

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Landwirtschaftliche Fakultät

The logo consists of the letters 'U', 'S', and 'L' in a stylized, hand-drawn font. The 'U' is green, the 'S' is black, and the 'L' is red. Below the letters are two parallel green diagonal lines.

Lehr- und Forschungsschwerpunkt

„Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“

Forschungsbericht

Nr. 192

Einzelbetriebliche Modellierung der Auswirkung von
novellierter Düngegesetzgebung und agrarpolitischer
Entwicklung auf landwirtschaftliche Betriebe in NRW

Verfasser:

Till Kuhn, Zara Grauer, Karin Holm-Müller

Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik

Herausgeber: Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn

Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776

www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Bonn, Mai 2019

ISSN 1610-2460

Projektleitung: Prof. Dr. Karin Holm-Müller

Projektbearbeiter: Prof. Dr. Karin Holm-Müller, Dipl.-Ing. agr. Till Kuhn, B.Sc. Zara Grauer

Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik

Nussallee 21, 53115 Bonn

till.kuhn@ilr.uni-bonn.de

KUHN T., GRAUER, Z.; HOLM-MÜLLER, K. (2019): Einzelbetriebliche Modellierung der Auswirkung von novellierter Düngegesetzgebung und agrarpolitischer Entwicklung auf landwirtschaftliche Betriebe in NRW. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 192, 97 Seiten.

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
1. Einleitung	1
2. Die Reform des Düngerechts 2017.....	6
3. Material und Methoden	10
3.1 Einzelbetriebliches Modell FarmDyn.....	11
3.1.1 Maßnahmen der DüV und Anpassungsstrategien.....	13
3.1.2 Berechnung der Anpassungskosten	17
3.1.3 Erfassung der Umweltwirkungen	17
3.2 Modellierung der Betriebspopulation und Sensitivitätsanalyse	18
3.2.1 Latin Hypercube Sampling	19
3.2.2 Statistische Auswertung.....	20
3.3 Modellverknüpfung zwischen SIMPLACE und FarmDyn	20
3.4 Datengrundlage für die untersuchten Betriebe	22
3.4.1 Population	22
3.4.2 Betriebstypologie	24
4. Ergebnisse.....	28
4.1 Kostenabschätzung für Population.....	28
4.1.1 Auswirkung der Betriebseigenschaften auf die Kosten	28
4.1.2 Meta-Model für systematische Sensitivitätsanalysen	33
4.2 Kosten und Umweltwirkung typischer Betriebe	35
4.2.1 Schweinemastbetriebe.....	35
4.2.2 Schweinemastbetrieb mit Biogasanlage	40
4.2.3 Sauenhaltung.....	42
4.2.4 Milchviehbetriebe	44
4.2.5 Ackerbaubetriebe	48

5.	Diskussion	52
5.1	Ergebnisse	52
5.2	Methodisches Vorgehen	54
5.2.1	Vergleich mit beobachteten Nährstoffsalden.....	55
5.2.2	Einzelbetriebliches Modell FarmDyn	58
5.2.3	Betriebsgenerierung	59
5.2.4	Datenquellen	59
5.2.5	Modellverknüpfung.....	61
5.3	Novelle der Düngeverordnung im Jahre 2020.....	61
6.	Zusammenfassung	65
7.	Schlussfolgerungen für die Umsetzung in die Praxis.....	69
9.	Anhang	81
10.	Konsequenzen für evtl. weitere Forschungsaktivitäten.....	86
11.	Liste der Veröffentlichungen und Präsentationen	87
12.	Kurzfassung.....	88
13.	Executive Summary.....	89

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Vereinfachte Übersicht über Emissionen, Umweltwirkung und relevante nationale und europäische Vorgaben mit Bezug auf die Düngeverordnung	2
Abbildung 2	Überblick zur Methodik zur Kostenabschätzung in der Population und der Analyse der ökologischen und ökonomischen Auswirkung für typische Betriebe.....	10
Abbildung 3	Übersicht über das ökonomische, einzelbetriebliche Modell FarmDyn.....	12
Abbildung 4	Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens zur Abschätzung der Kosten in der Betriebspopulation und Erstellung der Sensitivitätsanalyse	19
Abbildung 5	Schematische Darstellung der Verknüpfung von SIMPLACE und FarmDyn .	21
Abbildung 6	Konzept der Typologie landwirtschaftlicher Betriebe in Nordrhein-Westfalen zur Analyse der Düngeverordnung.....	25
Abbildung 7	Anpassungskosten an die Düngeverordnung 2017 für spezialisierte Schweinemastbetriebe in Nordrhein-Westfalen	29
Abbildung 8	Anpassungskosten an die Düngeverordnung 2017 für spezialisierte Milchviehbetriebe in Nordrhein-Westfalen.....	32
Abbildung 9	Häufigkeitsverteilung des mehrjährigen Stickstoffsaldo laut Nährstoffvergleich ausgewählter Betrieb in Abhängigkeit der organischen Düngung	55
Abbildung 10	Häufigkeitsverteilung des mehrjährigen Phosphatsaldo laut Nährstoffvergleich ausgewählter Betrieb in Abhängigkeit der organischen Düngung	56

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Wichtigste Maßnahmen der Düngeverordnung 2007 und 2017.....	6
Tabelle 2	Übersicht über Maßnahmen der Düngeverordnung und korrespondierende Anpassungsstrategien in FarmDyn.....	15
Tabelle 3	Emissionsfaktoren für Ammoniak, Distickstoffoxid, Stickstoffoxide und Distickstoff bezogen auf Gesamtstickstoff und Ammonium-Stickstoff für Schweinemastbetriebe	18
Tabelle 4	Merkmale von Milchvieh- und Schweinemastbetrieben zur Generierung der Betriebspopulation.....	23
Tabelle 5	Werte für die Sensitivitätsanalyse	24
Tabelle 6	Prozentualer Anteil der ausgewählten Betriebstypen an landwirtschaftlichen Kenngrößen in NRW	27
Tabelle 7	Gruppierung der Betriebe nach den Anpassungskosten an die Düngeverordnung 2017	31
Tabelle 8	Statische Meta-Modelle für systematische Sensitivitätsanalysen	34
Tabelle 9	Betriebsindikatoren für typische Schweinemastbetriebe unter Düngeverordnung 2007 und 2017	38
Tabelle 10	Betriebsindikatoren für einen Betrieb mit Biogasanlage und Schweinemast unter Düngeverordnung 2007 und 2017	41
Tabelle 11	Betriebsindikatoren für typischen Betrieb mit Sauenhaltung unter Düngeverordnung 2007 und 2017	43
Tabelle 12	Betriebsindikatoren für typische Milchviehbetriebe unter Düngeverordnung 2007 und 2017	47
Tabelle 13	Betriebsindikatoren für typische Ackerbaubetriebe unter Düngeverordnung 2007 und 2017	51

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

€	Euro
Ack_kW	Ackerbaubetrieb ohne Wirtschaftsdüngerimport
Ack_WR	Ackerbaubetrieb mit Winterraps
Ack_ZR	Ackerbaubetrieb mit Zuckerrüben
ASE	Agrarstrukturerhebung
BKR	Boden-Klima-Raum
ct	Cent
DüV	Düngeverordnung
EKM	Energiekorrigierte Milch
GVE	Großvieheinheiten
LHS	Latin Hypercube Sampling
MDÄ	Mineraldüngeräquivalente
Mil_gr	Großer Milchviehbetrieb
Mil_int	Intensiver Milchviehbetrieb
Mil_kl	Kleiner Milchviehbetrieb
N	Stickstoff
N ₂	Distickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffoxid
NO ₃ ⁻	Nitrat

NRW	Nordrhein-Westfalen
P	Phosphor
P ₂ O ₅	Phosphat
Schw_ex	Extensiver Schweinemastbetrieb
Schw_in	Intensiver Schweinemastbetrieb
Sch_mit	Mittelintensiver Schweinemastbetrieb
TAN	Ammonium-Stickstoff
THG	Treibhausgasemissionen

1. Einleitung

Die Düngeverordnung (DüV) ist das zentrale agrar- und umweltpolitische Instrument in Deutschland, um den Einsatz von Mineral- und Wirtschaftsdüngern auf landwirtschaftlichen Betrieben zu reglementieren. Sie ist weitestgehend die nationale Implementierung der EU-Nitratrictlinie (Europäischer Rat 1991), die es zum Ziel hat, Gewässer vor dem Eintrag von Nährstoffen aus der Landwirtschaft zu schützen. Im Juni 2017 wurde die überarbeitete DüV nach einem mehrjährigen Novellierungsprozess verabschiedet. Vorausgegangen war ein Vertragsverletzungsverfahren durch die EU-Kommission gegen Deutschland, da im Zusammenhang mit der Nitratrictlinie stehende Umweltziele verfehlt (BMU & BMELV 2012) und keine entsprechenden Gegenmaßnahmen eingeleitet wurden.

