0
Weizen	363,8	339,1
Weizenmehl	32,0	32,0
HP-Sojaextraktionsschrot	237,0	201,5
Rapskuchen	60,0	120,0
Pflanzenöl	36,0	37,0
Calciumcarbonat	12,3	12,3
Calcium-Natrium-Phosphat	3,9	3,1
Mono-Calcium-Phosphat	3,0	3,0
Premix (Vitamine und Spurenelemente)	12,0	12,0

2.4.2 Futtermittelmengen

Die Mengen der verbrauchten Futtermittel wurden durch Wägung ermittelt – in den Schweinemastversuchen je Tier und Phase, bei den Broilermastversuchen je Gruppe.

2.4.3 Ermittlung der Anbauflächen

Die je Futtermittel benötigten Mengen errechnen sich aus den Futtermengen und den Futterzusammensetzungen für jede Maststufe nach Gleichungen (1) bis (3):

$$A_j = a_{\text{feed},j} \cdot \sum_i (R_{\text{feed},i,j} \cdot f_{\text{all},i,j}) \quad (1)$$

$$a_{\text{feed},j} = \frac{1}{Y_{\text{feed},j}^*} \cdot \frac{m_{\text{feed},j,\text{Prod}}}{m_{\text{feed},j,\text{Ed}}} \quad (2)$$

$$Y_{\text{feed},j}^* = Y_{\text{feed},j} - S_{\text{feed},j} \quad (3)$$

mit

- A_j Anbaufläche einer Futterpflanze j je Tier (in ha Tier⁻¹)¹
- $a_{\text{feed},j}$ ertragsbezogener Flächenbedarf eines Futtermittels i (in ha (Mg FM)⁻¹)
- $R_{\text{feed},i,j}$ berechneter Bedarf eines Futtermittels i aus der Futterpflanze j (in Mg Tier⁻¹ FM)
- $f_{\text{all},i,j}$ Allokationsfaktor für das Produkt i aus der Futterpflanze j (in ha ha⁻¹)
- $Y_{\text{feed},j}^*$ um Saatgutmenge reduzierter Ertrag einer Futterpflanze j (in Mg ha⁻¹ FM)
- $m_{\text{feed},j,\text{Prod}}$ Masse des als Futter dienenden Produktes (in kg FM) (aus Massenflussrechnungen)
- $m_{\text{feed},j,\text{Ed}}$ Masse des angebauten Eduktes (in kg FM) (aus Massenflussrechnungen)
- $Y_{\text{feed},j}$ Ertrag einer Futterpflanze (in Mg ha⁻¹ FM)
- $S_{\text{feed},j}$ zur Aussaat benötigter Ertragsanteil einer Futterpflanze (in Mg ha⁻¹ FM)

Die Saatgutmengen entfallen bei Pflanzen, deren vegetative Teile genutzt werden (Zuckerrüben).

Als Erträge Y_j wurden mit Ausnahme von Hafer die in KTBL (2014), S. 212 f., angegebenen mittleren Erträge eingesetzt (Tabelle 5); für Hafer wurde in Anlehnung an DüV die Höchsterträge übernommen. Die Kalkgaben sind KTBL (2014), S. 261 ff., entnommen, ebenso der Dieselbedarf für ein wendendes Anbausystem. Für Leinsamen sind nur Ertrag und N-Düngung bekannt. Für Soja sind Details nicht verfügbar, dagegen aber die Summe der THG-Emissionen beim Anbau (BioGrace, 2012).

Tabelle 5

Erträge, N-Düngung, Kalk und Wasserbedarf für den Anbau der Futterpflanzen

Futterpflanze	Ertrag Mg ha ⁻¹ FM	N-Düngung nach DüV (Ertrag) kg ha ⁻¹ N (Mg ha ⁻¹)	Kalk Mg ha ⁻¹	Kraftstoff l ha ⁻¹	Wasser l ha ⁻¹	THG-Emission kg kg ⁻¹ CO ₂ -eq
Winterweizen *	7,4	230 (8,0)	1,0	83,62	1200	
Wintergerste *	6,5	180 (7,0)	1,0	83,62	1200	
Sommergerste	4,9	140 (5,0)	1,0	76,09	600	
Winterroggen*	5,5	170 (7,0)	1,0	83,62	1200	
Triticale *	5,8	190 (7,0)	1,0	83,62	1200	
Hafer *	4,5	130 (5,5)	1,0	83,62	1200	
Mais *	9,5	200 (9,0)	1,0	83,53	600	
Raps *	3,7	200 (4,0)	1,0	84,61	900	
Leinsamen **	1,5	100 (2,0)		70		
Soja **	2,8			58,77		0,3653
Zuckerrübe	60,9	170 (65)	1,0	92,5	900	

* Erträge aus KTBL (2014);
** Kraftstoff für Soja aus BioGrace (2012), Energiegehalt von Diesel 35,73 MJ l⁻¹, für Lein aus Graf et al. (2005)

¹ Die Symbolik der Gleichungen entspricht der im Emissionsinventar (Haenel et al., 2016) und in Dämmgen et al. (2016) verwendeten, in der die Kürzel jeweils aus den englischen Begriffen abgeleitet sind.

Die für die Futtermittel (Koppel- und Nebenprodukte) benötigten Anbauflächen sowie die Allokation der Emissionen sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Zum Zustandekommen der Werte siehe Anhang 1.

Die Allokation der Flächen berücksichtigt die Bruttoenergie (GE) im Edukt und Produkt gemäß Gleichung (4):

$$f_{all,i,j} = \frac{m_{FM,i,j,Prod} \cdot x_{DM,i,j,Prod} \cdot \eta_{GE,i,j,Prod}}{m_{FM,j,Ed} \cdot x_{DM,j,Ed} \cdot \eta_{GE,j,Ed}} \quad (4)$$

mit

- $f_{all,i,j}$ Allokationsfaktor für das Futtermittel (Produkt) i aus der Futterpflanze j (in ha ha⁻¹)
- $m_{FM,i,j,Prod}$ Frischmasse des Produkts i aus der Futterpflanze j (in Mg)
- $x_{DM,i,j,Prod}$ Trockenmassegehalt des Produkts i aus der Futterpflanze j (in Mg Mg⁻¹)
- $\eta_{GE,i,j,Prod}$ Bruttoenergiegehalt in der Trockenmasse des Produkts i aus der Futterpflanze j (in MJ Mg⁻¹)
- $m_{FM,j,Ed}$ Frischmasse des Edukts aus der Futterpflanze j (in Mg)
- $x_{DM,j,Ed}$ Trockenmassegehalt des Edukts aus der Futterpflanze j (in Mg Mg⁻¹)
- $\eta_{GE,j,Ed}$ Bruttoenergiegehalt in der Trockenmasse des Edukts aus der Futterpflanze j (in MJ Mg⁻¹)

Für die folgenden Stoffe bzw. Stoffgemische wurde kein Flächenbedarf bestimmt: Fettsäuren, Calciumcarbonat (Futterkalk), Natriumchlorid, Calcium-Natrium-Phosphat, Säurenmix, Lysin HCl, DL-Methionin, L-Threonin und Vitamin-Mineralstoff-Gemisch.

Tabelle 6
Flächenbedarf und Allokationsfaktoren für Futtermittel

Futtermittel	Futterpflanze	Typ *	Flächenbedarf $a_{FM,j}$ ha (Mg FM) ⁻¹	Allokation ha ha ⁻¹
Winterweizen		FP	0,138	
Wintergerste		FP	0,157	
Sommergerste		FP	0,210	
Winterroggen		FP	0,186	
Triticale		FP	0,176	
Hafer		FP	0,229	
Mais		FP	0,106	
Leinsamen		FP	0,687	
Soja		FP	0,357	
Weizenkleie	Winterweizen	KP	0,609	0,269
Weizenmehl	Winterweizen	KP	0,184	0,731
Malzkeime	Sommergerste	NP	4,785	0,011
Maismehl	Mais	FP	0,106	1,000
Maiskleberfutter	Mais	NP	0,514	0,198
Sojaextraktions-schrot	Soja	KP	0,458	0,656

Fortsetzung Tabelle 6, siehe nächste Spalte

Sojabohnen getoastet	Soja	FP	0,357	1,000
Sojaöl	Soja	KP	1,880	0,344
Rapsextraktions-schrot	Raps	KP	0,470	0,398
Melasse	Zuckerrübe	KP	2,644	0,026
DDGS	Weizen (WW)	NP	0,366	0,378
Vinasse	Zuckerrübe	NP	5,037	0,013
Brotmehl getoastet	Weizen (WW)	NP	0,376	0,384

* FP: Futterpflanze bzw. deren Samen direkt als Futtermittel verwertbar; KP: Koppelprodukt; NP: Nebenprodukt.

2.4.4 Mineralische Futtermittel

Die in den Tabellen 1 bis 4 aufgeführten Futter enthalten Futterkalk und Phosphate als mineralische Bestandteile, deren Bereitstellung mit Emissionen verbunden ist.

Futterkalk: Die Bereitstellung von Kalk als Futterkalk unterscheidet sich nicht wesentlich von der von Düngekalk. Zu den Rechenverfahren siehe Kapitel 2.4.5.2.

Phosphate: Doppelsuperphosphat enthält als wesentlichen Phosphat-Anteil Mono-Calcium-Phosphat (Ca(H₂PO₄)₂) (Ullmann, 1951 bis 1969, Bd.6, S. 142). Bei der Anwendung als Dünger- oder Futterphosphat entstehen keine gasförmigen Emissionen.

2.4.5 Dünger-, Kalk- und Wasserbedarf im Pflanzenbau

2.4.5.1 N-Dünger

Grundannahme ist eine ordnungsgemäße N-Düngung nach den Vorgaben der Düngeverordnung (DüV), bei der die N-Bilanz allerdings nicht geschlossen ist (Abbildung 4).

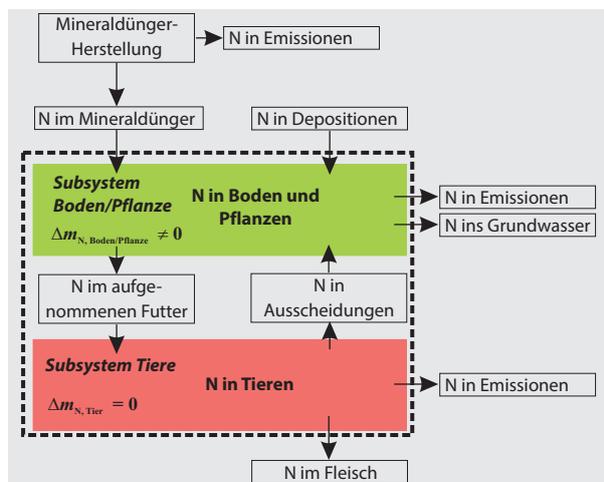


Abbildung 4
N-Umsätze bei der Fleischerzeugung

Für jede Futterpflanze j wird der Flächenbedarf berechnet und mit dem jeweiligen N-Bedarf je Fläche multipliziert.

Dieser N-Bedarf ergibt sich aus dem Ertrag nach KTBL (2014) und dem Düngevorschlag der DüV (LWK-Nds, 2013) unter Berücksichtigung der dort angeführten Korrektur. Die Mengen für jede Futterpflanze werden addiert und ergeben den Gesamt-N-Bedarf für den Pflanzenbau je Tier.

Im Prinzip muss der N-Bedarf dann durch Wirtschaftsdünger, Mineraldünger und atmosphärische Deposition gedeckt werden. In einer sog. ordnungsgemäßen Landwirtschaft wird die Deposition nicht berücksichtigt. Außerdem ist es Praxis, die Wirksamkeit des Wirtschaftsdünger-N mit sog. Mineraldüngeräquivalenten zu berücksichtigen.

Berechnung des Mineraldünger-N-Bedarfs: Mit Mineraldünger wird die Bilanz ausgeglichen (Abbildung 4):

$$F_{\text{fert},k} = R_{N,k} - F_{\text{man},k} \cdot f_{\text{mfe}} \quad (5)$$

mit

$F_{\text{fert},k}$ Mineraldünger-N-Bedarf (Futterpflanzenbau) für ein Tier k (in kg Tier^{-1})

$R_{N,k}$ Gesamt-N-Bedarf beim Anbau der Futterpflanzen (in kg Tier^{-1})

$F_{\text{man},k}$ N-Eintrag mit dem Wirtschaftsdünger eines Tieres k (in kg Tier^{-1})

f_{mfe} Mineraldünger-Äquivalent-Faktor (in kg kg^{-1})

Als Faktor f_{mfe} wird für Schweinegülle ein Wert von $0,70 \text{ kg kg}^{-1}$, für Geflügelkot² ein solcher von $0,50 \text{ kg kg}^{-1}$ verwendet (LWK-Nds, 2013).

Die Menge des vom Tier ausgeschiedenen und in das Pflanzenbausystem gelangenden N aus dem Wirtschaftsdünger wird aus der N-Ausscheidung des betrachteten Tieres und den Emissionen während des Managements der entsprechenden Menge an Wirtschaftsdünger berechnet. Für die gewählte Kombination von Lager, Ausbringung und Einarbeitung errechnet sich $EF_{\text{NH}_3\text{-N},k}$ zu $0,357 \text{ kg kg}^{-1}$ (Gleichung 6).

$$F_{\text{man},k} = m_{\text{excr},k} - (m_{\text{urine},k} \cdot EF_{\text{NH}_3\text{-N},k}) \quad (6)$$

mit

$F_{\text{man},k}$ N-Eintrag mit dem Wirtschaftsdünger eines Tieres k (in kg Tier^{-1})

$m_{\text{excr},k}$ Gesamt-N-Ausscheidung eines Tieres k mit Kot und Harn (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ N}$)

$m_{\text{urine},k}$ N-Ausscheidung eines Tieres k mit Harn³ (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ N}$)

$EF_{\text{NH}_3\text{-N},k}$ Emissionsfaktor für $\text{NH}_3\text{-N}$ für das gegebene Wirtschaftsdüngermanagement ($EF_{\text{NH}_3\text{-N},k} = 0,357 \text{ kg kg}^{-1}$)

Da alle Angaben für den Pflanzenbau (Diesel, Wasserbedarf) in KTBL (2014) für Kalkammonsalpeter (KAS) als N-Dünger gemacht werden, wird für die hier durchgeführten Rechnungen ausschließlich KAS verwendet.