Die DüV wirkt auf verschiedene Formen von reaktivem Stickstoff (N) sowie auf Phosphor (P) und ist ein zentrales Instrument zum Erreichen von zahlreichen Umweltzielen (Abbildung 1). Als nationale Implementierung der Nitratrictlinie liegt der Schwerpunkt auf der Reduktion des Eintrags von Nitrat (NO_3^-) in das Grundwasser sowie in Oberflächengewässer. Grundwasser stellt die primäre Trinkwasserquelle in Deutschland dar, welche durch NO_3^- -Einträge gefährdet wird. Die Aufnahme von NO_3^- kann sich negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken (Townsend *et al.* 2003). Hohe NO_3^- -Konzentrationen im Rohwasser stellen keine direkte Gesundheitsgefahr dar, erhöhen aber die Kosten der Trinkwasserbereitstellung durch Aufbereitung oder Mischen. NO_3^- -Einträge führen darüber hinaus zur Eutrophierung von Seen und Meeren, was mit einem Verlust der aquatischen Biodiversität einhergehen kann (Grizzetti *et al.* 2011). Entsprechende Umweltziele sind unter anderem in der Wasserrahmenrichtlinie (Europäisches Parlament; Europäischer Rat 2000) und Meeresstrategierahmenrichtlinie (Europäisches Parlament; Europäischer Rat 2008) festgehalten. Die Wasserrahmenrichtlinie beinhaltet auch Ziele im Hinblick auf den P-Eintrag, der ebenfalls zur Eutrophierung von Gewässern führen kann (Bennett *et al.* 2001) und durch die DüV limitiert wird. Darüber hinaus macht die DüV Vorgaben, zur Reduzierung der Ausgasungen von Ammoniak (NH_3). Diese können nach der Deposition zum Verlust von terrestrischer Biodiversität führen (Dise *et al.* 2011). NH_3 ist jedoch auch eine Vorläufersubstanz von gesundheitsgefährdendem Feinstaub (Townsend *et al.* 2003). Im Rahmen der Richtlinie über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe (Europäisches Parlament; Europäischer Rat 2016) besteht eine NH_3 -Obergrenze für Deutschland, welche eingehalten werden muss. Reaktiver N trägt in Form von Distickstoffmonoxid (N_2O) zum Treibhauseffekt und zur Erderwärmung bei. Die DüV enthält keine direkten Maßnahmen zur Reduktion der N_2O -Emissionen, jedoch wirkt sich eine allgemeine Reduktion des N-Einsatzes und eine Erhöhung der N-Effizienz verringern aus.

Daher ist die DüV ein wichtiges Instrument, um den Beitrag der Landwirtschaft zum Erreichen der Reduktionsziele von Treibhausgasemissionen (THG) zu realisieren.

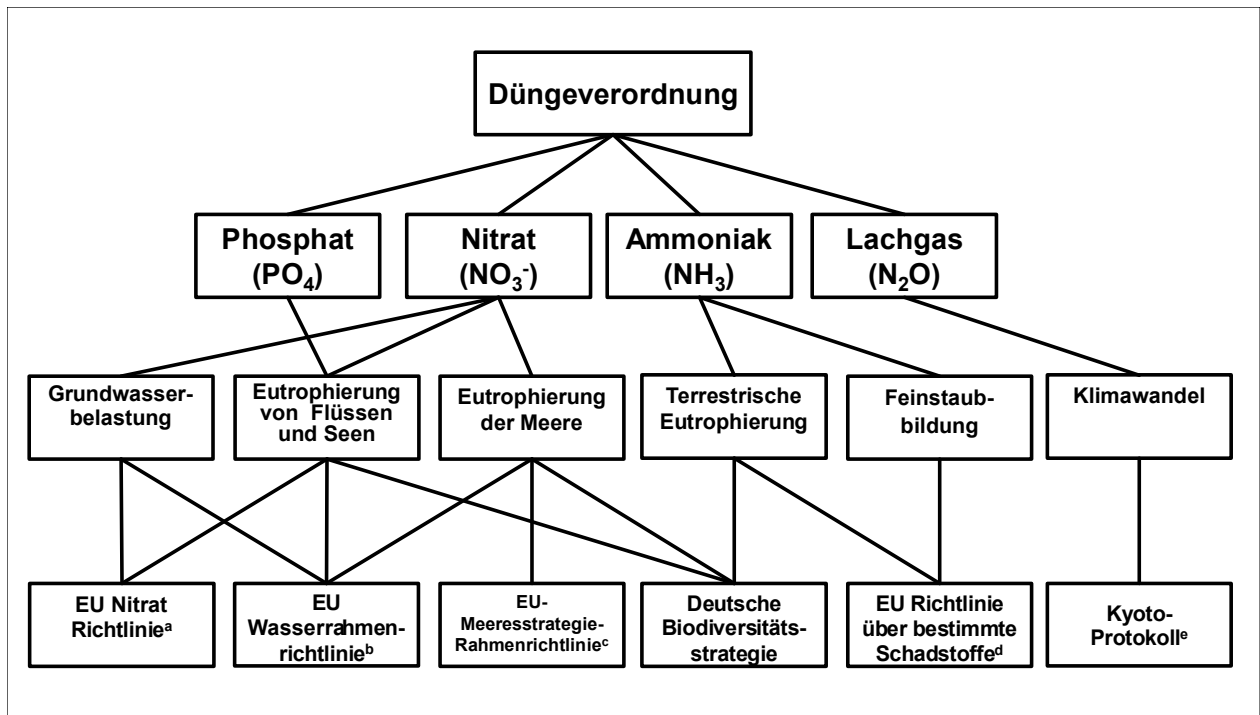


Abbildung 1 Vereinfachte Übersicht über Emissionen, Umweltwirkung und relevante nationale und europäische Vorgaben mit Bezug auf die Düngerverordnung

Quelle: Eigene Darstellung; ^a Bekämpfung der Gewässerverunreinigung durch Nitrate aus der Landwirtschaft (91/676/EWG); ^b Richtlinie zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (2000/60/EG); ^c Richtlinie zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (2008/56/EG); ^d Richtlinie über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe (2016/2284); ^e Völkerrechtlich verbindlichen Vertrag der Vereinten Nationen zur Eindämmung des Klimawandels, in Kraft getreten 2005

Zahlreiche der beschriebenen und in Abbildung 1 dargestellten Umweltziele im Zusammenhang mit N und P werden in Nordrhein-Westfalen (NRW) und Deutschland verfehlt. So wurde bundesweit im Zeitraum von 2012 bis 2014 an 18% der repräsentativen Messstellen der Zielwert von 50 mg NO₃⁻ im Grundwasser nicht eingehalten und es findet sich kein eindeutig abnehmender Trend (BMUB & BMEL 2016). Auch in NRW wurde an 17% der Messstellen der Zielwert im Jahr 2017 überschritten (MULNV 2018). Zielkonzentrationen bezüglich Oberflächengewässer werden in Deutschland und NRW ebenfalls häufig nicht eingehalten. Im Zeitraum von 2012 bis 2014 verfehlten in NRW 34% der Oberflächenwasserkörper den Zielwert für P, 19% den Wert für Nitrit, 17% den Wert für Ammonium und 2% den für NO₃⁻. Während ein Großteil des N-Eintrags auf landwirtschaftliche Pfade zurückzuführen ist, ist jedoch bei der P-Belastung die Einleitung von Abwässern für etwa die Hälfte der Einträge verantwortlich (LWK NRW 2018). Die

Umweltziele für NH_3 beziehen sich nicht auf Schadstoffkonzentrationen, sondern auf eine nationale Emissionsobergrenze. Bis 2030 müssen in Deutschland die NH_3 -Emissionen um 29% im Vergleich zum Jahr 2005 reduziert werden (Europäisches Parlament; Europäischer Rat 2016), was nach aktuellen Berechnungen einer Obergrenze von 444 Gigagramm $\text{NH}_3 \text{ a}^{-1}$ entspricht (TI o.D.). Die aktuellen Emissionen liegen jedoch bei 663 Gigagramm $\text{NH}_3 \text{ a}^{-1}$ (UBA 2018) und verdeutlichen den hohen Reduktionsbedarf. Es gibt keine verpflichtenden Ziele für die Verringerung von THG-Emissionen in der Landwirtschaft, jedoch ist ihr Beitrag zu übersektoralen Reduktionsanstrengungen regelmäßig auf der politischen Agenda (BMUB 2014).

Die novellierte DüV stellt eine deutliche Verschärfung der Vorgaben für landwirtschaftliche Betriebe dar. Ihre ökonomischen und ökologischen Auswirkungen sind bisher jedoch wenig erforscht. Im Rahmen des Novellierungsprozesses wurden die Umweltfolgen qualitativ abgeschätzt (BMUB 2014), detaillierte quantitative Abschätzungen liegen jedoch noch nicht vor. Auch hinsichtlich der Kosten, die durch die DüV 2017 entstehen gibt es nur wenige Forschungsergebnisse. Erste aggregierte und vereinfachte Abschätzungen zeigen eine relevante Kostenbelastung landwirtschaftlicher Betriebe (BMEL 2017d; Karl & Noleppa 2017), lassen jedoch keine Rückschlüsse auf die Verteilung der Kosten in der Betriebspopulation zu. Wissen über die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der DüV 2017 ist relevant für zukünftige Novellierungsprozesse, eine effiziente Gestaltung von Vollzugsmechanismen sowie von unterstützenden Maßnahmen für landwirtschaftliche Betriebe und die Verhinderung von ungewollten Effekten wie Emissionsverlagerungen.

Der vorliegende Projektbericht ist im Rahmen des Clusterprojektes „Skalenübergreifende Modellierung von Änderungen der Agrarstruktur und landwirtschaftlichen Stoffflüssen in Regionen von Nordrhein-Westfalen“ entstanden, das vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) im Rahmen des Lehr- und Forschungsschwerpunktes "Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft" gefördert wurde. Wie bereits skizziert, ist die Novelle der DüV für NRW von besonderer Bedeutung, da zahlreiche Umweltziele bezüglich N und P-Eintrag aus der Landwirtschaft verfehlt werden. Darüber hinaus lässt die landwirtschaftliche Struktur in NRW vermuten, dass sich zahlreiche Betriebe an die strengeren Vorgaben anpassen müssen. So ist das Bundesland in den nordwestlichen Landkreisen durch eine hohe Konzentration von Veredelungs- und intensiven Milchviehbetrieben charakterisiert. Diese müssen sich vermutlich an die verringerten Nährstoffsalden der DüV 2017 anpassen. Besonders in diesen Regionen bestand schon in der Vergangenheit die Notwendigkeit, Nährstoffe überbetrieblich zu verwerten. Bereits unter der DüV 2007 wurden hohe Mengen an Wirtschaftsdünger transportiert (LWK NRW 2014), die in Zukunft voraussichtlich weiter ansteigen werden. Darüber hinaus gibt es in NRW 620 Biogasanlagen (LWK NRW o.D.,

Wert bezieht sich auf 2016), die im Rahmen der DüV 2017 ihre Gärreste stärker anrechnen und vermutlich exportieren müssen. Es existieren in NRW jedoch auch zahlreiche kleinere Betriebe, die sich zwar durch oftmals geringeren Tierbesatz nicht an die strengeren Vorgaben der DüV 2017 zu Nährstoffsalden anpassen müssen, jedoch oftmals ältere und unter der DüV 2017 nicht mehr zulässige Technik zur Wirtschaftsdüngerausbringung nutzen.