Aus dem Mineraldüngerbedarf der Pflanze berechnet sich die Menge der Mineraldünger-N-Gabe unter Berücksichtigung der zu erwartenden Emissionen gemäß

$$F_{\text{fert,corr}} = F_{\text{fert}} + (1 + EF_{\text{NH}_3\text{-N}} + EF_{\text{NO-N}} + EF_{\text{N}_2\text{O-N}} + EF_{\text{N}_2}) \quad (7)$$

mit

$F_{\text{fert,corr}}$ emissionskorrigierte Mineraldüngergabe (hier KAS) (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ N}$)

F_{fert} Mineraldüngerbedarf (hier KAS) (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ N}$)

$EF_{\text{NH}_3\text{-N}}$ Emissionsfaktor für NH_3 aus KAS-Anwendung ($EF_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0,022 \text{ kg kg}^{-1}$)

$EF_{\text{NO-N}}$ Emissionsfaktor für NO aus Mineraldüngeranwendung ($EF_{\text{NO-N}} = 0,012 \text{ kg kg}^{-1}$)

$EF_{\text{N}_2\text{O-N}}$ Emissionsfaktor für N_2O aus Mineraldüngeranwendung ($EF_{\text{N}_2\text{O-N}} = 0,01 \text{ kg kg}^{-1}$)

EF_{N_2} Emissionsfaktor für N_2 aus Mineraldüngeranwendung ($EF_{\text{N}_2} = 0,07 \text{ kg kg}^{-1}$)

Die **Emissionen aus der Mineraldüngeranwendung** werden gemäß den Gleichungen (8) berechnet:

$$E_{\text{NH}_3, \text{CAN}} = F_{\text{fert,corr}} \cdot EF_{\text{NH}_3, \text{CAN}} \cdot \frac{M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{N}}} \quad (8a)$$

$$E_{\text{NO}, \text{CAN}} = F_{\text{fert,corr}} \cdot EF_{\text{NO}, \text{CAN}} \cdot \frac{M_{\text{NO}}}{M_{\text{N}}} \quad (8b)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{CAN}} = F_{\text{fert,corr}} \cdot EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{CAN}} \cdot \frac{M_{\text{N}_2\text{O}}}{M_{\text{N}_2}} \quad (8c)$$

mit

$E_{\text{NH}_3, \text{CAN}}$ NH_3 -Emissionen aus der KAS-Anwendung⁴ (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ NH}_3$)

$F_{\text{fert,corr}}$ emissionskorrigierte Mineraldüngergabe (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ N}$)

$EF_{\text{NH}_3\text{-N}}$ Emissionsfaktor für NH_3 aus KAS-Anwendung ($EF_{\text{NH}_3\text{-N}} = 0,022 \text{ kg kg}^{-1}$)

M_{NH_3} Molmasse von NH_3 ($M_{\text{NH}_3} = 17 \text{ kg kmol}^{-1}$)

M_{N} Molmasse von N ($M_{\text{N}} = 14 \text{ kg kmol}^{-1}$)

$E_{\text{NO}, \text{CAN}}$ NO-Emissionen aus der KAS-Anwendung (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ NO}$)

$EF_{\text{NO-N}}$ Emissionsfaktor für NO aus KAS-Anwendung ($EF_{\text{NO-N}} = 0,012 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$)

M_{NO} Molmasse von NO ($M_{\text{NO}} = 30 \text{ kg kmol}^{-1}$)

$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{CAN}}$ N_2O -Emissionen aus der KAS-Anwendung (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ N}_2\text{O}$)

$EF_{\text{N}_2\text{O-N}}$ Emissionsfaktor für N_2O aus KAS-Anwendung ($EF_{\text{N}_2\text{O-N}} = 0,01 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$)

$M_{\text{N}_2\text{O}}$ Molmasse von N_2O ($M_{\text{N}_2\text{O}} = 44 \text{ kg kmol}^{-1}$)

M_{N_2} Molmasse von N_2 ($M_{\text{N}_2} = 28 \text{ kg kmol}^{-1}$)

Die Emissionsfaktoren für NH_3 und NO sind EMEP (2013) entnommen, der für N_2O entspricht IPCC (2006c). Zur Ableitung des Emissionsfaktors für N_2 siehe Haenel et al. (2016).

² Die Annahme gilt auch für das in der Praxis bei der Broilermast anfallende Einstreu-Kot-Gemisch.

³ Als TAN (total ammoniacal nitrogen) wird das mit dem Harn ausgeschiedene N bei Säugetieren bezeichnet.

⁴ CAN: calcium ammonium nitrate (KAS)

2.4.5.2 Düngekalk

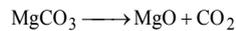
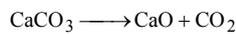
Mengen: Nach KTBL (2014) werden ohne Berücksichtigung der einzelnen Futterpflanze in 3 Jahren 3 Mg ha⁻¹ Kalk gegeben. Die Kalkmenge für die angebauten Futterpflanzen je Tier berechnet sich dann zu:

$$F_{\text{lime},k} = A_k \cdot m_{\text{lime}} \quad (9)$$

mit

$F_{\text{lime},k}$ benötigte Kalkmenge (in kg Tier⁻¹)
 A_k Anbaufläche für alle Futterpflanzen je Tier k (ha Tier⁻¹)
 m_{lime} jährlich aufgebrauchte Kalkmenge
 ($m_{\text{lime}} = 1 \cdot 10^3 \text{ kg ha}^{-1}$)

CO₂-Emissionen: Düngekalk ist normalerweise ein festes Gemisch aus Calcit (CaCO₃) und Magnesit (MgCO₃) mit wechselnden Magnesit-Anteilen. Im Boden setzen beide Stoffe langsam CO₂ frei:



Die CO₂-Emissionen aus dem Düngekalk für jede Futterpflanze j werden gemäß Gleichung (10) berechnet.

$$E_{\text{CO}_2, \text{lime}, j} = F_{\text{lime}, j} \cdot EF_{\text{CO}_2, \text{lime}} \quad (10)$$

mit

$E_{\text{CO}_2, \text{lime}, j}$ CO₂-Emissionen aus der Kalkanwendung für eine Futterpflanze j (in kg Tier⁻¹)
 $F_{\text{lime}, j}$ benötigte Kalkmenge für eine Futterpflanze j (in kg Tier⁻¹)
 $EF_{\text{CO}_2, \text{lime}}$ Emissionsfaktor für CO₂ aus Kalk
 ($EF_{\text{CO}_2, \text{lime}} = 0,38 \text{ kg kg}^{-1}$)

Den Emissionsfaktor für handelsübliche Qualitäten ermittelten Dämmgen et al. (2016).

2.4.5.3 Kalkammonsalpeter

KAS enthält neben 0,27 kg kg⁻¹ N 0,24 kg kg⁻¹ Kalk, der ebenso abgebaut wird wie Düngekalk. KAS-Gaben werden in der Regel als N-Gaben deklariert. Die CO₂-Emissionen berechnen sich dann zu

$$E_{\text{CO}_2, \text{CAN}} = F_{\text{N}, \text{CAN}} \cdot \frac{x_{\text{lime}, \text{CAN}}}{x_{\text{N}, \text{CAN}}} \cdot EF_{\text{CO}_2, \text{lime}} \quad (11)$$

mit

$E_{\text{CO}_2, \text{CAN}}$ CO₂-Emissionen aus KAS (in kg Tier⁻¹ CO₂)
 $F_{\text{N}, \text{CAN}}$ eingesetzte Düngermenge als KAS-N (in kg Tier⁻¹ N)
 $x_{\text{lime}, \text{CAN}}$ Kalk-Gehalt von KAS ($x_{\text{lime}, \text{CAN}} = 0,24 \text{ kg kg}^{-1}$)
 $x_{\text{N}, \text{KAS}}$ N-Gehalt von KAS ($x_{\text{N}, \text{KAS}} = 0,27 \text{ kg kg}^{-1}$)
 $EF_{\text{CO}_2, \text{lime}}$ CO₂-Emissionsfaktor für Kalk ($EF_{\text{CO}_2, \text{lime}} = 0,38 \text{ kg kg}^{-1}$)

2.4.5.4 Wasserbedarf im Pflanzenbau

Der Wasserbedarf geht ausschließlich auf die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zurück. Die Daten sind aus KTBL (2014) übernommen und in Tabelle 5 zusammengefasst.

Für den Sojaanbau wird aufgrund der in Gehring (2014) beschriebenen Versuche eine einmalige Pflanzenschutzmaßnahme mit einer Wassermenge von 300 l ha⁻¹ angesetzt.

Die bei der Bereitstellung von Wasser entstehenden Emissionen werden in Kapitel 2.4.8 näher beschrieben.

2.4.6 Maschineneinsatz und Energiebedarf

Beim Betrieb der Maschinen und der Bereitstellung der benötigten Energie entstehen Emissionen.

Die für die Berechnung benötigten Daten wurden für Lein Graf et al. (2005), für Soja BioGrace (2012) und alle weiteren KTBL (2014) entnommen (Tabelle 5),

2.4.7 Berechnung der Emissionen aus der Pflanzenproduktion – erweiterter Ansatz

Als Emissionen aus dem Pflanzenbau gelten bei der Klimarahmenkonvention die beim Anbau entstehenden Gase N₂O und CO₂. Berücksichtigt werden die Emissionen als Folge des Einsatzes von N-haltigen Düngemitteln und von Kalk (einschließlich KAS). Für die Berechnung der Emissionen der Treibhausgase N₂O und CO₂ sind die Regelwerke von IPCC (2006b) heranzuziehen (siehe Kapitel 2.4.5.1).

Die Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoffen oder aus der Bereitstellung von Wasser gelten dort nicht als Emissionen aus der Pflanzenproduktion. In dieser Arbeit sind sie – im Rahmen einer möglichst vollständigen Stoffflussanalyse – der hier untersuchten Tierproduktion zugeschlagen.

2.4.7.1 N₂O-Emissionen aus Ernterückständen

Nach Vorgaben von IPCC (2006c) werden für jede Pflanze aus ober- und unterirdischen Ernterückständen die Emissionen je ha berechnet (Gleichung 12). Hierzu wurde das Emissionsmodell GAS-EM (vgl. Haenel et al., 2016) verwendet. Die für die Berechnungen benötigten Variablen sind in Tabelle 7 zusammengestellt, die Erträge der Futterpflanzen sind in Tabelle 5 zu finden.

$$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{CR}} = EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{CR}} \cdot F_{\text{CR}} \cdot \gamma_{\text{N}_2\text{O}} \quad (12)$$

mit

$E_{\text{N}_2\text{O}, \text{CR}}$ N₂O-Emissionen aus Ernterückständen (in kg Tier⁻¹ N₂O)
 $EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{CR}}$ N₂O-Emissionsfaktor für Mineräldünger ($EF_{\text{N}_2\text{O}, \text{CR}} = 0,01 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}_2\text{O-N}$)
 F_{CR} N-Menge in Ernterückständen (in kg Tier⁻¹ N)
 $\gamma_{\text{N}_2\text{O}}$ stöchiometrischer Umrechnungsfaktor ($\gamma_{\text{N}_2\text{O}} = 44/28 \text{ kg kg}^{-1} \text{ kmol kmol}^{-1}$)

$$F_{\text{CR}} = \sum_j A_j \cdot x_{\text{renew}, j} \cdot x_{\text{mov}, j} \cdot Y_j \cdot \left(x_{\text{Y}, \text{DM}, j} + a_{\text{above}, j} \cdot x_{\text{DM}, \text{above}, j} \right) \cdot a_{\text{below}} \cdot x_{\text{N}, \text{below}} \quad (13)$$

mit

F_{CR} N-Menge in Ernterückständen (in kg Tier⁻¹ N)
 A_j Anbaufläche einer Futterpflanze j (in ha Tier⁻¹)

Tabelle 7

Variablen zur Berechnung von N₂O-Emissionen aus Ernterückständen

	x_{renew} ha ha ⁻¹	x_{mow}	$x_{Y, DM, j}$ kg kg ⁻¹	$x_{AGR, DM, j}$ kg kg ⁻¹	a_{above} kg kg ⁻¹	$x_{N, \text{above}}$ kg kg ⁻¹ N	a_{below} kg kg ⁻¹	$x_{N, \text{below}}$ kg kg ⁻¹ N
Gerste	1	1	0,86	0,86	0,7	0,0050	0,22	0,014
Hafer	1	1	0,86	0,86	1,1	0,0050	0,25	0,008
Mais (Körner)	1	1	0,86	0,86	1,0	0,0038	0,22	0,007
Triticale	1	1	0,86	0,86	0,9	0,0050	0,22	0,008
Weizen	1	1	0,86	0,86	0,8	0,0050	0,23	0,009
Lein	1	1	0,91	0,86	1,5	0,0053	0,22	0,010
Raps	1	1	0,91	0,86	1,7	0,0070	0,22	0,010
Zuckerrüben	1	1	0,23	0,18	0,7	0,0040	0,20	0,014

$x_{\text{renew}, j}$ Anteil der Futterpflanze j, der jährlich geerntet wird (in ha ha⁻¹)
 $x_{\text{mow}, j}$ 1 / Anzahl der Ernten einer Pflanze j in einem Jahr (dimensionslos)
 Y_j Ertrag einer Futterpflanze j (Frischmasse) (in kg ha⁻¹)
 $x_{Y, DM, j}$ Trockenmassegehalt der Futterpflanze j (in kg kg⁻¹)
 $a_{\text{above}, j}$ oberirdischer Anteil der Ernterückstände einer Pflanze j bezogen auf den Ertrag (in kg kg⁻¹)
 $x_{DM, \text{above}, j}$ Trockenmassegehalt der oberirdischen Teile der Futterpflanze j (in kg kg⁻¹)
 $a_{\text{below}, j}$ unterirdischer Anteil der Ernterückstände einer Pflanze j bezogen auf den Ertrag (in kg kg⁻¹)
 $x_{N, \text{below}, j}$ N-Gehalt der unterirdischen Ernterückstände von j, bezogen auf Trockenmasse (in kg kg⁻¹ N)

$EF_{\text{CO}_2, \text{DF}}$ CO₂-Emissionsfaktor für die Verbrennung von Dieseldieselkraftstoff ($EF_{\text{CO}_2, \text{DF}} = 74,1 \text{ kg GJ}^{-1}$)
 A_j Anbaufläche einer Futterpflanze j (in ha Tier⁻¹)
 $V_{\text{DF}, j}$ flächenbezogener Kraftstoffverbrauch beim Anbau einer Futterpflanze j (in l ha⁻¹)
 ρ_{DF} Dichte des Kraftstoffs ($\rho_{\text{DF}} = 0,83 \text{ kg l}^{-1}$)
 $\eta_{E, \text{DF}}$ Energiegehalt des Kraftstoffs („Heizwert“) ($\eta_{E, \text{DF}} = 35,73 \text{ MJ l}^{-1}$)
 β Umrechnungsfaktor für Energieeinheiten ($\beta = 0,001 \text{ GJ MJ}^{-1}$)

2.4.7.2 Emissionen aus dem Verbrennen von Kraftstoffen in Wärmekraftmaschinen

Der Produktion einzelner Futterpflanzen sind Verbrauchszahlen für Dieseldieselkraftstoff (DF) in Wärmekraftmaschinen zugeordnet (Tabelle 5). Dieseldieselkraftstoff (Heizöl) wird darüber hinaus bei der bergmännischen Förderung von Kalk und der Trocknung von Ölsaaten eingesetzt. Für den Dieseldieselverbrauch werden nach IPCC (2006a) die Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O berechnet. EMEP (2013) beschreibt darüber hinaus die Verfahren zu Berechnung der Emissionen von NH₃ und NO_x.

2.4.7.2.1 Kohlenstoffdioxid

Die CO₂-Emissionen werden mit Hilfe der Beziehungen (14) und (15) bestimmt:

$$E_{\text{CO}_2, \text{DF}} = \sum E_{\text{CO}_2, \text{DF}, j} \quad (14)$$

$$E_{\text{CO}_2, \text{DF}, j} = EF_{\text{CO}_2, \text{DF}} \cdot A_j \cdot V_{\text{DF}, j} \cdot \eta_{E, \text{DF}} \cdot \rho_{\text{DF}} \cdot \beta \quad (15)$$

mit

$E_{\text{CO}_2, \text{DF}}$ CO₂-Emissionen aus Kraftstoffverbrennung (in kg Tier⁻¹ CO₂)

$E_{\text{CO}_2, \text{DF}, j}$ CO₂-Emissionen aus Kraftstoffverbrennung bei der Produktion einer Futterpflanze j (in kg Tier⁻¹ CO₂)

2.4.7.2.2 Ammoniak und Stickstoffoxide

Die Emissionsfaktoren für NH₃ und NO_x werden in EMEP (2013) in Abhängigkeit vom Stand der Technik angegeben. Diese Arbeit verwendet Emissionsfaktoren für Stage IIIA entsprechend den Vorgaben der EU (EU, 2004).

$$E_{\text{NH}_3\text{-N}, \text{DF}} = \sum M_{\text{DF}, j} \cdot EF_{\text{NH}_3, \text{DF}} \cdot \gamma_{\text{NH}_3} \quad (16)$$

$$E_{\text{NO}_x\text{-N}, \text{DF}} = \sum M_{\text{DF}, j} \cdot EF_{\text{NO}_x\text{-N}, \text{DF}} \cdot \gamma_{\text{NO}_2} \quad (17)$$

mit

$E_{\text{NH}_3\text{-N}, \text{DF}}$ NH₃-N-Emission aus der Verbrennung von Dieseldieselkraftstoff (in kg Tier⁻¹)

$M_{\text{DF}, j}$ Masse des für die Produktion des Futtermittels j benötigten Dieseldieselkraftstoffs (in kg ha⁻¹)

$EF_{\text{NH}_3, \text{DF}}$ NH₃-Emissionsfaktor für die Verbrennung von Dieseldieselkraftstoff ($EF_{\text{NH}_3, \text{DF}} = 8 \text{ g Mg}^{-1}$)

γ_{NH_3} stöchiometrischer Faktor für die Berechnung von NH₃-N-Emissionen ($\gamma_{\text{NH}_3} = 14/17 \text{ kg kg}^{-1} \text{ kmol kmol}^{-1}$)

$E_{\text{NO}_x\text{-N}, \text{DF}}$ NO_x-N-Emission aus der Verbrennung von Dieseldieselkraftstoff (in kg Tier⁻¹ N)

$EF_{\text{NO}_x, \text{DF}}$ NO_x-Emissionsfaktor für die Verbrennung von DF ($EF_{\text{NO}_x, \text{DF}} = 13594 \text{ g Mg}^{-1}$)

γ_{NO_2} stöchiometrischer Faktor für die Berechnung von NO₂-N-Emissionen ($\gamma_{\text{NO}_2} = 46/14 \text{ kg kg}^{-1} \text{ kmol kmol}^{-1}$)

2.4.8 Bereitstellung von Wasser

Der Wasserbedarf setzt sich aus Tränkwasser und Prozesswasser in der Tierhaltung sowie Wasser in der

Pflanzenproduktion zusammen. Der Mischfutterherstellung (Mühle) wird in diesen Rechnungen kein zusätzlicher Wasserverbrauch zugeordnet.