Vor diesem Hintergrund ist das übergeordnete Ziel des Clusterprojektes die gekoppelte Simulation und Analyse von Nährstoffflüssen auf Ebene des Pflanzenbestandes, des landwirtschaftlichen Betriebes und der Region. Die Auswirkungen von der DüV 2017 werden quantifiziert und mögliche politikrelevante Handlungsempfehlungen abgeleitet. Dabei werden sowohl bio-physikalische als auch bio-ökonomische Modelle eingesetzt, die bereits in der Vergangenheit erfolgreich für die Beantwortung diverser Forschungsfragen genutzt wurden (z.B. Lengers *et al.* 2014; Gaiser *et al.* 2013). Die drei unterschiedlichen Skalen finden sich dabei in den drei Teilprojekten wieder. Der vorliegende Projektbericht behandelt die einzelbetriebliche Betrachtungsweise von Teilprojekt 2, welches folgende Forschungsziele aufweist:

- Analyse der einzelbetrieblichen Auswirkungen der DüV 2017 und der agrarpolitischen Rahmenbedingungen auf ausgewählte Betriebstypen in NRW. Dabei werden sowohl die Effekte auf ökonomische Kenngrößen als auch auf Umweltwirkungen untersucht.
- Durchführung systematischer Sensitivitätsanalysen für Betriebe in NRW zur Erfassung der Auswirkungen von sich ändernden Rahmenbedingungen, wie beispielsweise veränderter Input- und Outputpreise.
- Verknüpfung der Modelle SIMPLACE (Teilprojekt 1), FarmDyn und ABMSIM (Teilprojekt 3) zur Entwicklung eines aussagekräftigen Modellverbundes und dessen Ausrichtung auf die landwirtschaftliche Struktur und naturräumlichen Gegebenheiten in NRW.
- Ableitungen von Empfehlungen für die Agrar- und Umweltpolitik in NRW aus den generierten Ergebnissen.

Der vorliegende Bericht ist wie folgt gegliedert. In Kapitel 2 werden die DüV 2007 und 2017 gegenübergestellt. Dabei liegt der Fokus auf den Maßnahmen, die mit den verwendeten Modellen analysiert werden können. In Kapitel 3 wird das einzelbetriebliche Modell FarmDyn vorgestellt und im Hinblick auf die vorliegende Analyse beschrieben. Hierbei wird auch auf die Verknüpfung mit dem pflanzenbaulichen Modell eingegangen, eine detaillierte Beschreibung dieses ist jedoch dem Bericht von Teilprojekt 1 zu entnehmen. Die Beschreibung der Methodik enthält eine Betriebstypologie für NRW, die im Zuge des

Projektes entwickelt wurde. Kapitel 4 stellt die Ergebnisse vor. Das Kapitel gliedert sich in die Analyse der Anpassungskosten in der Population und die Analyse der ökonomischen sowie ökologischen Auswirkung der DüV auf typische Betriebe. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse und das methodische Vorgehen diskutiert. Kapitel 6 und 7 fassen das Forschungsvorhaben zusammen und geben konkrete Politikempfehlungen. Die letzten Kapitel sind dabei so gestaltet, dass sie unabhängig von den vorangegangenen Ausführungen zu verstehen sind.

2. Die Reform des Düngerechts 2017

Die DüV besteht aus zahlreichen, teilweise aufeinander abgestimmten Maßnahmen. Die vorliegende Studie konzentriert sich auf die wichtigsten Elemente der DüV, die mit dem methodischen Ansatz der einzelbetrieblichen Modellierung und basierend auf Daten der offiziellen Agrarstatistik abgebildet werden können. Im Folgenden werden die Maßnahmen der DüV 2007 und 2017 gegenübergestellt, Tabelle 1 fasst die wichtigsten Unterschiede zusammen. Die detaillierte Implementierung der Maßnahmen in FarmDyn wird in Kapitel 3.1.1 beschrieben.

Tabelle 1 Wichtigste Maßnahmen der Düngeverordnung 2007 und 2017

Maßnahme	Düngeverordnung 2007	Düngeverordnung 2017
Düngebedarfsermittlung	Unspezifizierte und nicht-bindende Düngebedarfsermittlung	Spezifizierte und bindende Düngebedarfsermittlung
Ausbringungsobergrenze für organischen Stickstoff	170 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	170 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ N von tierischer und pflanzlicher Herkunft (Biogasgärreste pflanzlichen Ursprungs); Verringerung der anrechenbaren Verlustfaktoren
Nährstoffbilanz – zulässige Salden	60 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ 20 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ a ⁻¹	50 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ 10 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ a ⁻¹ ; 0 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ a ⁻¹ auf P-hochversorgten Böden ^b
Nährstoffbilanz - Methodik	Flächenbilanz nach Feld-Stall Ansatz	Flächenbilanz nach Feld-Stall-Ansatz mit Plausibilisierung der Grundfutterabfuhr; schrittweise Einführung der Stoffstrombilanz ^c
Sperrfristen	Grünland 15.11-31.1 Ackerland 1.11-31.1	Grünland 1.11-31.1 Ackerland 1.10-31.1
Sperrfristen – nach der Ernte der Hauptfrucht	Organische Nährstoffapplikation begrenzt auf 40 kg Ammonium N oder 80 kg gesamt N für Zwischenfrüchte, Winterfrüchte und Strohrotte	Nährstoffapplikation begrenzt auf 30 kg Ammonium-N und 60 kg gesamt N zu Zwischenfrüchten, Winterraps, Feldfutter und Wintergeste nach Getreide
Technik zur Wirtschaftsdünger-ausbringung	Breitverteiler erlaubt	Breitverteiler verboten außer auf Brache mit unverzüglicher Einarbeitung; verpflichtend auf Ackerland ab 2020, auf Grünland ab 2025
Minimale Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger	6 Monate ^a	6 Monate, 9 Monate für Betriebe mit >3 Großvieheinheiten ha ⁻¹

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BMELV (2007) und BMEL (2017c); ^a definiert im Bundesgesetz über die Anforderungen an Güllelager; ^b Nach der DüV 2017 Böden welche 20 Milligramm Phosphat je 100 Gramm Boden nach dem Calcium-Acetat-Lactat-Extraktionsverfahren (CAL-Methode) überschreiten; ^c Die Stoffstrombilanz ist kein Teil der Düngeverordnung sondern in der Stoffstrombilanzverordnung festgehalten; N – Nitrat; P – Phosphor; P₂O₅ – Phosphat

Die DüV beinhaltet verschiedene Grenzwertberechnungen, die den Einsatz von Mineral- und Wirtschaftsdünger limitieren. Sowohl unter der DüV 2007 als auch unter der DüV 2017 sind Betriebe dazu verpflichtet eine Flächenbilanz für N und Phosphat (P₂O₅) zu errechnen. Dabei werden der Nährstoffeintrag durch tierische Ausscheidungen und Mineraldünger sowie der Nährstoffaustrag durch Ernteentzüge gegenübergestellt. Die Differenz darf die festgelegten Grenzwerte im mehrjährigen Mittel nicht überschreiten. Im Rahmen der DüV 2017 wurden diese Grenzwerte für N von 60 auf 50 kg ha⁻¹ und für P₂O₅ von 20 auf 10 kg ha⁻¹ gesenkt.

Darüber hinaus darf auf Flächen mit einer hohen P-Versorgungsstufe des Bodens kein Überschuss vorliegen. Die Versorgung der Böden ist durch Bodenproben festzustellen. N aus tierischen Ausscheidungen wird nach Abzug der vorgegebenen Verlustfaktoren, welche im Rahmen der DüV-Novelle verringert wurden, angerechnet. Darüber hinaus wurde für rinderhaltende Betriebe die sogenannte plausibilisierte Flächenbilanz eingeführt. Bei dieser wird der Ertrag von Futteranbauflächen nicht durch den Landwirt angegeben, sondern aus dem Futterbedarf des Tierbestandes errechnet. Dies soll Überschätzungen der Grundfutterabfuhr entgegenwirken (siehe auch Kapitel 5.2.1).

Im Rahmen der Überarbeitung der DüV wird schrittweise eine Bilanzierung nach Hof- oder Stoffstromansatz eingeführt. Diese ist in einer eigenen Rechtsverordnung, der sogenannten Stoffstrombilanzverordnung, festgehalten (BMEL 2017a). Dabei werden die Nährstoffflüsse in und aus dem Betrieb erfasst und gegenübergestellt. Wie bei der Flächenbilanz darf der Bilanzsaldo vorgegebene Grenzwerte nicht übersteigen, bisher liegen diese jedoch nur für N vor. Der Saldo darf 175 kg N ha^{-1} nicht überschreiten oder muss unterhalb eines betriebsindividuell berechneten Grenzwertes liegen. Der Betrieb kann hier die günstigeren Werte auswählen. Zunächst gilt die Stoffstrombilanz nur für bestimmte Betriebe, die beispielsweise mehr als 2,5 Großvieheinheiten (GVE) ha^{-1} aufweisen. In Zukunft soll die Stoffstrombilanz jedoch für mehr Betriebe verpflichtend werden.