Die Menge an Tränkwasser berechnet sich zu:

$$M_{Wd, fp} = M_{feed, fp} \cdot f_{Wd, fp} \quad (18a)$$

$$M_{Wd, br} = M_{feed, br} \cdot f_{Wd, br} \quad (18b)$$

mit

$M_{Wd, fp}$	Tränkwassermenge für Mastschweine (in l Tier ⁻¹)
$M_{feed, fp}$	Futtermenge für Mastschweine (in kg Tier ⁻¹)
$f_{Wd, fp}$	Tränkwassermenge je Einheit der Futtermenge (Mastschweine) ($f_{Wd, fp} = 3,0 \text{ l kg}^{-1}$; KTBL, 2014, S. 707)
$M_{Wd, br}$	Tränkwassermenge für Broiler (in l Gruppe ⁻¹)
$M_{Ffeed, br}$	Futtermenge für Broiler (in kg Gruppe ⁻¹)
$f_{Wd, br}$	Tränkwassermenge je Einheit der Futtermenge (Broiler) ($f_{Wd, br} = 1,7 \text{ l kg}^{-1}$; Berk, 2008)

Als Prozesswasserbedarf für Mastschweine gibt KTBL (2014, S. 709) 140 l Platz⁻¹ a⁻¹ an. Für den Versuch wird mit einem Drittel (3 Tiere pro Platz und Jahr) gerechnet, also 46,7 l Tier⁻¹.

Für Broiler werden in KTBL (2014, S. 745) 0,05 m³ je 100 Tiere entsprechend 5 l Gruppe⁻¹ bei 10 Tieren pro Gruppe angegeben.

Die im Pflanzenbau in Pflanzenschutzmaßnahmen eingesetzten Wassermengen (nach KTBL, 2014) sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die Berechnungen gehen davon aus, dass jeweils Trinkwasser aus dem öffentlichen Netz eingesetzt wird. Nach ATT et al. (2011) sind für die Bereitstellung von 1 m³ Trinkwasser in Deutschland durchschnittlich 0,51 kWh erforderlich.

2.4.9 Klimatisierung von Broilerställen

Mastställe für Broiler werden auf Temperaturen von 26 °C (Woche 1 und 2) bzw. 22 bis 24 °C (Folgewochen) gehalten. Sie werden darüber hinaus zwangsbelüftet und etwa 20 h d⁻¹ beleuchtet. KTBL (2014), S. 745, gibt hierfür einen Bedarf an elektrischer Energie von 97,2 kWh für 100 Tiere an. Hier werden entsprechend 9,72 kWh Gruppe⁻¹ angesetzt.

2.4.10 Energiebedarf der Futterförderung im Stall

Zum Futtertransport innerhalb der Ställe werden Rohrförderer mit Förderketten (Schweine) bzw. Spiralen (Broiler) eingesetzt. Der Energiebedarf berechnet sich zu:

$$W_{feedconv, fp} = M_{feed, fp} \cdot f_{feedconv, fp} \quad (19a)$$

$$W_{feedconv, br} = M_{feed, br} \cdot f_{feedconv, br} \quad (19b)$$

mit

$W_{feedconv, fp}$	Energiebedarf zur Futterförderung für Schweine (in kWh Tier ⁻¹)
$M_{feed, fp}$	Futtermenge für Schweine (in kg Tier ⁻¹)
$f_{feedconv, fp}$	Energiebedarf je Einheit der Futtermenge (Schweine) ($f_{feedconv, fp} = 1,00 \cdot 10^{-3} \text{ kWh kg}^{-1}$; Big Dutchman, 2010)

und

$W_{feedconv, br}$	Energiebedarf zur Futterförderung für Broiler (in kWh Gruppe ⁻¹)
$M_{feed, br}$	Futtermenge für Broiler (in kg Gruppe ⁻¹)
$f_{feedconv, br}$	Energiebedarf je Einheit der Futtermenge (Broiler) ($f_{Ff, br} = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ kWh kg}^{-1}$; Big Dutchman, 2001)

2.5 Emissionen aus dem Vorleistungsbereich – Bereitstellung von Düngekalk und Mineraldüngerherstellung

2.5.1 Kalk

Das bergmännische Gewinnen von Kalk im Steinbruch, das Brechen, Mahlen und Klassieren erfordert einen erheblichen Energieaufwand, der mit THG-Emissionen verbunden ist. Scholz et al. (1994) bilanzieren, dass im Mittel 0,032 GJ Mg⁻¹ als Dieselkraftstoff, 0,007 GJ Mg⁻¹ im Sprengstoff und 192 MJ Mg⁻¹ als elektrische Energie für Brechen, Grobklassieren und Mahltrocknen benötigt werden.⁵

2.5.2 Kalkammonsalpeter

KAS wird aus fein vermahlenem Kalkstein gewonnen, der in eine NH₄NO₃-Schmelze eingetragen wird. Das Produkt enthält etwa 27 % N und 24 % Kalk. Angaben zu Emissionen fehlen hier. Die Berechnung der Emissionen von Gasen und Staubinhaltsstoffen aus der KAS-Herstellung erfordert viele Schritte, deren Einzelheiten in Anhang 2 dargestellt sind. Die dort ermittelten Emissionsfaktoren sind:

$$f_{NH_3} = 0,065 \text{ kg kg}^{-1} \text{ NH}_3 \text{ bezogen auf die KAS-N-Gabe (in kg Tier}^{-1} \text{ N)}$$

$$f_{THG} = 1,00 \text{ kg kg}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq, bezogen auf die KAS-N-Gabe (in kg Tier}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq)}$$

2.5.3 Phosphatdünger

Phosphatrohstoffe sind überwiegend unlösliche Ca-Phosphate, die vor ihrer Verwendung als Dünger aufwändig aufgeschlossen werden müssen. Brentrup und Pallière (2008) geben THG-Emissionsfaktoren für Triple Superphosphate (deutsch: Doppelsuperphosphat) an. Es erscheint gerechtfertigt, den THG-Emissionsfaktor von 0,27 kg kg⁻¹ CO₂-eq für alle Futterphosphate zu verwenden.

2.6 Herstellung von Mischfuttermitteln

Der auf die Futtermenge bezogene spezifische Energieeinsatz je Arbeitsvorgang (außer Grob-Schroten) wurde vom Projektpartner IFF experimentell ermittelt. Der Datensatz war bei den Schweinemastversuchen unvollständig. IFF empfahl, für die fehlenden Daten des Endmastfutters im Versuch 1 die Mittelwerte aus den Anfangsmast- und Mittelmastdaten einzusetzen, für die des Anfangsmastfutters des

⁵ Scholz et al. (1994) machen keine Angabe zur Körnung, sondern sprechen lediglich von Steinmehl/-grieß.

Versuchs 2 die Mittelwerte aus den entsprechenden Mittelmast- und Endmastwerten.

Für die erste Verarbeitungsstufe, das Grob-Schroten, werden einheitlich 5 kWh Mg⁻¹ angesetzt (Expertenurteil Kleine Klausung). Die verwendeten Werte sind in den Tabellen 8.1 bis 8.3 zusammengestellt.

Die Emissionen bei der Bereitstellung elektrischer Energie für die Mischfutterherstellung werden in Kapitel 2.7.1 behandelt.

Tabelle 8.1

Energieeinsatz von elektrischer Energie bei der Mischfutterherstellung – Mastschweinefutter. Versuch 1

Futter	Einheit	Arbeitsvorgang					Summe
		Schroten	Hammermühle	Walzenstuhl	Pelletpresse	Expander	
Versuch 1, AM							
GM	kWh kg ⁻¹	0,005					0,0050
GP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,018		0,0230
GEx	kWh kg ⁻¹	0,005				0,034	0,0390
GExP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,015	0,037	0,0570
FM	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0097				0,0147
FP	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0097		0,018		0,0327
FEx	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0097			0,031	0,0457
FExP	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0097		0,017	0,036	0,0677
Versuch 1, MM							
GM	kWh kg ⁻¹	0,005					0,0050
GP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,021		0,0260
GEx	kWh kg ⁻¹	0,005				0,036	0,0410
GExP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,021	0,037	0,0630
FM	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0064				0,0114
FP	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0064		0,022		0,0334
Fex	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0064			0,038	0,0494
FExP	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0064		0,022	0,037	0,0704
Versuch 1, EM							
GM	kWh kg ⁻¹	0,005					0,0050
GP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,0195		0,0245
GEx	kWh kg ⁻¹	0,005				0,0350	0,0400
GExP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,0180	0,0370	0,0600
FM	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0081				0,0131
FP	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0081		0,0200		0,0331
Fex	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0081			0,0345	0,0476
FExP	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0081		0,0195	0,0365	0,0691

Tabelle 8.2

Einsatz von elektrischer Energie bei der Mischfutterherstellung – Mastschweinefutter. Versuch 2

Futter	Einheit	Arbeitsvorgang					Summe
		Schroten	Hammermühle	Walzenstuhl	Pelletpresse	Expander	
Versuch 2, AM							
GM_kon	kWh kg ⁻¹	0,005		0,00235			0,0074
GM_heim	kWh kg ⁻¹	0,005		0,00285			0,0080
GP_kon	kWh kg ⁻¹	0,005	0,00625		0,0235		0,0348
GP_heim	kWh kg ⁻¹	0,005	0,00575		0,0235		0,0343
Versuch 2, MM							
GM_kon	kWh kg ⁻¹	0,005		0,0023			0,0073
GM_heim	kWh kg ⁻¹	0,005		0,0030			0,0080
GP_kon	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0059		0,023		0,0339
GP_heim	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0050		0,024		0,0340
Versuch 2, EM							
GM_kon	kWh kg ⁻¹	0,005		0,0024			0,0074
GM_heim	kWh kg ⁻¹	0,005		0,0029			0,0079
GP_kon	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0066		0,024		0,0356
GP_heim	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0065		0,023		0,0345

Tabelle 8.3

Einsatz von elektrischer Energie bei der Mischfutterherstellung – Broilerfutter. Versuche 1 und 2

Futter	Einheit	Arbeitsvorgang					Summe
		Schroten	Hammermühle	Walzenstuhl	Pelletpresse	Expander	
Versuch 1							
GM	kWh kg ⁻¹	0,005					0,0050
GP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,019		0,0240
GExP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,012	0,034	0,0050
FM	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0051				0,0101
FP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,013		0,0180
FExP	kWh kg ⁻¹	0,005			0,015	0,030	0,0101
Versuch 2							
GExP_kon	kWh kg ⁻¹	0,005		0,0194			0,0069
FP_kon	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0058		0,014	0,043	0,0678
GExP_heim	kWh kg ⁻¹	0,005					0,0050
FP_heim	kWh kg ⁻¹	0,005	0,0048		0,016	0,043	0,0688

2.7 Emissionen aus der Bereitstellung von Energieträgern

2.7.1 Elektrische Energie

Icha (2014) hat für das Umweltbundesamt die CO₂-Äquivalente für die Bereitstellung elektrischer Energie im

bundesdeutschen Energiemix berechnet. Für den Inlandsverbrauch wurde dabei ein Wert von $0,595 \text{ kg kWh}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq}$ ermittelt.

2.7.2 CO_2 -Äquivalente für die Bereitstellung von Dieselkraftstoff

IFEU (2012) gibt für die energetische Vorkette von Dieselkraftstoff eine THG-Emission von $9944 \text{ kg TJ}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq}$ an. Bei einem Heizwert von $42,96 \text{ MJ (kg DF)}^{-1}$ ergibt sich ein Wert von $0,427 \text{ kg (kg Diesel)}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq}$ bzw. von $0,355 \text{ kg (l DF)}^{-1} \text{ CO}_2\text{-eq}$ bei einer Dichte von $0,832 \text{ kg l}^{-1}$.

2.8 Emissionen aus der Verdauung und dem Wirtschaftsdüngermanagement

2.8.1 Rechenmodelle

2.8.1.1 Mastschweine

Aus der Futterzusammensetzung werden die **CH_4 -Emissionen aus der Verdauung** wie in Kirchgeßner et al. (1991) und Kreuzer et al. (1991) berechnet (zur Auswahl und Begründung siehe Dämmgen et al., 2012a).

$$E_{\text{CH}_4,1} = b \cdot m_{\text{BFS},1} \quad (20)$$

mit

$E_{\text{CH}_4,1}$ CH_4 -Emissionsrate bei Verwendung eines Futters 1 (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ CH}_4$)

b Koeffizient ($b = 0,020 \text{ kg kg}^{-1} \text{ CH}_4$)

$m_{\text{BFS},1}$ zur Verfügung stehende biologisch fermentierbare Substanz (BFS) in einem Futter 1 (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

Die zur Verfügung stehende Menge an bakteriell fermentierbarer Substanz (BFS) wird nach Kirchgeßner et al. (2008, S. 169) mit Gleichung (21) berechnet.

$$m_{\text{BFS},1} = m_{\text{OM},1} \cdot x_{\text{D},\text{OM},1} - m_{\text{XP},1} \cdot x_{\text{D},\text{XP},1} - m_{\text{XF},1} \cdot x_{\text{D},\text{XF},1} - (m_{\text{st},1} + m_{\text{su},1}) \quad (21)$$

mit

$m_{\text{BFS},1}$ im Darm zur Verfügung stehende BFS-Menge im Futter 1 (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

$m_{\text{OM},1}$ Input an organischer Masse mit dem Futter 1 (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

$x_{\text{D},\text{OM},1}$ Verdaulichkeit für organische Substanz im Futter 1 (in kg kg^{-1})

$m_{\text{XP},1}$ Input von Rohprotein mit dem Futter 1 (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

$x_{\text{D},\text{XP},1}$ Verdaulichkeit von Rohprotein im Futter 1 (in kg kg^{-1})

$m_{\text{XF},1}$ Input von Rohfett mit dem Futter 1 (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

$x_{\text{D},\text{XF},1}$ Verdaulichkeit von Rohfett im Futter 1 (in kg kg^{-1})

$m_{\text{st},1}$ Input von Stärke mit dem Futter 1 (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

$m_{\text{su},1}$ Input von Zuckerstoffen mit dem Futter 1 (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

Die Berechnung der **CH_4 -Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement** setzt die Kenntnis der Ausscheidungen an organischer Masse (OM, volatile solids, VS) voraus.

Das von IPCC (2006c) vorgeschlagene Verfahren ist fehlerhaft. Verwendet wird das in Dämmgen et al. (2011) angegebene Verfahren (Gleichung 22).

$$E_{\text{CH}_4, \text{man}} = VS \cdot B_0 \cdot \rho_{\text{CH}_4} \cdot MCF \quad (22)$$

mit

$E_{\text{CH}_4, \text{man}}$ CH_4 -Emission aus dem Wirtschaftsdüngermanagement (in kg Tier^{-1})

VS Ausscheidung an organischer Masse (in $\text{kg Tier}^{-1} \text{ TM}$)

B_0 maximale CH_4 -Freisetzung (in $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ CH}_4$)

ρ_{CH_4} Dichte von Methan ($\rho_{\text{CH}_4} = 0,67 \text{ kg m}^{-3}$)

MCF systemabhängiger Methan-Umwandlungsfaktor (in kg kg^{-1})

Für ein gegebenes System vereinfacht sich die Gleichung zu

$$E_{\text{CH}_4, \text{man}} = VS \cdot f_{\text{CH}_4} \quad (23)$$

mit

f_{CH_4} Emissionsfaktor bezogen auf VS (in kg kg^{-1})

Für das in Kapitel 2.8.2.2 beschriebene Lager beträgt $f_{\text{CH}_4} = 0,051 \text{ kg kg}^{-1}$.

Die Berechnung der **NH_3 -, NO - und N_2O -Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement** setzt die Kenntnis der N- und TAN-Ausscheidungen⁶ voraus. Diese ergeben sich bei Schweinen aus den folgenden Massenbilanzen:

$$m_{\text{excr}, \text{fp}} = m_{\text{feed}, \text{fp}} \cdot x_{\text{N}, \text{feed}, \text{fp}} - \Delta w_{\text{fp}} \cdot x_{\text{N}, \text{ret}, \text{fp}} \quad (24a)$$

$$m_{\text{urine}, \text{fp}} = m_{\text{feed}, \text{fp}} \cdot x_{\text{N}, \text{feed}, \text{fp}} \cdot x_{\text{dig}, \text{N}, \text{fp}} - \Delta w_{\text{fp}} \cdot x_{\text{N}, \text{ret}, \text{fp}} \quad (24b)$$

mit

$m_{\text{excr}, \text{fp}}$ vom Mastschwein ausgeschiedene N-Menge (in kg Tier^{-1})

$m_{\text{feed}, \text{fp}}$ Masse des aufgenommenen Futters (in kg Tier^{-1})

$x_{\text{n}, \text{feed}, \text{fp}}$ N-Gehalt des Mastschweinfutters (in kg kg^{-1})

Δw_{fp} Lebendmassezunahme (in kg Tier^{-1})

$x_{\text{N}, \text{ret}, \text{fp}}$ N-Gehalt im Ganzkörper des Mastschweins (in kg kg^{-1})

$x_{\text{dig}, \text{N}, \text{fp}}$ Verdaulichkeit von N im Mastschweinfutter (in kg kg^{-1})

Als Rechenverfahren wurde für die N-Spezies aus dem Wirtschaftsdüngermanagement das für die Emissionsberichterstattung genutzten Modul PFP_V10 der Modellfamilie GAS-EM genutzt. Die aktuelle Zusammenfassung findet sich in Haenel et al. (2016).

⁶ Die N-Ausscheidungen insgesamt werden für die Berechnung der N_2O -, NO - und N_2 -Emissionen aus Stall und Lager und der N-Einträge in die Böden benötigt, die der TAN- bzw. UAN-Ausscheidungen werden zur Quantifizierung der NH_3 -Emissionen aus Stall, Lager und Ausbringung verwendet. (TAN: total ammoniacal nitrogen; UAN: urea ammoniacal nitrogen)

Die teilweise Umwandlung von VS in Stall und Lager führt zu **CH₄-Emissionen**.⁷ Zu deren Berechnung wurden deutsche und internationale experimentelle Datensätze in Dämmgen et al. (2012b) zusammengestellt und bewertet.

2.8.1.2 Broiler

Die bei der **Verdauung freigesetzten CH₄-Mengen** sind bei Geflügel sehr klein im Vergleich zu denen aus dem Lager.⁸ Es gibt kein anerkanntes Verfahren zur Berechnung dieser Emissionen. Eine Quantifizierung dieser Emissionen entfällt hier.

Die Berechnung der **CH₄-Emissionen aus Stall und Lager** erfolgt mit der gleichen Methode wie bei den Mastschweinen. VS-Ausscheidungen führen in Stall und Lager zu CH₄-Emissionen. Für deren Berechnung existiert kein nationales Verfahren. Das Stufe-2-(Tier 2)-Verfahren aus IPCC (2006c) wird verwendet. Für das in Kapitel 2.8.2.2.2 beschriebene Lager ist $f_{\text{CH}_4} = 0,00362 \text{ kg kg}^{-1}$.

Die Emissionen von **NH₃, NO und N₂O aus dem Wirtschaftsdünger** werden bei Geflügel aus den N- und Harnsäure-N (UAN)-Ausscheidungen berechnet. In den Broilerversuchen werden die N-Ausscheidungen experimentell ermittelt. Die UAN-Anteile (N aus Harnsäure) werden mit Hilfe des Verfahrens nach der Alpha-NH₂-N-Methode (Pahle et al., 1985). bestimmt. Die futterspezifischen relativen Ausscheidungen ergeben sich dann wie folgt:

$$f_{\text{N, excr, br}} = \frac{m_{\text{N, excr, br}}}{m_{\text{feed, br}} \cdot x_{\text{N, feed, br}}} \quad (25a)$$

$$f_{\text{UAN, excr, br}} = \frac{m_{\text{N, excr, br}} \cdot x_{\text{UAN, excr, br}}}{m_{\text{feed, br}} \cdot x_{\text{N, feed, br}}} \quad (25b)$$

$$f_{\text{N-faec, excr, br}} = f_{\text{N, excr, br}} - f_{\text{UAN, excr, br}} \quad (25c)$$

mit

- $f_{\text{N, excr, br}}$ Ausscheidungsfaktor für N bei Broilern (in kg kg⁻¹)
- $m_{\text{N, excr, br}}$ Masse des ausgeschiedenen N (in kg Tier⁻¹)
- $m_{\text{feed, br}}$ N-Aufnahme mit dem Futter (in kg Tier⁻¹)
- $x_{\text{N, feed, br}}$ N-Gehalt des Broilerfutters (in kg kg⁻¹)
- $f_{\text{UAN, excr, br}}$ Ausscheidungsfaktor für UAN bei Broilern (in kg kg⁻¹)
- $x_{\text{UAN, excr, br}}$ UAN-Anteil der N-Ausscheidungen (in kg kg⁻¹)
- $f_{\text{N-faec, excr, br}}$ Ausscheidungsfaktor für Kot-N bei Broilern (in kg kg⁻¹)

2.8.2 Daten der Tierhaltung

2.8.2.1 Futtereigenschaften

Die für die Rechnungen benötigten N-Gehalte und Verdaulichkeiten (Schweine) sowie die Faktoren für N und UAN

(Broiler) sind für die unterschiedlichen Futter in den Tabellen 9.1 bis 9.3 zusammengestellt.

Tabelle 9.1

Rohprotein- (XP) Gehalte, Verdaulichkeiten für Stickstoff (N) und Organische Substanz (OM) sowie Gehalt an bakteriell fermentierbarer Substanz (BFS) der in der Schweinemast verwendeten Futter, Versuch 1

Futter	Vermahlung und Konfektionierung	XP-Gehalt kg kg ⁻¹	Verdaulichkeit für N kg kg ⁻¹	Verdaulichkeit für OM kg kg ⁻¹	BFS-Gehalt kg kg ⁻¹
Versuch 1, Anfangsmast					
GM	grobes Mehl	0,1648	0,841	0,854	0,120
GP	grobe Pellets	0,1664	0,794	0,842	0,109
GEx	grob expandiert	0,1650	0,824	0,856	0,105
GExp	grob expandiert und pelletiert	0,1635	0,833	0,859	0,140
FM	feines Mehl	0,1646	0,836	0,858	0,117
FP	feine Pellets	0,1667	0,840	0,869	0,125
FEx	fein expandiert	0,1681	0,836	0,869	0,125
FExp	fein expandiert und pelletiert	0,1618	0,815	0,854	0,106
Versuch 1, Mittelmast					
GM	grobes Mehl	0,1537	0,850	0,849	0,076
GP	grobe Pellets	0,1526	0,841	0,847	0,090
GEx	grob expandiert	0,1547	0,861	0,870	0,102
GExp	grob expandiert und pelletiert	0,1536	0,875	0,864	0,196
FM	feines Mehl	0,1513	0,866	0,865	0,097
FP	feine Pellets	0,1461	0,885	0,880	0,096
FEx	fein expandiert	0,1492	0,892	0,882	0,114
FExp	fein expandiert und pelletiert	0,1532	0,845	0,852	0,086
Versuch 1, Endmast					
GM	grobes Mehl	0,1342	0,8773	0,8574	0,090
GP	grobe Pellets	0,1340	0,8827	0,8537	0,088
GEx	grob expandiert	0,1298	0,8727	0,8520	0,095
GExp	grob expandiert und pelletiert	0,1332	0,8938	0,8753	0,103
FM	feines Mehl	0,1300	0,9080	0,8692	0,106
FP	feine Pellets	0,1318	0,8988	0,8703	0,102
FEx	fein expandiert	0,1332	0,9185	0,8854	0,110
FExp	fein expandiert und pelletiert	0,1344	0,9266	0,8877	0,102

⁷ Im Kohlenstofffluss durch das System werden nur die CH₄-Emissionen - zusammengefasst aus Stall und Lager - betrachtet. Eine Quantifizierung der CO₂-Emissionen entfällt, da die Mengen an CO₂ zuvor durch Photosynthese gebunden wurden. Insgesamt werden die Produktionsprozesse in der Landwirtschaft (vereinfacht) als CO₂-neutral angesehen.

⁸ Wang und Huang (2005) geben für Broiler 1,6 · 10⁻⁵ kg Tier⁻¹ an. Einflüsse der Futterzusammensetzung werden dabei nicht diskutiert.

Tabelle 9.2

Rohprotein- (XP) Gehalte, Verdaulichkeiten für Stickstoff (N) und Organische Substanz (OM) sowie Gehalt an bakteriell fermentierbarer Substanz (BFS) der in der Schweinemast verwendeten Futter, Versuch 2

Futter	Vermahlung und Konfektionierung	XP-Gehalt kg kg ⁻¹	Verdaulichkeit für N kg kg ⁻¹	Verdaulichkeit für OS kg kg ⁻¹	BFS-Gehalt kg kg ⁻¹
Versuch 2, AM					
GM _{kon}	grobes Mehl, konventionell	0,1751	0,733	0,794	0,085
GP _{kon}	grobe Pellets, konventionell	0,1679	0,795	0,860	0,112
GM _{heim}	grobes Mehl, vermehrt heimisch	0,1911	0,777	0,824	0,083
GP _{heim}	grobe Pellets, vermehrt heimisch	0,1733	0,839	0,890	0,073
Versuch 2, MM					
GM _{kon}	grobes Mehl, konventionell	0,1648	0,742	0,817	0,056
GP _{kon}	grobe Pellets, konventionell	0,1607	0,824	0,875	0,090
GM _{heim}	grobes Mehl, vermehrt heimisch	0,1568	0,678	0,791	0,045
GP _{heim}	grobe Pellets, vermehrt heimisch	0,1624	0,814	0,873	0,083
Versuch 2, EM					
GM _{kon}	grobes Mehl, konventionell	0,1583	0,788	0,824	0,081
GP _{kon}	grobe Pellets, konventionell	0,1417	0,819	0,868	0,071
GM _{heim}	grobes Mehl, vermehrt heimisch	0,1538	0,787	0,855	0,084
GP _{heim}	grobe Pellets, vermehrt heimisch	0,1414	0,830	0,890	0,091

2.8.2.2 Haltungverfahren und Wirtschaftsdüngermanagement

2.8.2.2.1 Mastschweine

Im Versuch 1 wurden 96 Mastschweine gehalten; im Versuch 2 waren es 100 Tiere. In beiden Versuchen wurden ausschließlich kastrierte männliche Tiere (Börge) eingesetzt.

Die Berechnungen der Emissionen folgen den Regelwerken für luftverschmutzende Emissionen (EMEP, 2013) und Treibhausgase (IPCC, 2006c). Dabei werden nicht die im Versuch herrschenden (nicht repräsentativen) Bedingungen angesetzt, sondern praxisnahe Verhältnisse, für die die folgenden Annahmen gemacht werden:

Stall:	Teilspaltenboden, Flüssigmist
Lager:	konventioneller Rundbehälter, Abdeckung mit Folie
Ausbringung:	Schleppschauch auf Ackerland
Einarbeitung:	innerhalb von 4 h nach Ausbringung

Tabelle 9.3

N-Gehalte, N- und UAN-Faktoren und OS-Verdaulichkeiten der in der Broilermast verwendeten Futter, Versuche 1 und 2

Futter	Behandlung	N-Gehalt kg kg ⁻¹	Faktoren		Verdaulichkeit für OS kg kg ⁻¹
			$f_{N, \text{excr, br}}$ kg kg ⁻¹	$f_{UAN, \text{excr, br}}$ kg kg ⁻¹	
Versuch 1					
GM	grobes Mehl	0,0366	0,381	0,305	0,753
GP	grobe Pellets	0,0380	0,325	0,279	0,759
GExP	grob expandiert und pelletiert	0,0333	0,368	0,275	0,764
FM	feines Mehl	0,0374	0,335	0,281	0,767
FP	feine Pellets	0,0400	0,274	0,225	0,786
FExP	fein expandiert und pelletiert	0,0389	0,318	0,242	0,749
Versuch 2					
GExP _{kon}	konventionell grob pelletiert und expandiert	0,0360	0,340	0,312	0,783
FP _{kon}	konventionell fein pelletiert	0,0353	0,324	0,273	0,764
GExP _{heim}	heimisch grob expandiert und pelletiert	0,0356	0,334	0,277	0,771
FP _{heim}	heimisch fein pelletiert	0,0359	0,306	0,256	0,800

2.8.2.2.2 Broiler

Im Versuch 1 wurden 624 männliche Masttiere geprüft, im Versuch 2 768 ebenfalls männliche Tiere. Hinzu kommen jeweils 36 Broiler über 28 Tage in Einzelkäfigen für die Bilanzversuche.

Stall:	konventioneller Stall, Bodenhaltung mit Einstreu
Lager:	abgedeckter Lagerplatz für Kot/Einstreu, Abdeckung mit Folie
Ausbringung:	breitverteilt auf Ackerland
Einarbeitung:	innerhalb von 4 h nach Ausbringung

2.8.3 Zahlenangaben, Signifikanzniveaus

Die Zahlenangaben in Tabellen und Abbildungen enthalten jeweils drei signifikante Stellen. Die Rechnungen werden jedoch mit vierzehn Stellen durchgeführt. Wegen der besseren Lesbarkeit sind die relativen N-Ausscheidungen in g kg⁻¹ angegeben.

Signifikanzniveaus (t-Test) sind wie folgt definiert: ns: $p \geq 0,005$; *: $0,01 \leq p < 0,05$; **: $0,001 \leq p < 0,01$; ***: $p < 0,001$

3 Ergebnisse

3.1 Relevante Ausscheidungen, Bezugsgrößen

Die Emissionen von CH_4 aus dem Wirtschaftsdüngermanagement sind den ausgeschiedenen VS-Mengen proportional, die der Stickstoff-Spezies den Ausscheidungen von N insgesamt (N_2O , NO , N_2) bzw. von TAN oder UAN (NH_3). Indirekt sind auch die Emissionen aus der Pflanzenproduktion mehr oder minder proportional den Ausscheidungen. Unterschiede zwischen den einzelnen untersuchten Varianten sind weitgehend über die Mengen der Ausscheidungen erklärbar.