Neben den zulässigen Nährstoffsalden müssen Betriebe die Ausbringungsobergrenze für organischen N von 170 kg N ha^{-1} im Betriebsdurchschnitt einhalten. Dieser Grenzwert wird direkt von der Nitratrichtlinie vorgegeben. Er leitet sich aus der Ausscheidung des Tierbestandes ab und lässt das Anrechnen von Stall- und Lagerverlusten mit festen Emissionsfaktoren zu. Im Rahmen der DüV 2017 wurden diese Emissionsfaktoren für einige Tierarten abgesenkt, was einer Verringerung des Grenzwertes entspricht. Darüber hinaus müssen unter der novellierten DüV auch Gärreste pflanzlichen Ursprungs in die Ausbringungsobergrenze eingerechnet werden. Bisher beschränkte sich diese auf tierischen sowie organischen N und ignorierte N aus der Vergärung von Energiepflanzen. Im Rahmen der sogenannten Derogation können durch die EU-Kommission höhere Ausbringungsmengen zugelassen werden, wenn das Erreichen von Umweltzielen nicht gefährdet wird. In der Vergangenheit waren für Grünland unter bestimmten Voraussetzungen Ausbringungsmengen von 230 kg N ha^{-1} erlaubt. Die Derogation wurde im Rahmen des Vertragsverletzungsverfahrens ausgesetzt, ihre Wiedereinführung ist jedoch in der DüV 2017 angelegt. Zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Studie ist die Derogation noch nicht zulässig und es liegen keine Informationen über ihre Ausgestaltung vor. Daher wird sie in den Analysen nicht berücksichtigt.

Die DüV 2017 schreibt darüber hinaus eine verbindliche Düngebedarfsermittlung nach festgelegtem Verfahren vor. Dieses Instrument war bereits in der DüV 2007 angelegt, jedoch weder verbindlich noch klar vom Gesetzgeber definiert. Betriebe müssen nach einer Sollwertmethode den N-Bedarf der angebauten Kulturen errechnen. Dieser ergibt sich aus dem Ertrag der vergangenen drei Jahre. Verschiedene N-Quellen wie Düngung mit Mineral- und Wirtschaftsdünger, Mineralisierung aus dem N-Pool im Boden oder Vorfruchteffekte müssen angerechnet werden. Der eingesetzte N-Dünger darf den Pflanzenbedarf nicht überschreiten. Die Düngebedarfsermittlung kann somit wie eine betriebliche N-Quote, die eingehalten werden muss, angewendet werden. Für P_2O_5 ist die Düngebedarfsermittlung ebenfalls vorgeschrieben, jedoch ist sie nicht klar definiert und entspricht methodisch der Überschussberechnung.

Darüber hinaus enthält die DüV Sperrfristen für die Anwendungen von Düngemitteln im Herbst und Winter. Hintergrund ist, dass in diesem Zeitraum in der Regel kein Nährstoffbedarf besteht und das Risiko von Verlusten in die Umwelt besonders hoch ist (Cameron *et al.* 2013). Im Rahmen der DüV 2017 wurden die festen Sperrfristen auf Grünland und Ackerland ausgeweitet. Darüber hinaus wird der Einsatz von N nach der Ernte der Hauptfrucht und vor den festen Sperrfristen eingeschränkt. So wurde die maximal eingesetzte Menge von 80 auf 60 kg N ha⁻¹ reduziert und die Kulturen, die gedüngt werden dürfen, eingeschränkt. Düngung ist somit nur noch bei Winterraps, Feldfutter, Wintergerste nach Getreide in der Fruchtfolge und bei Zwischenfrüchten möglich. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu erwähnen, dass in NRW durch den sogenannten Herbstlerlass bereits unter der DüV 2007 die Düngung im Herbst stark eingeschränkt war. Es kommt somit nur zu einer geringen zusätzlichen Verschärfung durch die DüV 2017.

Die Sperrfristen stehen im Zusammenhang mit den Lagerkapazitäten, die Betriebe in Abhängigkeit des Tierbestandes vorweisen müssen. Sie muss ausreichen, um die Zeiten im Herbst und Winter, in welchen die Ausbringung von Wirtschaftsdünger untersagt ist, zu überbrücken. Bisher waren die Lagerkapazitäten auf Landesebene vorgegeben und mussten der Ausscheidung des Tierbestands von 6 Monaten entsprechen. Im Zuge der Novelle sind die Regelungen zur Lagerkapazität in die DüV aufgenommen worden. Die Vorgabe von 6 Monaten bleibt bestehen, jedoch müssen Betriebe mit mehr als 3 GVE ha⁻¹ eine Lagerkapazität von 9 Monaten nachweisen.

Darüber hinaus schreibt die DüV vor, welche Techniken für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger angewendet werden dürfen. Hintergrund ist, dass die Ausbringungstechnik einen starken Einfluss auf die gasförmigen NH₃-Verluste hat (Webb *et al.* 2010). Unter der DüV 2007 waren Breitverteiler, die zu besonders hohen Emissionen führen können, noch zulässig. Im Rahmen der Novelle ist nach Übergangsfristen diese Technik auf bestelltem

Ackerland und Grünland verboten. Die Ausbringung muss unter der DüV 2017 streifenförmig erfolgen, zum Beispiel durch den Einsatz von Schleppschuh- oder Schleppschlauchtechnik. Auf unbestelltem Ackerland ist der Einsatz von Breitverteilern weiterhin zulässig, jedoch muss der Wirtschaftsdünger eingearbeitet werden. Die Pflicht zur Einarbeitung, die nur auf unbestelltem Ackerland möglich ist, bestand bereits unter der DüV 2007, jedoch war das Zeitfenster nicht klar definiert. Unter der DüV 2017 wird eine Einarbeitung innerhalb von 4 Stunden vorgeschrieben. Grund dafür ist, dass sich der Zeitraum zwischen Ausbringung und Einarbeitung stark auf die NH_3 -Verluste auswirkt (Döhler *et al.* 2002).

Die DüV 2017 beinhaltet ebenfalls Verschärfungen bezüglich des Vollzugs. Im Rahmen der Analysen wird jedoch von einer Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben ausgegangen, da keine repräsentativen Daten über Verstöße auf Betriebsebene vorliegen. Darüber hinaus werden verschärfte Maßnahmen im Zusammenhang mit Wetter- und Standortfaktoren, wie z.B. Gewässerrandstreifen oder Wirtschaftsdüngerausbringung bei nassem oder gefrorenem Bodenzustand, nicht in die Analyse einbezogen. Die daraus resultierenden Limitierungen werden in der Diskussion in Kapitel 5 aufgegriffen.

3. Material und Methoden

Im Zentrum von Teilprojekt 2 steht das einzelbetriebliche Modell FarmDyn, welches zur Analyse der ökonomischen und ökologischen Auswirkung der DüV Novelle auf Betriebsebene genutzt wird. Die Fragestellungen werden dabei in zwei unterschiedlichen Modellierungskonzepten bearbeitet, welche schematisch in Abbildung 2 zusammengefasst werden und sich auch in der Struktur des Berichtes wiederfinden.

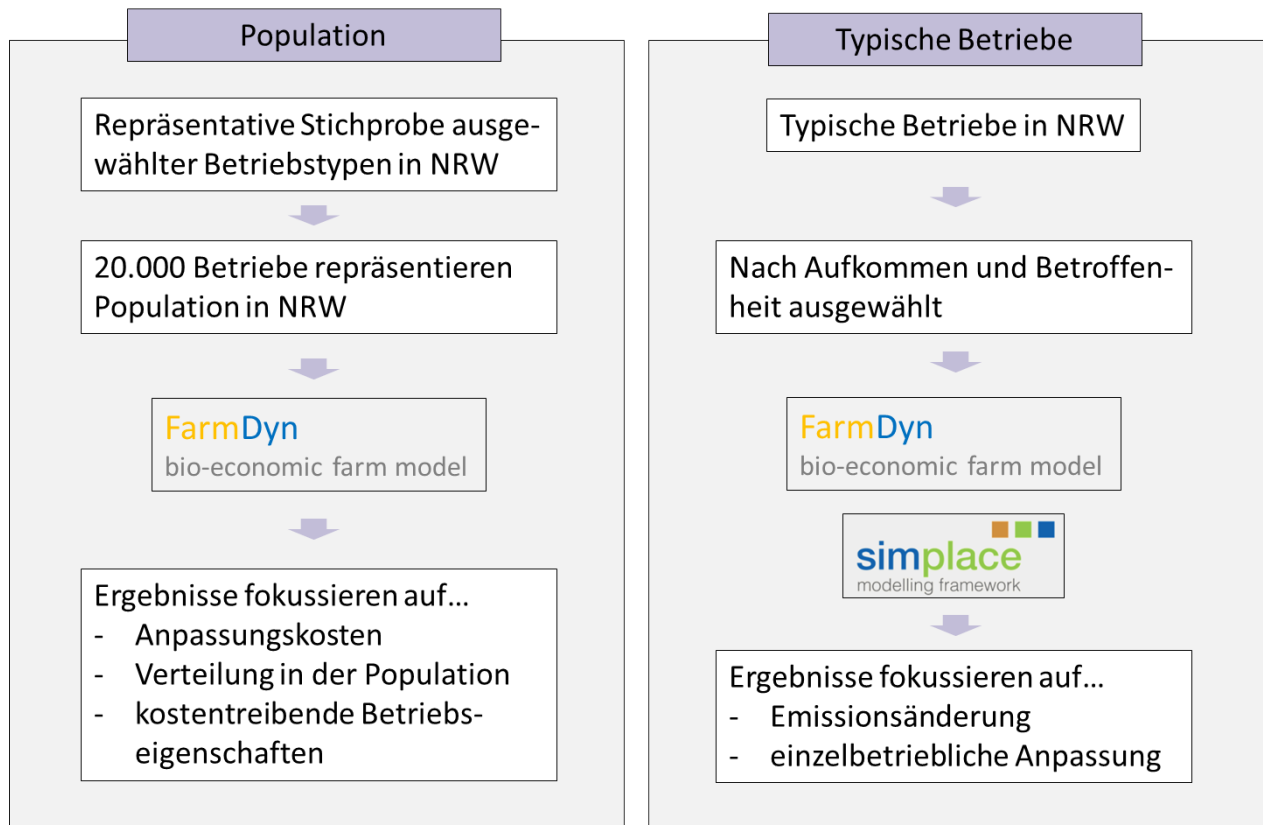


Abbildung 2 Überblick zur Methodik zur Kostenabschätzung in der Population und der Analyse der ökologischen und ökonomischen Auswirkung für typische Betriebe

Quelle: Eigene Darstellung

Das erste Modellierungskonzept zielt darauf ab, die Kosten durch die die Anpassungen an die DüV 2017 für die Population der Betriebe in NRW zu quantifizieren. Dabei liegt der Fokus auf spezialisierten Schweinemast- und Milchviehbetrieben. Basierend auf der Agrarstrukturerhebung (ASE) wird durch Latin Hypercube Sampling (LHS) eine repräsentative Stichprobe erzeugt. 10.000 Betriebe repräsentieren jeweils die Population der Milchvieh- und Schweinemastbetriebe in NRW. FarmDyn modelliert für jeden einzelnen

Betrieb die Anpassungskosten an die DüV 2017. Die Ergebnisse werden mit Hilfe von statistischen Methoden ausgewertet.

Im zweiten Modellierungskonzept wird nicht nur die ökonomische, sondern auch die ökologische Auswirkung der DüV 2017 untersucht. Dafür wird FarmDyn mit der Plattform zur Pflanzenmodellierung SIMPLACE gekoppelt, welches im Zentrum von Teilprojekt 1 steht. Die Nutzung dieser Koppelung für die Modellierung der Population ist nicht möglich, da sich die Rechenzeit von FarmDyn durch die Verwendung der SIMPLACE-Ergebnisse deutlich erhöht. Stattdessen wurde eine Betriebstypologie basierend auf der ASE erstellt und 10 typische Betriebe für die Analyse ausgewählt. Wie auch im ersten Modellierungskonzept, werden die Anpassungskosten an die DüV 2017 ausgewiesen. Darüber hinaus beinhalten die Ergebnisse eine detailliertere einzelbetriebliche Analyse der Anpassungsstrategien sowie eine Quantifizierung der wichtigsten Umweltwirkungen. Im Fokus stehen dabei die NO_3^- -Auswaschungen, die mit Hilfe von SIMPLACE detailliert und standortspezifisch erfasst werden.

Die Verwendung des einzelbetrieblichen Modells FarmDyn ist für beide Modellierungskonzepte weitestgehend identisch und wird in Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 dargestellt. Die Erfassung der Umweltwirkungen in Kapitel 3.1.3 ist nur für die Modellierung der typischen Betriebe relevant. Der Modellierungsansatz zur Generierung der Betriebspopulation in NRW wird in Kapitel 3.2 vorgestellt sowie die dafür verwendete Datengrundlage in Kapitel 3.4.1. Die Modellverknüpfung findet sich hingegen in Kapitel 3.3 und die für NRW entwickelte Betriebstypologie in Kapitel 3.4.2.

3.1 Einzelbetriebliches Modell FarmDyn

Die ökonomischen und ökologischen Folgen der DüV-Novelle auf Betriebsebene werden mit Hilfe des Modells FarmDyn abgebildet. FarmDyn ist ein bio-ökonomisches Betriebsmodell, das auf gemischt-ganzzahliger Optimierung basiert. Es beinhaltet verschiedene landwirtschaftliche Aktivitäten, die mit dem Ziel eines gewinnmaximierenden Produktionsprogramms ausgewählt werden (Abbildung 3). Dabei geht FarmDyn von einem völlig rationalen Landwirt aus, der perfekten Zugang zu Informationen hat. Bei der Auswahl der Aktivitäten bestehen Beschränkungen durch die vorhandenen Produktionsfaktoren, aber auch durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen wie beispielsweise der DüV. FarmDyn erfasst das komplexe Zusammenspiel von Betriebsmanagement und Investitionsentscheidungen, wie z.B. Anpassungen der Herdengröße, der Milchleistung, der Fütterungspraxis, der Intensität der Pflanzenproduktion oder des Düngemanagements. Darüber hinaus sind die Aktivitäten an Umwelteffekte geknüpft wie beispielsweise NO_3^- -Auswaschungen oder NH_3 -Ausgasungen. FarmDyn ist generisch, kann auf unterschiedliche Betriebstypen ausgerichtet werden und ist für die deutsche Landwirtschaft parametrisiert.

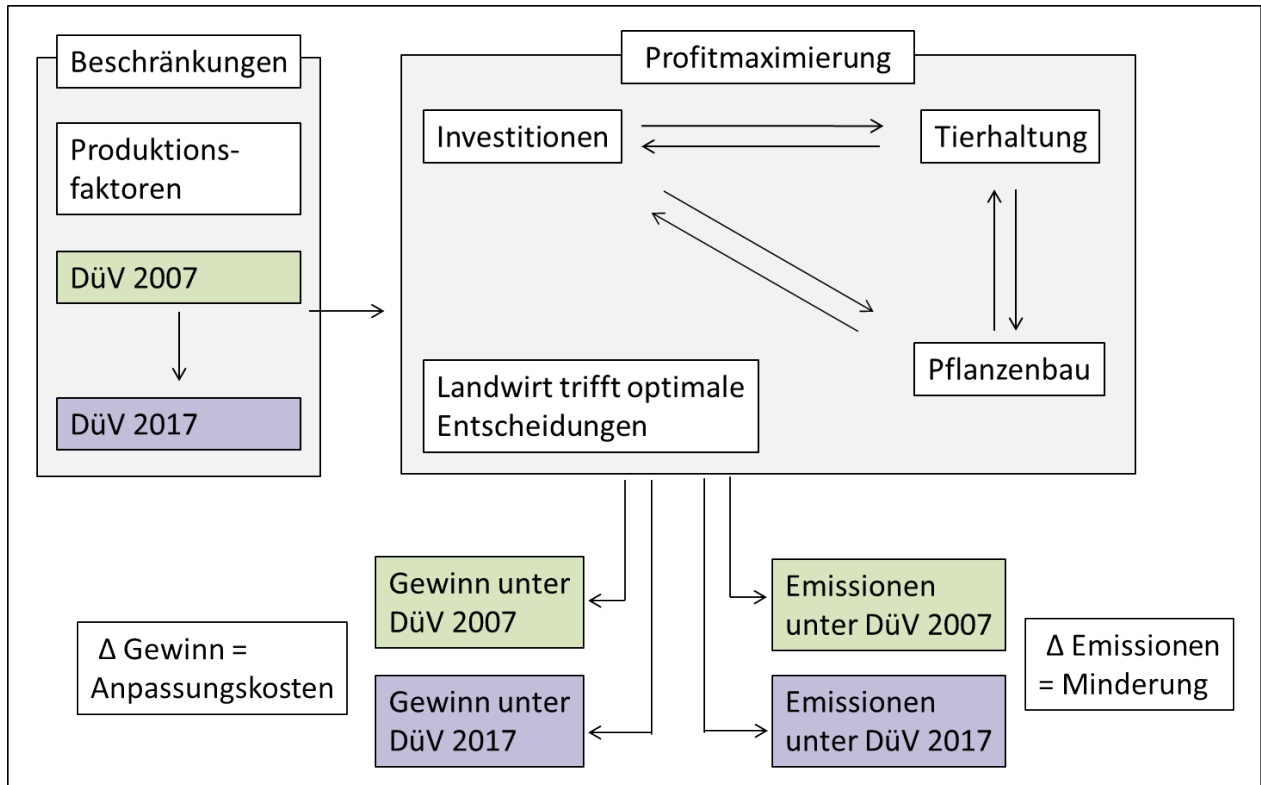


Abbildung 3 Übersicht über das ökonomische, einzelbetriebliche Modell FarmDyn

Quelle: Eigene Darstellung; DüV – Düngeverordnung

Die Anwendung eines gemischten ganzzahligen Programmierungsansatzes ermöglicht die Berücksichtigung der Nichtteilbarkeit der Arbeitsnutzung sowie von Investitionsentscheidungen. Eine Vernachlässigung dieses Aspekts hat zwei gravierende Nachteile. Erstens werden Skaleneffekte typischerweise nicht korrekt dargestellt, z.B. werden bei „normaler“ linearer Programmierung Teile von großen Maschinen oder Ställen gekauft. Dadurch werden die Produktionskosten tendenziell unterschätzt und die Flexibilität bei der Änderung des Kapitalbestands überschätzt. Zweitens erhöht die Verwendung von Teilen die produktionstechnische Machbarkeit, was wiederum die Gewinne erhöhen und die Kosten senken kann.

In der Vergangenheit wurde FarmDyn beispielsweise für die Abschätzung von Grenzvermeidungskosten von Milchviehbetrieben (Lengers *et al.* 2014) oder zur Analyse von unterschiedlichen Förderungen für Biogasanlagen verwendet (Schäfer *et al.* 2017). In den folgenden Kapiteln wird die Ausgestaltung von FarmDyn für die vorliegende Studie charakterisiert. Eine komplette und aktuelle Modelldokumentation ist online verfügbar (Britz *et al.* 2018). Diese fasst auch die technische Implementierung der Modellverknüpfung mit SIMPLACE zusammen (siehe auch Kapitel 3.3).