Eigentliche Bezugsgröße aller Betrachtungen sind die Mengen der verkäuflichen Produkte und der mit ihnen erzeugte wirtschaftliche Erlös. Diese Arbeit behandelt lediglich die Stoff- und Energieströme und beschränkt sich auf die verkäuflichen Produktmengen; als Maß dient die erzielte Lebendmassezunahme (Δw) in $kg\ Tier^{-1}$ bei Schweinen bzw. $kg\ Gruppe^{-1}$ bei Broilern. Die auf Δw bezogenen Emissionen werden im Folgenden als relative Emissionen bezeichnet.

3.1.1 Mastschweine

Die Lebendmassezunahmen und die relevanten Ausscheidungen der Mastschweine sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Die zu beobachtenden Unterschiede der Lebendmassezunahmen werden in Liermann et al. (2015a) näher beschrieben. Auf die ausführliche Darstellung der Werte der Verdaulichkeit der Rohnährstoffe (vgl. Tabellen 9.1 bis 9.3) wird aus Übersichtgründen hier verzichtet. Die Verdaulichkeiten fast aller Rohnährstoffe steigen bei fein vermahlenem Futter gegenüber grobem Futter an. Mit zunehmender

Intensität der hydrothermischen Behandlung ist ebenfalls ein Anstieg zu beobachten. Die dabei festgestellten Differenzen sind altersabhängig, d. h., die jüngeren Tiere reagieren stärker als die am Ende der Mastperiode.

Durchgängig erkennbar sind die mit heimischen Futtermitteln erzielten höheren Zuwächse in Versuch 2, die höhere absolute und teilweise auch relative Ausscheidungen zur Folge haben, wobei N- und VS-Ausscheidungen sich durchaus voneinander unterscheiden (Tabelle 11).

Tabelle 11

N- und VS-Ausscheidungen im Schweinemastversuch 2, Signifikanz der Unterschiede
unten und links: N-Ausscheidungen;
oben und rechts: VS-Ausscheidungen

	GM _{kon}	GP _{kon}	GM _{heim}	GP _{heim}
GM _{kon}		ns	**	*
GP _{kon}	***		***	***
GM _{heim}	*	***		ns
GP _{heim}	**	**	***	

3.1.2 Broiler

In Tabelle 12 sind die Lebendmassezunahmen und relevanten Ausscheidungen der Broiler zusammengefasst. Zuwächse und absolute Ausscheidungen variieren deutlich mehr als die entsprechenden Daten aus den Mastschweineversuchen. Hierauf wird in Liermann et al. (2015b) näher eingegangen. Erkennbar sind die großen Unterschiede der LM-Zunahmen zwischen gemahlenem und pelletiertem Futter ($p < 0,001$). Dies setzt sich bei den Ausscheidungen fort.

Tabelle 10

Lebendmasse- (LM-) zunahmen sowie absolute und relative Ausscheidungen von Mastschweinen (Werte in Klammern Standardabweichungen)

Typ	LM-Zunahme kg Tier ⁻¹	VS-Ausscheidung		N-Ausscheidung		TAN-Ausscheidung	
		absolut kg Tier ⁻¹	relativ kg kg ⁻¹	absolut kg Tier ⁻¹	relativ g kg ⁻¹	absolut kg Tier ⁻¹	relativ g kg ⁻¹
GM	86,0 (5,3)	160 (11)	1,86	3,14 (0,25)	36,6	2,34 (0,20)	27,2
GP	83,8 (3,5)	145 (14)	1,73	2,78 (0,42)	33,2	2,09 (0,36)	25,0
GEx	78,9 (6,8)	147 (18)	1,86	2,77 (0,42)	35,0	2,01 (0,33)	25,4
GExP	83,1 (8,0)	151 (19)	1,82	2,84 (0,44)	34,1	2,17 (0,35)	26,0
FM	82,4 (7,4)	146 (19)	1,77	2,77 (0,32)	33,6	2,16 (0,26)	26,3
FP	87,5 (6,9)	148 (14)	1,69	2,74 (0,35)	31,3	2,10 (0,29)	23,9
Fex	80,0 (5,1)	141 (12)	1,76	2,54 (0,33)	31,7	2,02 (0,29)	25,2
FExP	86,8 (5,3)	155 (17)	1,79	2,87 (0,44)	33,1	2,32 (0,39)	26,7
GM _{kon}	74,1 (4,9)	137 (14)	1,85	3,41 (0,44)	46,1	2,09 (0,32)	28,2
GP _{kon}	75,6 (6,5)	132 (12)	1,75	2,92 (0,34)	38,7	2,01 (0,26)	26,7
GM _{heim}	76,7 (5,5)	145 (13)	1,89	3,61 (0,41)	47,1	2,15 (0,29)	28,0
GP _{heim}	79,4 (5,4)	143 (13)	1,80	3,17 (0,30)	40,0	2,26 (0,25)	28,6

Tabelle 12

Lebendmasse- (LM-) zunahmen sowie absolute und relative Ausscheidungen von Broilern (Werte in Klammern Standardabweichungen)

Typ	LM-Zunahme kg Gruppe ⁻¹	VS-Ausscheidung		N-Ausscheidung		UAN-Ausscheidung	
		absolut kg Gruppe ⁻¹	relativ kg kg ⁻¹	absolut kg Gruppe ⁻¹	relativ g kg ⁻¹	absolut kg Gruppe ⁻¹	relativ g kg ⁻¹
GM	13,5 (0,38)	4,54 (0,37)	0,336	0,266 (0,020)	19,7	0,213 (0,016)	15,8
GP	22,7 (0,27)	6,65 (0,94)	0,293	0,356 (0,013)	15,7	0,305 (0,010)	13,5
GExP	20,4 (0,24)	5,87 (0,80)	0,288	0,316 (0,018)	15,5	0,236 (0,015)	11,6
FM	14,3 (0,31)	4,49 (0,51)	0,315	0,248 (0,010)	17,4	0,208 (0,008)	14,6
FP	24,6 (0,19)	6,05 (0,77)	0,246	0,323 (0,013)	13,1	0,265 (0,011)	10,8
FExP	18,9 (0,25)	5,78 (0,64)	0,306	0,297 (0,018)	15,7	0,760 (0,015)	11,9
GExP _{kon}	13,2 (0,26)	3,63 (0,29)	0,274	0,228 (0,015)	17,2	0,209 (0,014)	15,8
FP _{kon}	19,1 (0,32)	5,67 (0,62)	0,298	0,316 (0,025)	16,6	0,266 (0,023)	14,0
GExP _{heim}	16,4 (0,29)	4,57 (0,41)	0,279	0,270 (0,010)	16,5	0,224 (0,009)	13,7
FP _{heim}	15,5 (0,31)	3,26 (0,31)	0,210	0,241 (0,017)	15,6	0,202 (0,016)	13,0

Tabelle 13

Auflagerung der Emissionen aus der Mastschweineproduktion am Beispiel GM_{kon}, Gruppe 1

Emission von	NH ₃	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	THG	Summe THG
Einheit	kg Tier ⁻¹ CO ₂ -eq	kg Tier ⁻¹ CO ₂ -eq				
Verdauung			0,39	1,05		10,8
Wirtschaftsdüngermanagement						
Stall	0,786					
Lager	0,041					
Ausbringung	0,108					
Management insgesamt	0,935	0,000	7,64			190,9
Pflanzenbau						
Kalk- und KAS-Anwendung	0,083	0,049		12,48		27,1
verrottende Pflanzenreste		0,081				24,0
Diesel im Pflanzenbau		0,002	0,00	6,06		6,8
Mischfutterbereitung/Mühle					0,92	0,9
Stall						
Stallklima und -beleuchtung					8,92	8,9
Futtertransport im Stall					0,15	0,1
Düngemittelherstellung						
KAS und Phosphat	0,246				3,21	3,2
Kalk insgesamt					1,11	1,1
Zuckerfabrik				0,41		0,4
Bereitstellung Diesel					0,82	0,8
Bereitstellung Erdgas					0,87	0,9
Bereitstellung Wasser					0,20	0,2
indirekte Emissionen		0,015				4,5
Summen	1,26	0,147	8,03	20,0	16,2	281

3.2 Emissionen

Zusammengefasst sind die Emissionen der Mineraldünger-, Dünge- und Futterkalkherstellung, die Emissionen aus dem Futterbau (THG nach der Anwendung von Wirtschafts- und Mineraldüngern, NH₃ aus Anwendung der Mineraldünger),

die bei der Mischfutterbereitung anfallenden THG-Emissionen (Mühle), die dem Stall zuzurechnenden Emissionen bei der Bereitstellung elektrischer Energie, die der Tierproduktion im engeren Sinnen zuzurechnenden Emissionen aus der Verdauung (CH₄) sowie die Emissionen von CH₄, NH₃ und N₂O

aus dem Stall, dem Lager und die NH₃-Emissionen bei der Ausbringung der Wirtschaftsdünger.

Konventionsgemäß (EMEP, 2013; IPCC, 2006c) werden die Emissionen bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern dem Wirtschaftsdüngermanagement zugeordnet, die bei Anwendung von Mineraldüngern jedoch dem Pflanzenbau. Diese Zuordnung wird in den Abbildungen beibehalten.

Werden für Prozesse Emissionen nicht für die einzelnen THG angegeben, sondern lediglich die bereits in CO₂-Äquivalente umgerechneten Summen, so werden sie als „unaufgeschlüsselte THG-Emissionen“ bezeichnet.

Bezugsgrößen sind zunächst die Tiere (Mastschweine) bzw. die Tiergruppen (Broiler), deren Futter und Ausscheidungen Eingangsgrößen in die Emissionsberechnungen sind. Dabei betrug die Mastdauer bei den Schweinemastversuchen 63 (Versuch 1) bzw. 73 (Versuch 2) Tage und bei den Broilermastversuchen jeweils 35 Tage. Im Hinblick auf das Produkt „Fleisch“ werden produktbezogene „relative“ Emissionen berechnet, die als Maß hierfür die während der Mast erzielten Lebendmassezunahmen nutzen.

3.2.1 Emissionen aus Schweinemast und vorgelegtem Bereich

Die Auswertung erfolgt nur für die Mittelwerte der Gruppen, da die Streuungen der Ergebnisse in der Gruppe – beginnend mit Futterraufnahme und Lebendmassezunahme – erheblich sind (Tabelle 10). Eine vollständige Auflistung der Emissionen für das Futter GM_{kon} findet sich in Tabelle 13. Die Abbildungen 5 bis 9 veranschaulichen die THG- und NH₃-Emissionen aus den beiden Mastschweineversuchen.

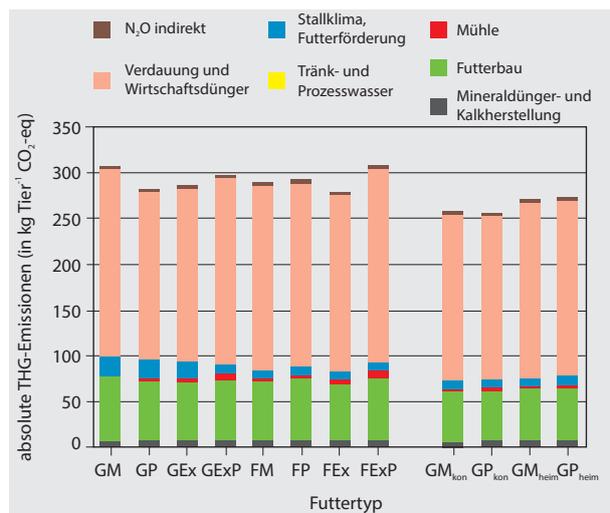


Abbildung 5
Absolute THG-Emissionen in der Schweinemast, geordnet nach Entstehungsorten, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

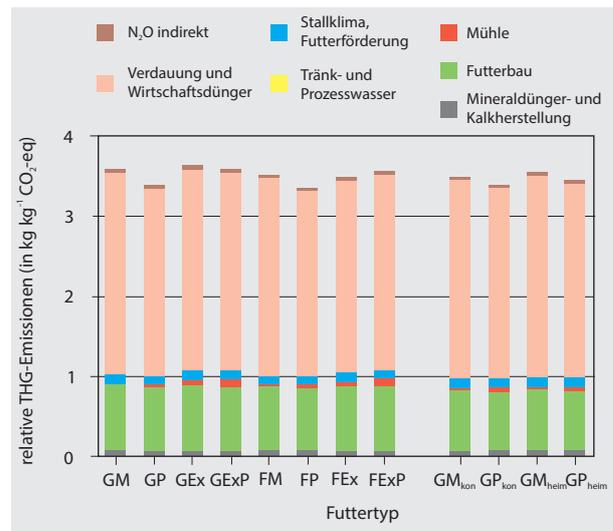


Abbildung 6
Auf die Lebendmassezunahme (in kg Tier⁻¹) bezogene (relative) THG-Emissionen in der Schweinemast, geordnet nach Entstehungsorten, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

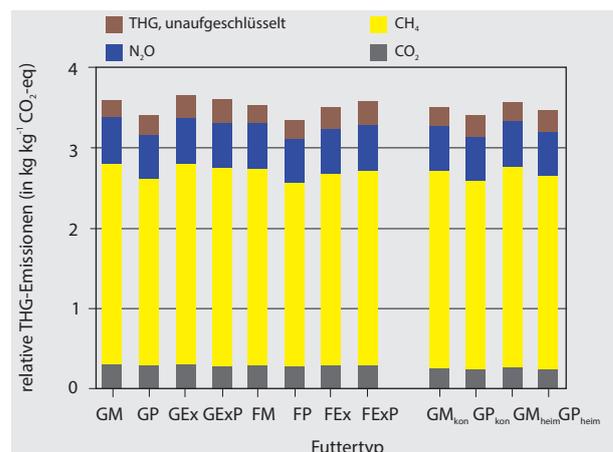


Abbildung 7
Relative THG-Emissionen in der Schweinemast, geordnet nach Gasen, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

Es wird deutlich, dass die **THG-Emissionen in der Schweinemast** von den Emissionen aus Verdauung und Wirtschaftsdüngermanagement bestimmt sind und dass hierbei CH₄ die weitaus größte Bedeutung hat. Der Anteil der Emissionen aus der Verdauung ist hierbei recht gering (etwa 5 %). Die Emissionen wurden hier so berechnet, als wären die Schweine im praxisüblichen Stall mit Spaltenboden und Flüssigmist. Unter den so herrschenden anaeroben Bedingungen entsteht vergleichsweise viel CH₄ und sehr wenig N₂O. Der Futterbau ist mit etwa einem Viertel an den Gesamtemissionen beteiligt, vornehmlich über seine N₂O-Emissionen. Die THG-Emissionen aus der Mineraldünger- und Kalkherstellung sowie der Mühle fallen kaum ins Gewicht. Ähnliches gilt für den Bedarf an elektrischer Energie für Stallklima und Futterförderung und die mit ihnen verbundenen Emissionen.

Aus dem Vergleich der Abbildungen 6 und 7 lässt sich schließen, dass der Haupteinfluss auf die absoluten Emissionen in den unterschiedlichen Futteraufnahmen zu suchen ist. Abbildung 8 macht jedoch deutlich, dass auch andere Einflussgrößen erhebliche Bedeutung haben. Die im Mittel höheren Zunahmen während der Mast (in kg Tier⁻¹) in Versuch 1 führen zu höheren Emissionen über die dadurch erhöhte Futteraufnahme.