Für die Analyse der DüV-Novelle wird FarmDyn komparativ-statisch genutzt, wobei zwei statische Zustände miteinander verglichen werden. In einem ersten Modelllauf bildet FarmDyn landwirtschaftliche Betriebe unter den Restriktionen der DüV 2007 ab (Abbildung 3). Die Ergebnisse beinhalten sowohl ökonomische Variablen wie den Gewinn, als auch verschiedene Emissionen des Betriebes. In einem zweiten Modelllauf werden die Vorgaben der DüV 2017 eingeführt. Nun muss der Betrieb sich gegebenenfalls an die strengere Rechtslage anpassen, beispielsweise durch den Export von Wirtschaftsdünger zur Einhaltung der geringeren zulässigen Nährstoffsalden, oder durch die Investition in emissionsarme Technik zur Wirtschaftsdüngerausbringung. Der zweite Modelllauf beinhaltet somit ökonomische und ökologische Variablen unter den Vorgaben der DüV 2017. Der Vergleich der beiden Modellläufe erlaubt dann sowohl die Quantifizierung der Kosten der DüV-Novelle für den landwirtschaftlichen Betrieb als auch die Quantifizierung der Emissionsreduktion.

3.1.1 Maßnahmen der DüV und Anpassungsstrategien

Unter der DüV wird die Anwendung von Wirtschaftsdünger sowie von Mineraldünger beschränkt. Hierfür beinhaltet die Verordnung vier verschiedene Maßnahmen. Zunächst wird die Ausbringungsgrenze für den Einsatz von N aus Wirtschaftsdünger direkt aus der Nitratrichtlinie übernommen. Dieser liegt sowohl unter der DüV 2007 als auch unter der DüV 2017 im Betriebsdurchschnitt und nach Stall- und Lagerverlusten bei 170 kg N ha^{-1} . Die Verlustfaktoren wurden jedoch für einige Tierarten unter der novellierten DüV reduziert, was einer Absenkung der Ausbringungsobergrenze gleichkommt. Darüber hinaus müssen Gärreste pflanzlichen Ursprungs angerechnet werden, was vor allem für die Nutzung von Mais als Biogassubstrat relevant ist. Zur Einhaltung dieser Grenzwerte bestehen verschiedene Anpassungsstrategien, wie eine Reduktion der Tierbesatzdichte, eine Anpassung der Fütterung oder der Export von Wirtschaftsdünger (Tabelle 2). Diese werden in FarmDyn abgebildet und können für ein gewinnmaximierendes Gewinnprogramm unter der DüV ausgewählt werden. Sowohl eine reduzierte Besatzdichte als auch eine NP-reduzierte Fütterung verringern die N-Ausscheidungen pro Flächeneinheit. In Übereinstimmung mit der DüV wird bei der vorliegenden Modellierung für Schweinemastbetriebe zwischen normaler, NP-reduzierter und stark NP-reduzierter Fütterung unterschieden. Die Nährstoffzusammensetzung der Rationen (DLG 2014, S. 71) sowie die entsprechende Zusammensetzung an Futtermittel (Stalljohann 2017, S. 18ff.) werden als zusätzliche Einschränkungen im Fütterungsmodul von FarmDyn einbezogen. NP-reduzierte Fütterung wird nicht als Anpassungsstrategie für die anderen tierhaltenden Betriebe betrachtet. Darüber hinaus senkt der Export, welcher mit Kosten in Höhe von $12 \text{ Mio. Euro (€) m}^{-3}$ verbunden ist (Anhang A), die Menge des betrieblich eingesetzten Wirtschaftsdüngers. Variierende Kosten für die überbetriebliche Verwertung von Wirtschaftsdünger werden in der Sensitivitätsanalyse abgebildet (Kapitel 4.1.2).

Des Weiteren müssen Betriebe unter der DüV 2007 und 2017 einen Nährstoffvergleich für N und P_2O_5 erstellen und die ermittelten Überschüsse sind beschränkt. Mit der Novellierung der DüV wurden die maximalen Überschüsse in einem gleitenden Mehrjahresdurchschnitt von 60 auf 50 kg N ha^{-1} und von 20 auf 10 oder sogar $0 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ gesenkt. Der Nullüberschuss gilt für Böden mit hoher P-Versorgung. Mit der DüV 2017 wird auch die plausibilisierte Flächenbilanz eingeführt, bei welcher der Entzug für Futterflächen nicht mehr über die Erträge ermittelt, sondern über den Grundfutterbedarf von Rindern abgeleitet wird. Hintergrund ist, dass Grünlanderträge und damit die Nährstoffentzüge von Futterbaubetrieben in der Vergangenheit deutlich überschätzt wurden. Die plausibilisierte Flächenbilanz wird nicht in die Analyse einbezogen, da (1) eine Überschätzung der Nährstoffentzüge im Modell nicht möglich ist, (2) Sensitivitätsanalysen gezeigt haben, dass in dem genutzten Modellierungsansatz die Ausbringungsobergrenze bei Milchviehbetrieben die Wirtschaftsdüngerausbringung beschränkt und (3) so eine bessere Vergleichbarkeit der Nährstoffsalden zwischen der DüV 2007 und 2017 gegeben ist.

Um die Nährstoffsalden einzuhalten können Betriebe zusätzlich zu den Anpassungsstrategien, die auch für die Ausbringungsobergrenze gelten, Ernterückstände verkaufen, um den Nährstoffentzug zu erhöhen. Die vorliegende Modellierung beinhaltet daher die Möglichkeit für Betriebe, Stroh aus der Getreideproduktion zu verkaufen. Alle anderen Ernterückstände bleiben jedoch auf dem Feld. Laut LWK Nds. (2018) liegen die Kosten für die Bergung, Lagerung und Nährstoffentfernung von Stroh bei 75 € t^{-1} . Mögliche Auswirkungen auf die N-Menge und Ertragseffekte werden in den SIMPLACE Simulationen in Teilprojekt 1 berücksichtigt (Kapitel 3.1.1). Die Strohpreise in Deutschland liegen zwischen 70 und 190 € t^{-1} (KTBL 2016, S. 265) und daher weit über den Kosten. Experten gehen allerdings davon aus, dass in NRW derzeit nur ca. ein Drittel des Getreidestrohs verkauft wird (LWK NRW 2018, S. 22). Daher wird für die Simulation der niedrigste Preis von 70 € t^{-1} gewählt. Eine weitere Anpassungsstrategie an strengere N-Nährstoffüberschussgrenzen ist eine verringerte N-Düngungsintensität und damit verbundene Ertragseinbußen. Diese Anpassungsstrategie ist jedoch nur bei der Modellierung von typischen Betrieben und der Nutzung der SIMPLACE Ergebnisse möglich. Sie erhöht den Anteil an N, den die angebaute Kultur aufnimmt, und reduziert somit den N-Überschuss sowie potenzielle Verluste in die Umwelt. Dies spiegelt sich in den unterschiedlichen Düngungsszenarien und den entsprechenden Erträgen wider (Kapitel 3.3). Aufgrund des Optimierungsprozesses wählt FarmDyn die Düngungsintensität so, dass der zusätzliche Ertrag durch eine weitere Einheit Dünger den Kosten dieser entspricht. Die Begrenzung des N-Überschusses limitiert jedoch die Düngeintensität und erfordert möglicherweise die Auswahl von Szenarien mit niedrigeren Erträgen als ökonomisch optimal.

Tabelle 2 Übersicht über Maßnahmen der Düngeverordnung und korrespondierende Anpassungsstrategien in FarmDyn

	Verbesserte Nährstoffeffizienz	Verringerte Tierbesatzdichte	Wirtschaftsdüngerexport	N/P reduzierte Fütterung	Erhöhte Abfuhr (z.B. Stroh)	Zwischenfruchtanbau
Düngebedarfsermittlung	X	X	X	X		
N-Überschuss Limitierung	X	X	X	X	X	
P-Überschuss Limitierung	X	X	X	X	X	
170er Grenze	X	X	X	X		
Ausbringungstechnik (Wirtschaftsdünger)			X			
Strengere Sperrfristen im Herbst		X	X			X

Quelle: Eigene Darstellung; DüV – Düngeverordnung, N – Stickstoff; P – Phosphor

Der vierte Grenzwert unter der DüV 2017 ist die obligatorische Düngebedarfsermittlung oder Düngeplanung, die als Düngungsquote auf Betriebsebene verstanden werden kann. Die Düngebedarfsermittlung ist hauptsächlich für N relevant, da sie für P_2O_5 nicht ausdifferenziert ist und sich nicht von der Berechnung des Nährstoffvergleichs unterscheidet. Abhängig vom Ertragsniveau wird ein N-Sollwert definiert, wobei die N-Mineralisierung im Frühjahr, Vorfruchteffekte und die organische Düngung aus dem Vorjahr berücksichtigt werden. Dieser Wert darf nicht durch Mineraldünger und Wirtschaftsdünger, der mit vorgeschriebenen Mineraldüngeräquivalenten (MFÄ) angerechnet wird, überschritten werden. In der vorliegenden Studie werden die offiziellen N_{min}-Werte der Landwirtschaftskammer NRW verwendet (LWK NRW 2018a, S. 1), die Landwirte alternativ zu betriebsindividuell ermittelten Werten anrechnen dürfen. Alle weiteren Parameter sind in der DüV 2017 definiert. Für die Einhaltung der obligatorischen Düngebedarfsermittlung stehen den Betrieben in FarmDyn die gleichen Anpassungsstrategien wie zur Einhaltung des Nährstoffvergleichs zur Verfügung.

Darüber hinaus wird in einer eigenen Rechtsverordnung die Stoffstrombilanzverordnung für bestimmte Betriebe verpflichtend (Kapitel 2). Diese Bilanzierungsvariante ist ebenfalls in FarmDyn enthalten und wird beispielhaft auf einen intensiven Schweinemastbetrieb angewendet (Kapitel 4.2.2). Der Betrieb kann auswählen, ob sein Überschuss durch den betriebsindividuellen Grenzwert oder die pauschale Obergrenze von 175 kg N ha^{-1} limitiert werden soll. Dabei stehen dem Betrieb die gleichen Anpassungsstrategien zur Verfügung wie zur Einhaltung des Nährstoffsaldos nach Flächenbilanz. Darüber hinaus kann sich der Betrieb noch durch die Abänderung der eingesetzten Futtermittel, die jedoch beschränkt ist, und einen Austausch von zugekauften und selbsterzeugten Futtermitteln anpassen.