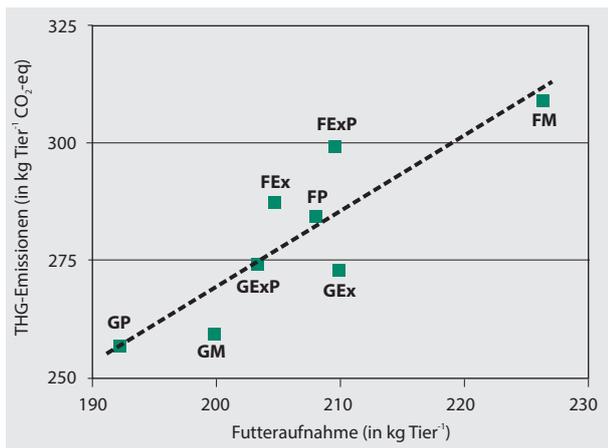


Abbildung 8
Zum Zusammenhang zwischen THG-Emissionen und Futteraufnahme (Bestimmtheitsmaß R² der Regressionsgeraden 0,75)

Abbildung 8 deutet darauf hin, dass das grob vermahlene Futter im Mittel weniger aufgenommen wird als das fein vermahlene und weniger THG-Emissionen hervorruft. Weitere Aussagen sind jedoch kaum möglich, da die meisten Unterschiede nicht signifikant sind (Tabelle 14).

Tabelle 14

Absolute NH₃- und THG-Emissionen im Schweinemastversuch 1, Signifikanz der Unterschiede unten und links: NH₃-Emissionen; oben und rechts: THG-Emissionen

	GM	GP	GEx	GExP	FM	FP	FEx	FExP
GM		**	ns	ns	*	*	**	ns
GP	**		ns	ns	ns	ns	ns	*
GEx	*	ns		ns	ns	ns	ns	ns
GExP	*	ns	ns		ns	ns	ns	ns
FM	**	ns	ns	ns		ns	ns	ns
FP	**	ns	ns	ns	ns		ns	ns
FEx	***	ns	ns	ns	*	ns		*
FExP	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

Der vermehrte Einsatz heimischer Futtermittel hat zwar einen Einfluss auf die absoluten THG-Emissionen, aber nahezu keinen auf die produktbezogenen. Auch hier ist die

größere Futteraufnahme mit der Folge einer erhöhten LM-Zunahme als Ursache zu vermuten.

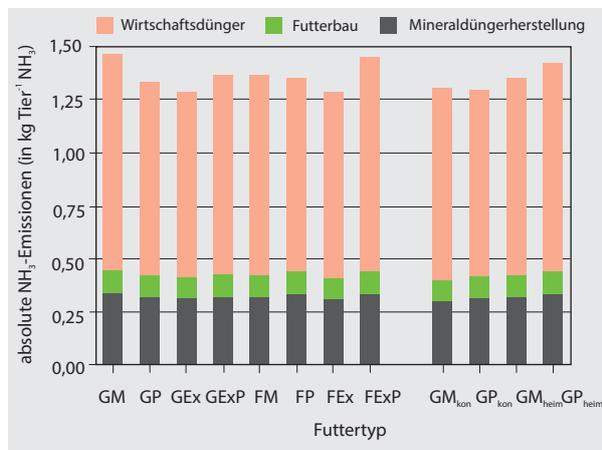


Abbildung 9
Absolute NH₃-Emissionen in der Schweinemast, geordnet nach Entstehungsorten, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

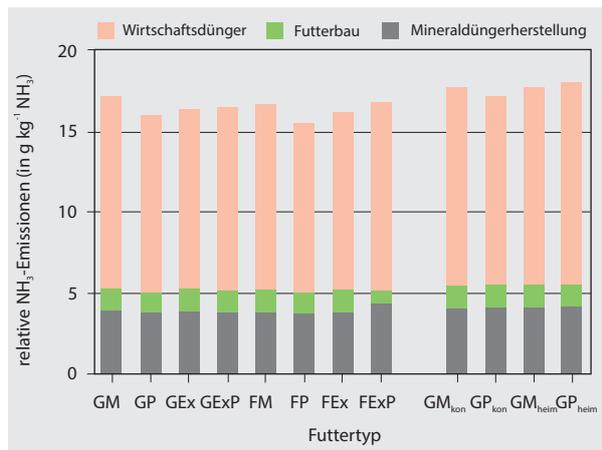


Abbildung 10
Auf die Lebendmassezunahme (in kg Tier⁻¹) bezogene (relative) NH₃-Emissionen in der Schweinemast, geordnet nach Entstehungsorten, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

Die **NH₃-Emissionen** entstehen zum größten Teil beim Wirtschaftsdüngermanagement. Hiervon entfallen jeweils etwa 84 % auf den Stall einschließlich Güllekeller, 5 % auf das hier gut abgedeckte Lager und 11 % auf die Ausbringung. Die Emissionen von NH₃ bzw. von NH₄-N (im Staub) bei der Produktion der Mineraldünger sind hier im Gegensatz zu den entsprechenden THG-Emissionen erheblich.

Die absoluten und auf die Gewichtszunahme bezogenen NH₃-Emissionen machen den Einfluss der Pelletierung (GP, FP) (nur Versuch 1) und der Extrudierung (GEx, FEx) deutlich (Abbildungen 9 und 10). Ein Kombinationseffekt (GExP, FExP) ist nicht zu beobachten. Der Ersatz einer Leguminose mit symbiontischer N-Fixierung (GM_{konv.}, GP_{konv.}) durch eine

Kruzifere (GM_{Heim}, GP_{Heim}) hat prinzipiell einen erhöhten Mineraldüngereinsatz zur Folge. Dies hat jedoch kaum einen Effekt auf die NH₃-Emissionen.

In den meisten Fällen sind die Unterschiede zwischen den NH₃-Emissionen bei unterschiedlichen Futtertypen nicht signifikant (Tabelle 14).

3.2.2 Emissionen aus Broilermast und vorgelagertem Bereich

In den Abbildungen 11 bis 15 sind die Emissionen der Broilermast dargestellt. In Tabelle 15 ist beispielhaft ein vollständiger Datensatz (Futter GM) wiedergegeben.

Man erkennt bei den **Treibhausgasen** (Abbildungen 11 bis 13), dass absolute und gewichtsbezogene Emissionen teilweise ein gegenläufiges Bild geben. Dominierende Quellen sind Futterpflanzenbau und Stallklima. Der Beitrag der Mineraldünger- und Kalkherstellung ist insgesamt gering. Er setzt sich zusammen aus CO₂- und N₂O-Emissionen sowie nicht aufgeschlüsselten THG für die Bereitstellung von elektrischer Energie. Das einzige Treibhausgas im Bereich des Pflanzenbaus ist N₂O.

Die Bereitstellung von Tränk- und Prozesswasser erfordert den Einsatz elektrischer Energie zum Pumpen.

Insgesamt ist dieser Beitrag so gering, dass er in den Abbildungen nicht zu erkennen ist.

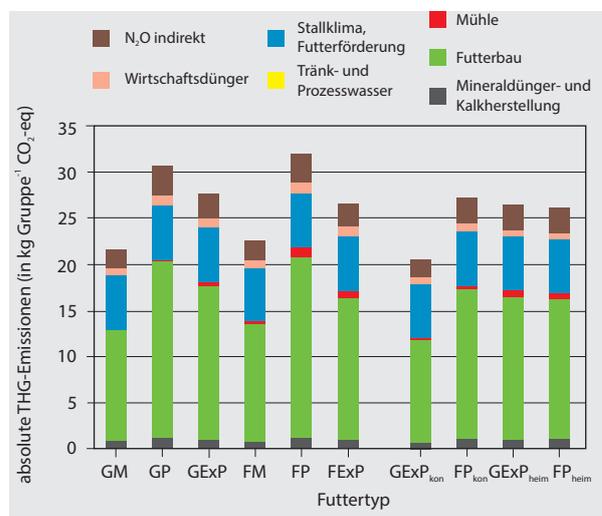


Abbildung 11
Absolute THG-Emissionen in der Broilermast, geordnet nach Entstehungsorten, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

Tabelle 15

Aufgliederung der Emissionen aus der Boilerproduktion am Beispiel, Futtertyp GM

Emission von Einheit	NH ₃ kg Gruppe ⁻¹	N ₂ O kg Gruppe ⁻¹	CH ₄ kg Gruppe ⁻¹	CO ₂ kg Gruppe ⁻¹	THG kg Gruppe ⁻¹ CO ₂ -eq	Summe THG kg Gruppe ⁻¹ CO ₂ -eq
Verdauung			0,00	0,26		0,3
Wirtschaftsdüngermanagement						
Stall	0,029					
Lager	0,040					
Ausbringung	0,035					
Management insgesamt	0,104	0,00	0,02			0,5
Pflanzenbau						
Kalk- und KAS-Anwendung	0,015	0,009		2,84		5,4
verrottende Pflanzenreste		0,019				5,8
Diesel im Pflanzenbau		0,000	0,000	0,89		1,0
Mischfutterbereitung/Mühle					0,06	0,1
Stall						
Stallklima und -beleuchtung					5,70	5,7
Futtertransport im Stall					0,10	0,1
Düngemittelherstellung						
KAS und Phosphat	0,034				0,43	0,4
Kalk insgesamt					0,23	0,2
Zuckerfabrik						
Bereitstellung Diesel				0,02	0,01	0,0
Bereitstellung Erdgas					0,00	0,0
Bereitstellung Wasser					0,01	0,0
indirekte Emissionen		0,007				2,1
Summen	0,152	0,036	0,016	4,00	6,54	21,7

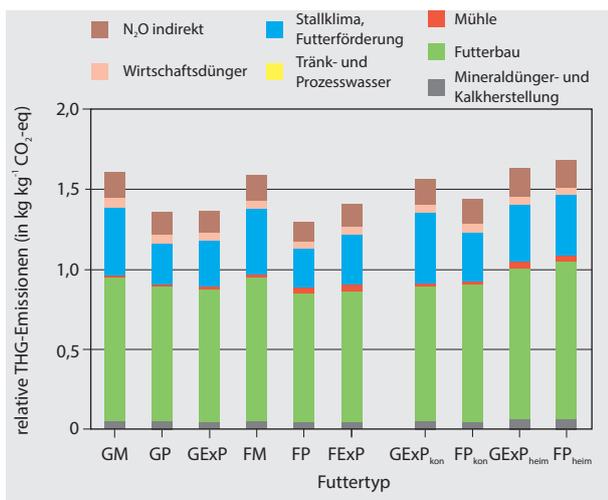


Abbildung 12

Auf die Lebendmassezunahme (in kg Gruppe⁻¹) bezogene (relative) THG-Emissionen in der Broilermast, geordnet nach Entstehungsorten, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

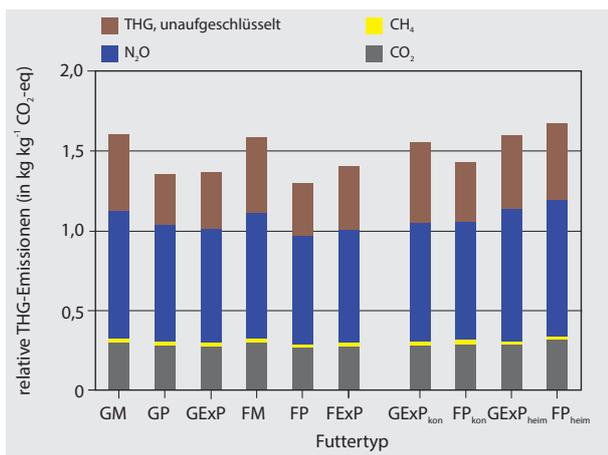


Abbildung 13

Auf die Lebendmassezunahme (in kg Gruppe⁻¹) bezogene (relative) THG-Emissionen in der Broilermast, geordnet nach Gasen, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

Der (elektrische) Energiebedarf der Mischfutterherstellung (Mühle) ist insgesamt gering; der Mehraufwand für Feinvermahlen, Pelletieren und Expandieren ist erkennbar.

Die Aufrechterhaltung des Stallklimas und die Futterförderung benötigen elektrische Energie, für deren Bereitstellung nur die THG-Emissionen insgesamt verfügbar sind. Der Anteil der Futterförderung ist vernachlässigbar (etwa 0,3 % des Gesamtbedarfs).

Gering ist der Beitrag des Wirtschaftsdüngermanagements. Die Lagerung von Trockenkot schafft aerobe Verhältnisse, unter denen nur wenig CH₄ entsteht.

Die N-Einträge in die Böden aus Mineral- und Wirtschaftsdüngern werden teilweise ausgewaschen. Sie führen ebenso wie die mit der Deposition eingetragenen N-Mengen zu indirekten N₂O-Emissionen.

Die Tabellen 16 und 17 zeigen, dass die Unterschiede der auf die Zunahme bezogenen Emissionen zumeist sehr signifikant bis hoch signifikant sind, Aus Sicht der Emissionsvermeidung bei den THG lohnt sich lediglich der Aufwand des Pelletierens. Er führt zu einer deutlich erhöhten Futteraufnahme. Der Einsatz vorwiegend heimisch erzeugter Futtermittel ist nicht vorteilhaft.

Die **NH₃-Emissionen** zeigen ein zum Teil von den THG abweichendes Bild (Abbildungen 14 und 15).

Tabelle 16

Relative NH₃- und THG-Emissionen im Broilermastversuch 1, Signifikanz der Unterschiede unten und links: NH₃-Emissionen; oben und rechts: THG-Emissionen

	GM	GP	GExP	FM	FP	FExP
GM		***	***	ns	***	***
GP	***		ns	***	***	ns
GExP	***	***		***	***	*
FM	*	**	***		***	***
FP	***	ns	**	***		***
FExP	***	ns	**	**	ns	

Tabelle 17

Relative NH₃- und THG-Emissionen im Broilermastversuch 2, Signifikanz der Unterschiede unten und links: NH₃-Emissionen; oben und rechts: THG-Emissionen

	GExPkon	FPkon	GExPheim	FPheim
GExPkon		***	ns	***
FPkon	ns		***	***
GExPheim	ns	ns		**
FPheim	***	***	*	

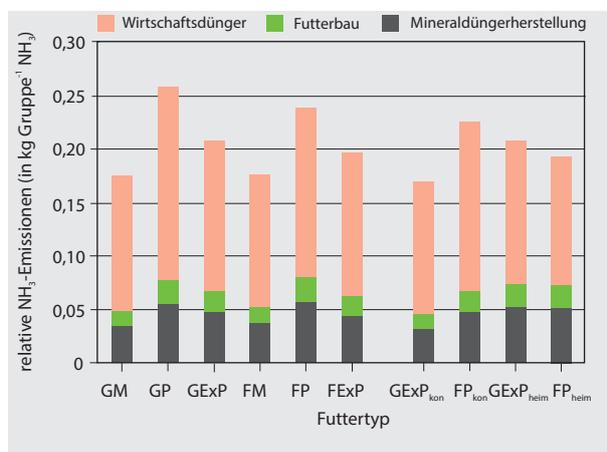


Abbildung 14

Absolute NH₃-Emissionen in der Broilermast, geordnet nach Entstehungsorten, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

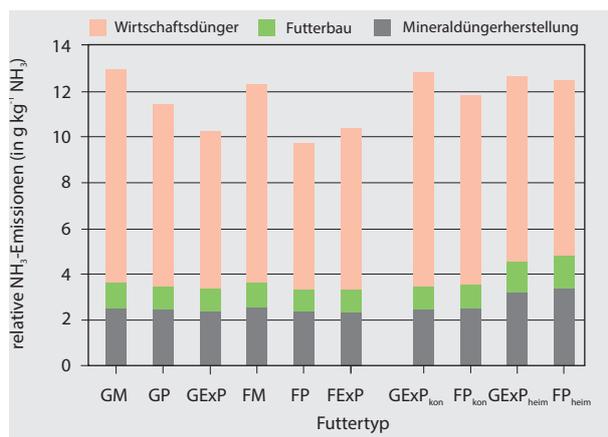


Abbildung 15

Auf die Lebendmassezunahme (in kg Gruppe⁻¹) bezogene (relative) NH₃-Emissionen in der Broilermast, geordnet nach Entstehungsorten, Mittelwerte der Gruppen eines Futtertyps

Die absoluten NH₃-Emissionen sind ebenfalls von der Menge des aufgenommenen Futters beeinflusst. Pelletiertes Futter wird deutlich mehr gefressen als das grob vermahlene Futter gleicher Zusammensetzung, was zu erheblichen Steigerungen der Lebendmassezunahmen führt (Tabelle 12).

Dominierender Entstehungsort für NH₃-Emissionen ist der Wirtschaftsdünger in Stall und Lager sowie bei und nach der Ausbringung. Vergleichsweise gering sind die NH₃-Emissionen aus dem Futterbau. Merklich höher als bei den THG ist der Anteil der NH₃-Emissionen aus der Mineraldüngerherstellung.

Expandieren und Feinvermahlen senken die relativen NH₃-Emissionen (zur Signifikanz siehe Tabellen 16 und 17). Der Einsatz vermehrt heimischer Futtermittel ist ohne wesentlichen Einfluss auf das Gesamtemissionsgeschehen. Der Effekt des Einsatzes von heimischen Eiweißträgern (teilweiser Ersatz von Soja durch Raps) führt zu vermehrtem Mineraldüngereinsatz. Dies hat leicht erhöhte NH₃-Emissionen aus Futterbau und Mineraldüngerherstellung zur Folge.

3.3 Kurze Erläuterung der Unterschiede der Emissionsmuster bei Schweine- und Broilermast

Die Emissionsmuster bei Mastschweinen und Broilern unterscheiden sich erheblich (Tabellen A2 und A3). Wesentliche Unterschiede sind die Verfügbarkeit von Sauerstoff und Wasser bei der Lagerung der Exkremate. Der Festmist der Broiler ist trocken und im Stall gut belüftet. Die reduzierenden Verhältnisse bei der Lagerung der Schweinegülle begünstigen die CH₄-Bildung aus VS, wohingegen bei guter O₂-Verfügbarkeit (Broiler) fast nur CO₂ entsteht. Schweine scheiden die größere Menge an N mit dem Harn in Form von Harnstoff aus, der sehr schnell in Gegenwart von Urease zu NH₄/NH₃ abgebaut wird. In den vergleichsweise trockenen Ausscheidungen der Broiler kann diese Umsetzung nur langsam stattfinden. Hier bindet zusätzlich die Einstreu die Feuchtigkeit und nimmt NH₄ auf. Die Konfektionierung der Futter hat hierauf keinen Einfluss.

4 Diskussion

4.1 Unsicherheiten

Die Berechnung der Emissionen geschieht im Wesentlichen mit den Methoden der Emissionsberichterstattung. Für diese Methoden liegen insgesamt (d. h. einschließlich der hier nicht erforderlichen Berechnung der Futterraufnahme) Schätzungen der Unsicherheiten vor. Sie belaufen sich auf etwa 37 % für die THG (95%-Konfidenzintervalle, wesentlich bedingt durch die Unsicherheit der N₂O-Emissionen) und etwa 17 % für NH₃ (Haenel et al., 2016).

Es ist davon auszugehen, dass die absoluten Unsicherheiten der Unterschiede, die sich bei den Berechnungen der Szenarien ergeben, geringer sind, Trends werden auch dann zutreffend abgebildet, wenn die absoluten Beträge von der Wirklichkeit abweichen, da alle Szenarien mit dem gleichen Verfahren berechnet werden. Für die Bewertung der Unsicherheiten dieser Arbeit sind deshalb die sog. „Unsicherheiten der Trends“, die für das nationale Emissionsinventar ebenfalls berechnet werden, von Bedeutung. Sie liegen für NH₃ bei nur etwa 4 %, für THG bei 12 %.

4.2 Repräsentativität

Die Versuche selbst spiegeln Praxisbedingungen nicht wider. Übertragbar erscheinen die relativen Unterschiede der Futterraufnahme und der LM-Zuwächse.

Zur Berechnung der Emissionen wurden praxisnahe Verhältnisse gewählt. Die Düngermengen wurden nach DüV (LWK-Nds, 2013) berechnet. Ein Zuschlag erfolgte nicht. Es ist jedoch gängige Praxis, N-Dünger im Überschuss zu geben und die erlaubten 60 kg ha⁻¹ a⁻¹ N auszuschöpfen.

Als Dünger wurde KAS gewählt, weil sich hierauf alle Angaben zum Pflanzenbau in KTBL (2014) beziehen. Im deutschen Düngermix werden erhebliche Mengen an Harnstoff in fester Form und als Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung mit deutlich höheren Emissionsfaktoren eingesetzt.

Die Rechnungen berücksichtigen weder Abluftreinigungsanlagen noch Biogasanlagen.

Eine Übertragung der absoluten Ergebnisse auf die Wirklichkeit der Fleischerzeugung mit Mastschweinen und Broilern ist nur bedingt möglich, da weder Verluste noch die Veränderungen der Zahl der Durchgänge bei schneller wachsenden Tieren berücksichtigt wurden. Nimmt man bei **Schweinen** 1,25 % Verluste in der Endmast (Wolf und Kamphues, 2007) und eine mittlere Lebendmasse bei Verenden von 90 kg Tier⁻¹ an, so haben diese Tiere etwa 68 % der Gesamtfuttermenge eines planmäßig geschlachteten Tieres aufgenommen. Als Folge erhöhen sich die Emissionen aus der Mast je kg Produkt um etwa 1 %. Eine umfassendere Rechnung müsste auch den Futteraufwand vor der Mast berücksichtigen.

Als Verluste bei **Broilern** bei der Mast werden 3,5 % kurz vor Mastende angenommen. Damme (2015) gibt 5 bis 7 % für Mast, Transport und Verwurf an. Dann haben die Tiere 90 % des Futters der geschlachteten Tiere aufgenommen. Hier erhöhen sich bei Berücksichtigung der Verluste die Emissionen je Einheit des Produkts um 3 %.

4.3 Mögliche Bedeutung einer optimierten Konfektionierung von Schweine- und Broilerfutter für das Emissionsgeschehen in Deutschland

Die für Emissionsminderungen maßgeblichen Bezugsgrößen sind die Emissionen je Platz und Jahr. Ein rascheres Wachstum führt zu einer kürzeren Mastdauer und damit zu einer Erhöhung der Zahl der Durchgänge pro Jahr. In den hier beschriebenen Versuchen blieb die Mastdauer jeweils gleich. Aus den Zunahmen lässt sich aber auf die Dauer der Durchgänge schließen.

Insbesondere bei Broilern führt pelletiertes im Vergleich zu nur vermahlenem Futter zu einer Steigerung der Wachstumsrate um 60 bis 70 %. Dem steht eine gleichzeitige Verringerung der CH_4 - und THG-Emissionen insgesamt von etwa 12 % gegenüber. Das bedeutet, dass die Emissionen bei der üblichen Nutzung der Stallanlagen und der Infrastruktur eine Steigerung von etwa 7,5 Durchgängen pro Jahr auf 12 Durchgänge zu erheblichen Emissionssteigerungen führen. Bei CH_4 -Emissionen von etwa $1,9 \text{ Gg a}^{-1} \text{ CH}_4$ aus der Broilerproduktion, d. h. einem Anteil von weniger als 0,2 % der CH_4 -Emissionen aus der Landwirtschaft, wäre aber eine solche Erhöhung insgesamt kaum merklich. Angesichts der nationalen Treibhausgasemissionen, die vor allem aus nicht-landwirtschaftlichen Quellen herrühren, wäre sie bedeutungslos. Von größerer nationaler Bedeutung wäre eine Steigerung der NH_3 -Emissionen, die derzeit etwa 4 % der landwirtschaftlichen Gesamt- NH_3 -Emissionen ausmachen.

Der entsprechende Effekt bei Mastschweinen ist vergleichsweise gering. Aber auch hier ist der Anteil des aus der Mastschweinehaltung an den landwirtschaftlichen CH_4 -Emissionen mit etwa 4 % eher so gering, dass eine veränderte Konfektionierung wahrscheinlich nicht ins Gewicht fällt. Das gilt sinngemäß auch für NH_3 , obwohl die Mastschweinproduktion hier einen Anteil von etwa 15 % der Gesamtemissionen der Landwirtschaft aufweist. Im Gegensatz zu den Broilern muss hier jedoch auch die Nachzucht (Sauen, Ferkel, Aufzuchtferkel) in die Überlegungen einbezogen werden. Hier sind hoch wirksame Verfahren zur Abluftreinigung für NH_3 und zur Vergärung von Gülle Stand der Technik.

Anhänge

Anhang 1

Koppel- und Nebenprodukte

Bei Koppel- und Nebenprodukten werden die Emissionen anteilig auf die im Produktionsprozess zu berücksichtigenden verkäuflichen Produkte aufgeteilt (siehe Gleichung (4)). Die GE-Gehalte sind Beyer et al. (2004) entnommen.

Weizenkleie ist ein Koppelprodukt der **Weizenmehl**-Gewinnung. Für Brotmehle wird eine Ausmahlung von etwa 75 % angenommen. Der Rest ist Kleie. Das Weizenkorn besteht zu etwa 80 % aus dem Mehlkörper. Wenn man mit 74 % Ausmahlung rechnet, bleiben $0,26 \text{ kg kg}^{-1}$ Kleie. Für 1,0 Mg Kleie müssen also 3,85 Mg Weizen geerntet werden. Bei einem TM-Gehalt der Körner von 13 % und einem Ertragsniveau von $7,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ergibt sich eine Anbaufläche von $0,58 \text{ ha Mg}^{-1}$.

Bei den Emissionen werden jeweils $0,269 \text{ ha ha}^{-1}$ der Kleie zugeschlagen, der Rest, $0,731 \text{ ha ha}^{-1}$, dem Mehl.

Malzkeime sind ein Nebenprodukt der Brauerei. Es fallen etwa $43,9 \text{ kg (FM) pro Mg Malz bzw. Gerste (Braugerste, SG) an}$. Für 1 Mg Malzkeime ergibt sich bei müssen bei einem Ertragsniveau von $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ eine Fläche von $111,6 \text{ ha Mg}^{-1}$.

Da Malzkeime im Prozess mengenmäßig unbedeutend sind, werden die Emissionen beim Mälzen dem Bier zugerechnet. Ein zusätzlicher Energiebedarf ist nicht bekannt.

Als **Maismehl** wird gemahlene und ggf. nachbehandeltes Mehl aus der Trockenmahlung des gesamten Kornes bezeichnet. Die Anbauflächen entsprechen denen von Mais, die Emissionen ebenfalls.

Maiskleberfutter ist ein Nebenprodukt der Nassvermahlung von Mais. Die in van Zeist et al. (2012b) angeführte Massenbilanz besagt, dass aus 1 Mg Mais (TM) $0,185 \text{ Mg Maiskleberfutter (TM)}$ gewonnen werden. Der Flächenbedarf ergibt sich zu $60,4 \text{ ha Mg}^{-1}$.

Für $1,0 \text{ Mg Maiskleberfutter}$ müssen zusätzlich zu den THG-Emissionen beim Anbau und Ernte von Mais Energieaufwendungen von 3888 MJ Mg^{-1} als Erdgas und 479 MJ Mg^{-1} als elektrische Energie angesetzt werden.

Das Toasten von **Sojabohnen** führt nicht zu einem nennenswerten Massenverlust gegenüber getrockneten Sojabohnen. Der Flächenbedarf bleibt unverändert bei $0,357 \text{ ha (Mg Sojabohnen)}^{-1}$.

Sojaextraktionsschrot (SES) ist ein Koppelprodukt der Sojaölherstellung. Aus $1,0 \text{ Mg Sojabohnen}$ werden $0,78 \text{ Mg SES}$ gewonnen (van Zeist et al., 2012d). Es ergibt sich ein Flächenbedarf von $3,59 \text{ ha (Mg SES)}^{-1}$.

Die Allokation der Emissionen folgt BioGrace (2012): Dem Produkt SES werden $0,656 \text{ MJ MJ}^{-1}$ zugeschrieben.

Sojabohnenöl gilt als Hauptprodukt der Sojabohnenverarbeitung. Aus $1,0 \text{ Mg Sojabohnen}$ werden $0,19 \text{ Mg Öl}$ gewonnen (van Zeist et al., 2012d). Es errechnet sich ein Flächenbedarf von $14,7 \text{ ha (Mg Sojaöl)}^{-1}$.

Die Allokation der Emissionen folgt ebenfalls BioGrace (2012): Dem Produkt Sojaöl werden $0,344 \text{ MJ MJ}^{-1}$ zugeschrieben.

Rapsextraktionsschrot (RES) ist ein Koppelprodukt der Rapsölgewinnung. Rapsamen enthält 40 bis 50 % Rapsöl. Gerechnet wird mit 45 %. Die Extraktionsverfahren belassen nach Toasten etwa 2,5 % Restöl im Schrot. Für $1,0 \text{ Mg Rapsextraktionsschrot}$ müssen daher $1,74 \text{ Mg Rapsamen}$ geerntet werden. Das entspricht einem Flächenbedarf von $0,47 \text{ ha (Mg RES)}^{-1}$.

BioGrace (2012) schreibt dem RES einen Anteil an den Emissionen von $0,3878 \text{ MJ MJ}^{-1}$ zu.

Melasse ist ein Koppelprodukt der Zuckerproduktion. Für $1,0 \text{ Mg Melasse}$ müssen $0,07 \text{ ha Rüben}$ angebaut werden (Experteninformation Dr. Stefan Brinker, Pfeifer und Langen).

Der Allokationsfaktor für die THG-Emissionen wird über die Bruttoenergien von Zuckerrübe und Melasse berechnet. Bei der Zuckerproduktion wird der Melasse ein THG-Anteil von $0,027 \text{ MJ MJ}^{-1}$ zugerechnet.

Vinasse ist ein energiearmes Nebenprodukt der Zuckerproduktion. Die Anbaufläche ergibt sich unter Berücksichtigung des Flächenbedarfs der Melasse nach den Angaben in van Zeist et al. (2012a) zu $0,14 \text{ ha (Mg Vinasse)}^{-1}$.

Tabelle A1

Saatgutmengen

	Tausendkornmasse kg (1000 Körner) ⁻¹			Saatdichte Körner m ⁻²			Saatmenge Mg ha ⁻¹ a ⁻¹
	von	bis	Mittel	von	bis	Mittel	
Wintergerste	0,043	0,054	0,0485	220	350	285	0,138
Braugerste	0,040	0,050	0,0450	220	400	310	0,140
Hafer	0,030	0,045	0,0375	260	450	355	0,133
Körnermais	0,200	0,450	0,3250	7	10	8,5	0,028
Triticale	0,034	0,048	0,0410	250	350	300	0,123
Winterweizen	0,040	0,055	0,0475	200	400	300	0,143

Die Emissionen und der Energiebedarf der Vorkette sind bereits bei Melasse berücksichtigt. Hier bleibt der Aufwand fürs Eindicken, den van Zeist et al. (2012a) mit 2350 kWh aus Erdgas und 153 kWh aus elektrischer Energie für 525 kg Vinasse quantifizieren.

ProtiGrain, DDGS (dried distillers grains and solubles) ist ein Nebenprodukt der Ethanolherstellung aus Weizen. Die bei van Zeist et al. (2012a) angegebene Massenbilanz ergibt, dass je Mg DDGS 0,135 ha Weizen angebaut werden müssen.

DDGS muss getrocknet werden. Hierzu werden je Mg eingesetzten Weizens 3888 MJ als Erdgas und 479 MJ elektrische Energie benötigt (van Zeist et al., 2012a).

Brotmehl ist ein Nebenprodukt der Brotbackungsindustrie. Aus 1,0 Mg Brot (TM-Gehalt 0,66 kg kg⁻¹) werden dabei 0,367 Mg Brotmehl (TM-Gehalt 0,90 kg kg⁻¹). Es wird angenommen, das Brot seinerseits sei aus Weizenmehl hergestellt, wobei 1 kg Weizenmehl 1,5 kg Brot ergibt.

Für Brotmehl wird ein GE-Gehalt von 19,62 MJ kg⁻¹ angenommen wie für Weizenfuttermehl.