Unter der DüV 2017 gelten strengere Sperrfristen für Düngerausbringung, insbesondere im Herbst nach der Ernte der Hauptkultur. Der sogenannte Herbsterlass in NRW beinhaltete jedoch bereits im Rahmen der DüV 2007 eine stärkere Begrenzung der Ausbringung im Herbst, sodass die zusätzliche Verschärfung durch die DüV 2017 gering ist. Anpassungsstrategien für die Einhaltung der strengeren Sperrfristen können der Export von Wirtschaftsdünger, eine Reduktion der Besatzdichte sowie die Investition in zusätzliche Lagerkapazitäten sein. Darüber hinaus ermöglicht der Anbau von Zwischenfrüchten im Herbst eine höhere Ausbringungsmenge von Wirtschaftsdünger. In FarmDyn wird dies durch die Möglichkeit zum Anbau von Senf realisiert, was sich auch in den SIMPLACE Simulationen widerspiegelt (Kapitel 3.3). Die Möglichkeit für den Anbau von Zwischenfrüchten sowie die Betroffenheit durch strengere Sperrfristen, hängt jedoch von der angebauten Fruchtfolge ab. Neben den Sperrfristen beschränken agronomische Restriktionen den Zeitpunkt, zu dem eine Ausbringung des Wirtschaftsdüngers bei bestimmten Kulturen möglich ist.

Die strengeren Ausbringungszeiten haben auch Einfluss auf die Lagerkapazitäten der Betriebe. Durch die Novellierung der DüV müssen Betriebe mit mehr als 3 GVE ha⁻¹ ihre Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger von 6 auf 9 Monate erhöhen. Hierfür sind zwei Anpassungsstrategien in FarmDyn möglich. Betriebe können ihre Besatzdichte reduzieren oder in neue Lagerkapazitäten investiert. Die jährlichen Kosten hierfür reichen von 1,82 bis 6,63 € m⁻³ (KTBL 2016, S. 153), abhängig von der Größe des Lagers und den damit verbundenen Skaleneffekten.

Die DüV schreibt vor, welche Techniken zur Wirtschaftsdüngerausbringung zulässig sind. Im Rahmen der DüV 2017 ist die Anwendung von Breitverteilern verboten. Eine Ausnahme stellt nur die Anwendung auf unbestelltem Ackerland mit einer anschließenden Einarbeitung dar. Andernfalls sind streifenförmige und bodennahe Ausbringungstechniken erforderlich. Für die Modellierung wird davon ausgegangen, dass die Schleppschlauchtechnik auf Ackerland und Schleppschuhtechnik auf Grünland angewendet und von einem Lohnunternehmer bereitgestellt wird. Die Kosten für die Anwendung liegen bei Breitverteilern bei 1,74 € m⁻³, bei Schleppschlauchanwendungen bei 2,80 € m⁻³ und bei Schleppschuheinsatz bei 3,01 € m⁻³ (Kuratorium für Betriebshilfsdienste und Maschinenringe in Westfalen-Lippe e.V. 2017, S. 6; KTBL 2018a). Um sich an die neuen Vorschriften anzupassen, kann neben Ausbringungstechniken der Anteil an Wirtschaftsdünger, der auf unbestelltem Ackerland ausgebracht und eingearbeitet wird, erhöht werden. Für die verbindliche Einarbeitung des Wirtschaftsdüngers innerhalb von 4 Stunden werden keine zusätzlichen Kosten in FarmDyn berücksichtigt.

3.1.2 Berechnung der Anpassungskosten

Die Kosten durch die DüV 2017 werden als einzelbetriebliche Anpassungskosten ausgewiesen. In der Fachliteratur werden diese Art von Kosten, die direkt mit der Erfüllung optionaler oder obligatorischer Politikmaßnahmen verbunden sind, als „compliance costs“ bezeichnet (Uthes *et al.* 2010, S. 282; Mack & Huber 2017, S. 35f.). Sie stehen nicht in direktem Zusammenhang mit Emissionsminderungen, sondern beziehen sich auf die Erfüllung von vorgegebenen Politikmaßnahmen. Damit unterscheiden sie sich von (Grenz-) Vermeidungskosten, welche die Kosten für (zusätzliche) Emissionsminderungen erfassen (McKittrick 1999, S. 306). In FarmDyn werden die Anpassungskosten als Differenz des ökonomischen Zielwertes der Modellierung unter der DüV 2007 und 2017 berechnet, wobei die Einnahmen aus den verkauften Leistungen abzüglich der Kosten für Betriebsmittel und neue Investitionen berücksichtigt werden. Investitionen in bestehende Ställe und Maschinen werden als versunkene Kosten betrachtet, um die beobachteten Betriebe im Modell abzubilden. Es wird angenommen, dass das Land den landwirtschaftlichen Betrieben gehört und die Arbeit von Familienmitgliedern bereitgestellt wird.

Ackerbaubetriebe können durch den Zukauf von Wirtschaftsdünger ihr landwirtschaftliches Einkommen erhöhen, da so teurer Mineraldünger eingespart wird. Durch Kosteneinsparungen und Erlössteigerungen können sie „negative Anpassungskosten“ aufweisen. Die Anpassungskosten für Ackerbaubetriebe werden pro ha ausgegeben. Die Anpassungskosten für Tierhaltungsbetriebe beziehen sich auf die verkauften Tiere oder die verkaufte Milchmenge unter der DüV 2007. Dadurch können die wirtschaftlichen Auswirkungen einer verringerten Besatzdichte als Anpassungsstrategie an die DüV 2017 erfasst werden. Für den typischen Betrieb mit Biogasanlage werden die Kosten auf erzeugte Kilowattstunde bezogen. Die ausgewählten Einheiten erleichtern den Vergleich mit anderen Studien und veröffentlichten und standardisierten Deckungsbeiträgen.

3.1.3 Erfassung der Umweltwirkungen

Im Rahmen der Modellierung von typischen Betrieben werden die Umweltwirkungen durch N erfasst. Stickstoffoxid- (NO), Distickstoff- (N₂), N₂O- und NH₃-Emissionen werden in FarmDyn nach einem N-Fluss-Ansatz berechnet. N-Verluste werden im Stall, während der Lagerung sowie bei der Ausbringung erfasst. Eine Quantifizierung der N₂-Emissionen ist ebenfalls erforderlich, da reaktives N, das auf einer Stufe emittiert, nicht in die nächste Stufe eintreten kann. Die genutzten Emissionsfaktoren sind identisch mit den Faktoren aus der Berechnung des „National Inventory Report (NIR)“ über die deutschen THG Emissionen sowie des „Informative Inventory Report (IIR)“ über die deutschen Schadstoffemissionen (Haenel *et al.* 2018). Die Emissionsfaktoren sind beispielhaft für Schweinemastbetriebe in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Faktoren für andere Betriebstypen weichen leicht ab und

können bei Haenel *et al.* (2018) eingesehen werden. Die Ausgasung von NH_3 nach der Ausbringung hängt von der Ausbringungstechnik sowie der Geschwindigkeit der Einarbeitung ab und liegt in dem in Tabelle 3 angegebenen Wertebereich. Bei jedem Schritt des N-Flusses werden die indirekten N_2O -Emissionen für NO-N und $\text{NH}_3\text{-N}$ mit $0,01 \text{ kg N}_2\text{O-N (kg N)}^{-1}$ berechnet. Die NO_3^- -Auswaschung führt ebenfalls zu indirekten $\text{N}_2\text{O-N}$ -Emissionen, diese werden mit $0,0075 \text{ kg (kg N)}^{-1}$ angerechnet (IPCC 2006b, S. 11.24). Die Emissionen werden in kg N dargestellt, um den Vergleich mit den N-Verlustindikatoren der DüV zu erleichtern.

Tabelle 3 Emissionsfaktoren für Ammoniak, Distickstoffoxid, Stickstoffoxide und Distickstoff bezogen auf Gesamtstickstoff und Ammonium-Stickstoff für Schweinemastbetriebe

	NH_3	$\text{N}_2\text{O-N kg (kg Ntotal)}^{-1}$	$\text{NO-N kg (kg Ntotal)}^{-1}$	$\text{N}_2\text{-N kg (kg Ntotal)}^{-1}$
Stall	$0,3 \text{ kg NH}_3\text{-N (kg TAN)}^{-1}$ ^a			
		$0,005^{\text{d}}$	$0,1*0,005^{\text{f}}$	$3*0,005^{\text{h}}$
Lagerung	$0,105 \text{ kg NH}_3\text{-N (kg TAN)}^{-1}$ ^a			
Ausbringungstechnik	$0,06\text{-}0,25 \text{ kg NH}_3\text{-N (kg TAN)}^{-1}$ ^b	$0,01^{\text{e}}$	$0,012^{\text{g}}$	-
Mineraldüngeranwendung	$0,01 \text{ kg NH}_3 \text{ (kg N total)}^{-1}$ ^c	$0,01^{\text{e}}$	$0,012^{\text{g}}$	-

^a Dämmgen *et al.* (2010, S. 245f.); ^b Haenel *et al.* (2018, S. 189) und Döhler *et al.* (2002, S. 73); ^c EEA (S.17); ^d IPCC (2006a, S. 10.62); ^e IPCC (2006b, S. 11.11); ^f 10% der N_2O -Emissionen basierend auf Haenel *et al.* (2012, S. 78f.); ^g Wert von Haenel *et al.* (2018, S. 326) basierend auf Stehfest & Bouwman (2006); ^h 300% der N_2O -Emissionen basierend auf Jarvis & Pain (1994, S. 32); N – Stickstoff; NH_3 – Ammoniak; N_2O – Distickstoffoxid; NO – Stickstoffoxide; N_2 – Distickstoff; TAN – Ammonium Stickstoff

NO_3^- -Verluste stehen im Zentrum des beschriebenen Forschungsprojektes und werden durch die SIMPLACE-Modellierungen bereitgestellt (Kapitel 3.3). Sie reflektieren damit im Gegensatz zu den anderen Emissionen die naturräumlichen Gegebenheiten in NRW. Ihre Berechnung ist detailliert im Abschlussbericht von Teilprojekt 1 dargelegt.