Für das Trocknen des Brotes wird Erdgas verwendet. Der Bedarf ist 1200 MJ (Mg Brot)⁻¹ (van Zeist et al., 2012c).

Saatgutmengen. Tausendkornmassen und Saatdichten werden aus KTBL (2014) übernommen, wobei die Rechnungen sich der Mittel der jeweils angegebenen Werte bedienen (Tabelle A1).

Anhang 2

Emissionen bei der Herstellung von Kalkammonsalpeter

Die Emissionen werden in Anlehnung an Jenssen und Kongs- haug (2003) nach den folgenden Gleichungen errechnet:

$$E_{\text{NH}_3, \text{CAN}} = EF_{\text{NH}_3, \text{CAN}} \cdot M_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}} \cdot \gamma_{\text{NH}_3} \quad (\text{A1})$$

$$E_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}} = EF_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}} \cdot M_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}} \quad (\text{A2})$$

$$E_{\text{NO}_3\text{-N}, \text{CAN}} = EF_{\text{NO}_3\text{-N}, \text{CAN}} \cdot M_{\text{NO}_3\text{-N}, \text{CAN}} \quad (\text{A3})$$

mit

$E_{\text{NH}_3, \text{CAN}}$ NH₃-Emission (gasf.) bei der KAS- (CAN-) Produktion (in kg Tier⁻¹)

$EF_{\text{NH}_3, \text{CAN}}$ NH₃-Emissionsfaktor (gasf.) bei der KAS-Produktion ($EF_{\text{NH}_3, \text{CAN}} = 0,030 \text{ kg kg}^{-1}$)

$M_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}}$ Menge des NH₄-N im produzierten KAS (in kg Tier⁻¹)

$E_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}}$ NH₄-N-Emission (staubf.) bei der KAS-Produktion (in kg Tier⁻¹)

$EF_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}}$ NH₄-N-Emissionsfaktor (staubf.) bei der KAS-Produktion ($EF_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}} = 0,035 \text{ kg kg}^{-1}$)

$E_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}}$ NH₄-N-Emission (staubf.) bei der KAS-Produktion (in kg Tier⁻¹)

$EF_{\text{NO}_3\text{-N}, \text{CAN}}$ NO₃-N-Emissionsfaktor (staubf.) bei der KAS-Produktion ($EF_{\text{NO}_3\text{-N}, \text{CAN}} = 0,035 \text{ kg kg}^{-1}$)

$M_{\text{NO}_3\text{-N}, \text{CAN}}$ Menge des NO₃-N im angewendeten KAS (in kg Tier⁻¹)

Dabei ergeben sich die Mengen an NH₄-N und NO₃-N im angewendeten KAS wie folgt:

$$M_{\text{NO}_3\text{-N}, \text{CAN}} = M_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}} = \frac{1}{2} M_{\text{N}, \text{CAN}} \quad (\text{A4})$$

mit

$M_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}}$ Menge des NH₄-N im angewendeten KAS (in kg Tier⁻¹)

$M_{\text{NO}_3\text{-N}, \text{CAN}}$ Menge des NO₃-N im angewendeten KAS (in kg Tier⁻¹)

$M_{\text{N}, \text{CAN}}$ Menge des N im angewendeten KAS (in kg Tier⁻¹)

NH₃-Emissionen aus NH₄NO₃ können nur gemeinsam mit HNO₃ stattfinden, das dann aber aufgrund seiner Reaktivität offenbar nicht in die Umgebungsluft gerät. Die für die Produktion des zur Düngung benötigten KAS muss folgende Menge an AN bereitgestellt werden:

$$M_{\text{AN-N}} = \left(1 + \left(EF_{\text{NH}_3, \text{CAN}} + EF_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}}\right)\right) \cdot M_{\text{N}, \text{CAN}} \quad (\text{A5})$$

mit

$M_{\text{AN-N}}$ Menge des für die KAS-Herstellung zu produzierenden NH₄NO₃-N (in kg Tier⁻¹)

$EF_{\text{NH}_3, \text{CAN}}$ NH₃-Emissionsfaktor (gasf.) bei der KAS-Produktion ($EF_{\text{NH}_3, \text{CAN}} = 0,030 \text{ kg kg}^{-1}$)

$EF_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}}$ NH₄-N-Emissionsfaktor (staubf.) bei der KAS-Produktion ($EF_{\text{NH}_4\text{-N}, \text{CAN}} = 0,035 \text{ kg kg}^{-1}$)

$M_{\text{N}, \text{CAN}}$ Menge des N im angewendeten KAS (in kg Tier⁻¹)

Die Menge $\text{HNO}_3\text{-N}$, die für die AN-Synthese erforderlich ist, ergibt sich zu

$$M_{\text{HNO}_3\text{-N}} = \frac{1}{2} M_{\text{AN-N}} \cdot (1 + EF_{\text{NO}_2\text{-N, HNO}_3}) \quad (\text{A6})$$

mit

$M_{\text{HNO}_3\text{-N}}$ N-Menge in der für die AN-Synthese benötigten HNO_3 (in kg Tier⁻¹)

$M_{\text{AN-N}}$ Menge des zu produzierenden $\text{NH}_4\text{NO}_3\text{-N}$ (in kg Tier⁻¹)

$EF_{\text{NO}_2, \text{HNO}_3}$ Emissionsfaktor für NO_2 in der HNO_3 -Produktion ($EF_{\text{NO}_2, \text{HNO}_3} = 0,010 \text{ kg kg}^{-1}$ bezogen auf HNO_3)

$$EF_{\text{NO}_2\text{-N, HNO}_3} = EF_{\text{NO}_2, \text{HNO}_3} \cdot \frac{\gamma_{\text{HNO}_3}}{\gamma_{\text{NO}_2}} \quad (\text{A7})$$

mit

$EF_{\text{NO}_2\text{-N, HNO}_3}$ Emissionsfaktor für $\text{NO}_2\text{-N}$ in der HNO_3 -Produktion (in kg kg^{-1} , bezogen auf N)

$EF_{\text{NO}_2, \text{HNO}_3}$ Emissionsfaktor für NO_2 in der HNO_3 -Produktion ($EF_{\text{NO}_2, \text{HNO}_3} = 0,010 \text{ kg kg}^{-1}$ bezogen auf HNO_3)

γ_{HNO_3} stöchiometrischer Umrechnungsfaktor ($\gamma_{\text{HNO}_3} = 63/14 \text{ kg kg}^{-1} \text{ kmol kmol}^{-1}$)

γ_{NO_2} stöchiometrischer Umrechnungsfaktor ($\gamma_{\text{NO}_2} = 46/14 \text{ kg kg}^{-1} \text{ kmol kmol}^{-1}$)

Literatur

- ATT – Arbeitsgemeinschaft Trinkwassersperren (2011) Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft [online]. Zu finden in <[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/40873B16E2024175C125785A00350058/\\$file/110321_Branchenbild_dt_WaWi_2011_Langfassung_Internetdatei.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/40873B16E2024175C125785A00350058/$file/110321_Branchenbild_dt_WaWi_2011_Langfassung_Internetdatei.pdf)> [zitiert am 07.03.2016]
- Berk J (2008) Haltung von Masthühnern : Haltungsansprüche – Fütterung – Tiergesundheit. Frankfurt a M : DLG, 19 p, DLG-Merkbl 406
- 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 landwirtschaftl Nutztiere, 392 p
- Big Dutchman (2001) AUGERMATIC – das erfolgreiche Fütterungssystem für die Geflügelmast [online]. Zu finden in <<https://cdn.bigdutchman.de/fileadmin/content/poultry/products/de/Gefluegelhaltung-Gefluegelmast-Augermatic-Big-Dutchman-de.pdf>> [zitiert am 07.03.2016]
- Big Dutchman (2010) DryRapid – das vielseitig einsetzbare Fördersystem für Trockenfutter [online]. Zu finden in <<https://cdn.bigdutchman.de/fileadmin/content/pig/products/de/Schweinehaltung-Trockenfuetterung-DryRapid-Big-Dutchman-de.pdf>> [zitiert am 07.03.2016]
- BioGrace – BIOGRACE Harmonized Calculations of Biofuel Greenhouse Gas Emissions for Europe (2012) The BioGrace GHG calculation tool : a recognised voluntary scheme [online]. Zu finden in <<http://biograce.net/content/ghgcalculationtool/recognisedtool>> [zitiert am 07.03.2016]
- Brentrop F, Pallière Ch (2008) Energy efficiency and greenhouse gas emissions in European nitrogen fertilizer production and use [online]. Zu finden in <http://www.fertilizerseurope.com/fileadmin/user_upload/publications/agriculture_publications/Energy_Efficiency_V9.pdf> [zitiert am 07.03.2016]
- Damme K (2015) Faustzahlen zur Betriebswirtschaft. In: Geflügeljahrbuch 2015. Stuttgart : Ulmer, pp 71-95
- Dämmgen U, Amon B, Gyldenkerne S, Hutchings NJ, Kleine Klausung H, Haenel H-D, Rösemann C (2011) 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* 61(2):115-126

- Dämmgen U, Schulz J, Kleine Klausung H, Hutchings NJ, Haenel H-D, Rösemann C (2012a) Enteric methane emissions from German pigs. *Landbauforsch* 62(3):83-96
- 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(1/2):1-20
- Dämmgen U, Brade W, Meyer U, Haenel H-D, Rösemann C, Flessa H, Webb J, Strogies M, Schwerin M (2016) Gaseous emissions (greenhouse gases and ammonia) from protein production with German Holsteins - a mass flow analysis of the entire production – eingereicht
- EMEP (2013) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013 : technical report 12/2013 [online]. Zu finden in <<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>> [zitiert am 07.03.2016]
- EU Europäische Union (2004) Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte [online]. Zu finden in <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0026&from=EN>> [zitiert am 21.04.2016]
- Gehring K (2014) Unkrautkontrolle in Sojabohnen [online]. Zu finden in <www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/unkrautkontrolle_in_sojabohnen_pr_sentation_.pdf> [zitiert am 07.03.2016]
- GfE – Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (2005) Determination of digestibility as the basis for energy evaluation of feedstuffs for pigs. *Proc Soc Nutr Physiol* 14:207-215
- Graf T, Degner J, Zorn W, Pittorf I (2005) Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Öllein [online]. Zu finden in <<http://www.tll.de/ainfo/pdf/oell0805.pdf>> [zitiert am 07.03.2016]
- Haenel H-D, Rösemann C, Dämmgen U, Freibauer A, Döring U, Wulf S, Eurich-Menden B, Döhler H, Schreiner C, Osterburg B (2016) Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2014 : report on methods and data (RMD) Submission 2016. Braunschweig : Johann Heinrich von Thünen-Inst, 408 p, Thünen Rep 39
- Icha P (2014) Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2013 [online]. Zu finden in <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_23_2014_komplett.pdf> [zitiert am 07.03.2016]
- IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung (2012) Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMOM, Version 5.3) für die Emissionsberichterstattung 2013 : (Berichtsperiode 1990-2011) ; Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes [online]. Zu finden in <<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/428296/>> [zitiert am 07.03.2016]
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006a) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories : vol 2 Energy [online]. Zu finden in <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>> [zitiert am 07.03.2016]
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006b) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories : vol 3 Industrial processes and product use [online]. Zu finden in <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol3.html>> [zitiert am 07.03.2016]
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006c) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories : vol 4 Agriculture, forestry and other land use [online]. Zu finden in <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>> [zitiert am 07.03.2016]
- Jenssen TK, Kongshaug G (2003) Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertiliser production. York : International Fertiliser Society, 28 p, Proc Internat Fertiliser Soc 509
- Kirchgessner M, Kreuzer M, Müller HL, Windisch W (1991) Release of methane and carbon dioxide by the pig. *Agric Biol Res* 44:103-113
- Kirchgeßner M, Roth FX, Schwarz FJ, Stangl G (2008) Tierernährung : Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis. Frankfurt a M : DLG-Verl, 635 p

- Kreuzer M, Kirchgessner M, Roth FX (1991) Experimental evaluation of the capacity of the hindgut of sows to ferment purified dietary ingredients and of consequences in nitrogen metabolism. *Adv Animal Physiol Anim Nutr* 22:62-66
- KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2014) Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15. Darmstadt : KTBL, 832 p
- Liermann W, Berk A, Bösch V, Dänicke S (2015a) Effects of particle size and hydro-thermal treatment of feed on performance and stomach health in fattening pigs. *Arch Anim Nutr* 69(6):455-472
- Liermann W, Berk A, Bösch V, Dänicke S (2015b) Wirkung von Futtermischungen unterschiedlichen Veredelungs-niveaus auf Leistungs- und Gesundheitsmerkmale beim Broiler. In: Zeyner A, Kluth H, Bulang M, Bochnia M, Glatter M (eds) 13. Tagung Schweine- und Geflügelernährung : Tagungsband ; 24-26. November 1015, Lutherstadt Wittenberg. Halle : Univ, p 93-95
- Liermann W, Berk A, Bösch V, Dänicke S (2016) Effects of diets differing in protein source and technical treatment on digestibility, performance and visceral and biochemical parameters of fattening pigs. *Arch Anim Nutr* 70(3):190-208
- LWK-Nds – Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2013) Wirkung des Stickstoffs in organischen Nährstoffträgern (% von Gesamt-N) unter optimalen Bedingungen [online]. Zu finden in <<https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/2/nav/341/article/15868.html>> [zitiert am 07.03.2016]
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2001) Environmental indicators for agriculture : methods and results ; executive summary [online]. Zu finden in <www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/1916629.pdf> [zitiert am 07.03.2016]
- Pahle T, Köhler R, Halle I, Jeroch H, Gebhardt G (1985) Die Bestimmung der Rohproteinverdaulichkeit beim Hühnergeflügel mit der Alpha-NH₂-N-Methode. *Arch Tierernähr* 35:81-87
- Scholz R, Jeschar R, Jennes R, Fuchs, W (1994) Umweltgesichtspunkte bei der Herstellung und Anwendung von Kalkprodukten : Teil 1. Zement-Kalk-Gips 47(10):571-581
- Ullmann (1951-1969) Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie. München : Urban & Schwarzenberg
- van Zeist WJ, Marinussen M, Broekema R, Groen E, Kool A, Dolman M, Blonk H (2012a) LCI data for the calculation tool Feedprint for greenhouse gas emissions of feed production and utilization : bio-ethanol industry [online]. Zu finden in <blonkconsultants.nl/upload/pdf/PDV_rapporten/Bio-ethanol_industry.pdf> [zitiert am 07.03.2016]
- van Zeist WJ, Marinussen M, Broekema R, Groen E, Kool A, Dolman M, Blonk H (2012b) LCI data for the calculation tool Feedprint for greenhouse gas emissions of feed production and utilization : wet milling industry [online]. Zu finden in <blonkconsultants.nl/upload/pdf/PDV_rapporten/Wet_milling_industry.pdf> [zitiert am 07.03.2016]
- van Zeist WJ, Marinussen M, Broekema R, Groen E, Kool A, Dolman M, Blonk H (2012c) LCI data for the calculation tool Feedprint for greenhouse gas emissions of feed production and utilization : other products [online]. Zu finden in <blonkconsultants.nl/upload/pdf/PDV_rapporten/Other_products.pdf> [zitiert am 07.03.2016]
- van Zeist WJ, Marinussen M, Broekema R, Groen E, Kool A, Dolman M, Blonk H (2012d) LCI data for the calculation tool Feedprint for greenhouse gas emissions of feed production and utilization : crushing industry [online]. Zu finden in <blonkconsultants.nl/upload/pdf/PDV_rapporten/Crushing_industry.pdf> [zitiert am 07.03.2016]
- Wang S-Y, Huang DJ (2005) Assessment of greenhouse gas emissions from poultry enteric fermentation. *Asian-Aust J Anim Sci* 18:873-878
- Wolf P, Kamphues J (2007) Magenulcera bei Schweinen : Ursachen und Maßnahmen zur Vermeidung. *Übers Tierernähr* 35:161-190