3.2 Modellierung der Betriebspopulation und Sensitivitätsanalyse

Um die Verteilung der Kosten durch die DüV 2017 in der Betriebspopulation abzuschätzen und systematische Sensitivitätsanalysen durchzuführen, wird ein innovativer Ansatz zur Ermittlung der Betriebspopulation angewendet (Abbildung 4). Dieser wurde ursprünglich von Lengers *et al.* (2014) entwickelt. Hintergrund ist, dass einzelbetriebliche Daten aus der ASE aufgrund der Vorgaben zum Datenschutz nicht direkt als Eingangsdaten für die Modellierung verwendet werden können. Daher wurde die Verteilung von relevanten Betriebseigenschaften sowie ihre Korrelationen aus der ASE ermittelt. Darauf basierend wurde mit Hilfe eines

Sampling-Ansatzes eine Betriebspopulation generiert, die die gleichen Eigenschaften wie die beobachtete Population aufweist, dieser jedoch auf einzelbetrieblicher Ebene nicht entspricht.

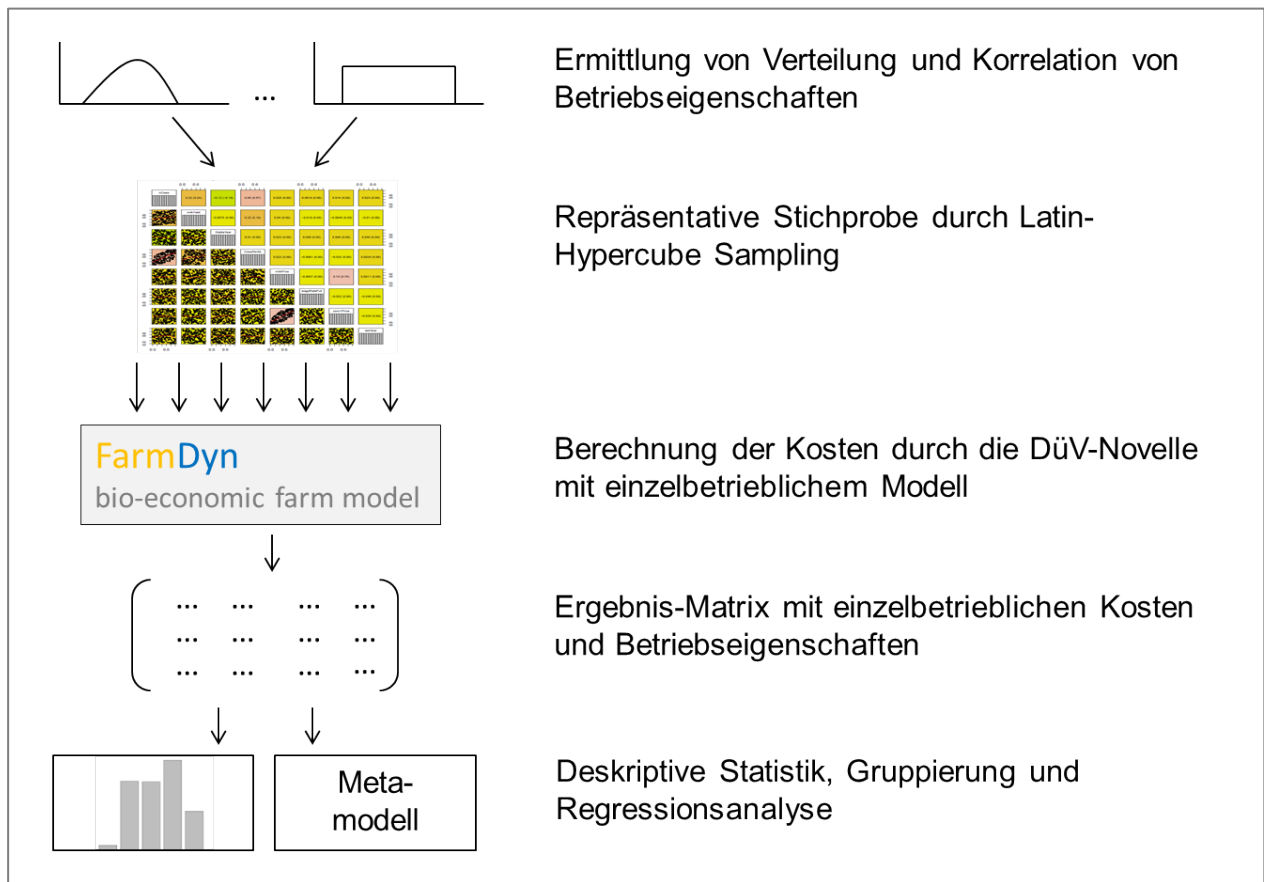


Abbildung 4 Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens zur Abschätzung der Kosten in der Betriebspopulation und Erstellung der Sensitivitätsanalyse

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Lengers *et al.* (2014, S. 583)

Im nächsten Schritt berechnet FarmDyn die Kosten durch die DüV 2017 für alle Betriebe in der generierten Population. Die Modellierungsergebnisse werden dann mit Hilfe von deskriptiver Statistik, Gruppierung der Betriebe und, im Falle der Sensitivitätsanalysen, durch Regressionsgleichungen ausgewertet.

3.2.1 Latin Hypercube Sampling

Zur Generierung der Betriebspopulation wird LHS verwendet (McKay *et al.* 1979), welches die kumulativen Verteilungsfunktionen der beobachteten Betriebsmerkmale in gleiche Intervalle aufteilt. Aus jedem Intervall wird eine Probe einer Variablen ausgewählt und mit dem ausgewählten Intervall der anderen Variablen kombiniert. Dadurch wird sichergestellt, dass der gesamte Wertebereich einer Variablen in der Stichprobe dargestellt wird. Das LHS Verfahren wird mit dem R-Paket „lhs 0.10“ durchgeführt. Das normale LHS geht davon aus,

dass zwischen den erfassten Variablen keine Korrelation besteht und die Kombination der Intervalle dadurch zufällig ist. Um die von der ASE 2016 abgedeckte landwirtschaftliche Population zu repräsentieren, wird ein Algorithmus von Iman & Conover (1982) eingeführt. Dieser stellt sicher, dass die Paarung der Intervalle mit den beobachteten Korrelationen übereinstimmt. Die verwendeten Daten aus der ASE und weiteren Quellen werden in Kapitel 3.4 vorgestellt.

3.2.2 Statistische Auswertung

Ergebnisse von Mack & Huber (2017) zeigen, dass eine Gruppierung der Betriebe basierend auf ihren Anpassungskosten wertvolle Erkenntnisse bereitstellt. Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Studie auf die Ergebnisse von 10.000 Betrieben, die durch die Einzelbetriebsmodellierung generiert werden, angewendet. Gruppengrenzen werden mit Hilfe von deskriptiver Statistik ausgewählt und zielen darauf ab, Betriebe mit ähnlichen Kostentreibern zusammenzufassen. Um einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppenmitteln zu erkennen, wird bei kontinuierlichen Variablen der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Für Post-hoc-Tests wird der Dunn-Test für mehrere Vergleiche mit dem R-Paket „dunn.test“ 1.3.5 angewendet. Die Bonferroni-Korrektur verhindert die Alphafehler-Kumulierung bei multiplen Vergleichen. Bei kategorialen Variablen wird der signifikante Unterschied zwischen den Gruppen erfasst, indem Kontingenztafeln erstellt und der exakte Unabhängigkeitstest von Fisher angewendet wird. Der Post-hoc-Test für kategoriale Variablen wird mit Hilfe des R-Pakets "rcompanion" 2.0.0 durchgeführt. Auch hier wird die Bonferroni-Korrektur eingesetzt, um das Problem der Mehrfachvergleiche zu vermeiden.

Für die systematische Sensitivitätsanalyse wird das Sampling wiederholt und zusätzliche erklärende Variablen berücksichtigt. Für diese Variablen wird eine Auswirkung auf die Anpassungskosten vermuten, sie sind jedoch nicht in ausreichender Qualität durch die ASE oder alternative Datenquellen abgedeckt. Das LHS und die Betriebsmodellierung mit FarmDyn werden für 10.000 Schweinemast- und Milchviehbetrieben wiederholt. Die Ergebnismatrizen werden verwendet, um lineare Regressionsmodelle separat für die Milch- und Schweineproduktion zu errechnen.

3.3 Modellverknüpfung zwischen SIMPLACE und FarmDyn

Um die einzelbetrieblichen Anpassungen an die DüV 2017 im Detail zu untersuchen und die Veränderung der Umweltwirkung zu quantifizieren, wird FarmDyn mit einem für das Verbundprojekt entwickelten Modell der Modellierungsplattform SIMPLACE verknüpft und auf typische Betriebe angewendet. Die Methodik der Modellierung und die Ergebnisse der Simulationen auf Ebene des Pflanzenbestandes mit SIMPLACE sind in Teilprojekt 1 des Clusterprojektes verortet. Es wird der Ansatz einer lockeren („loose“) Modellverknüpfung verfolgt. Dabei sind mit der SIMPLACE Modellkomponente erzeugte Simulationsergebnisse

für eine große Zahl von Managementszenarien der Input für FarmDyn. Es besteht jedoch keine tatsächliche technische Verknüpfung und gemeinsame Ausführung der Modelle.

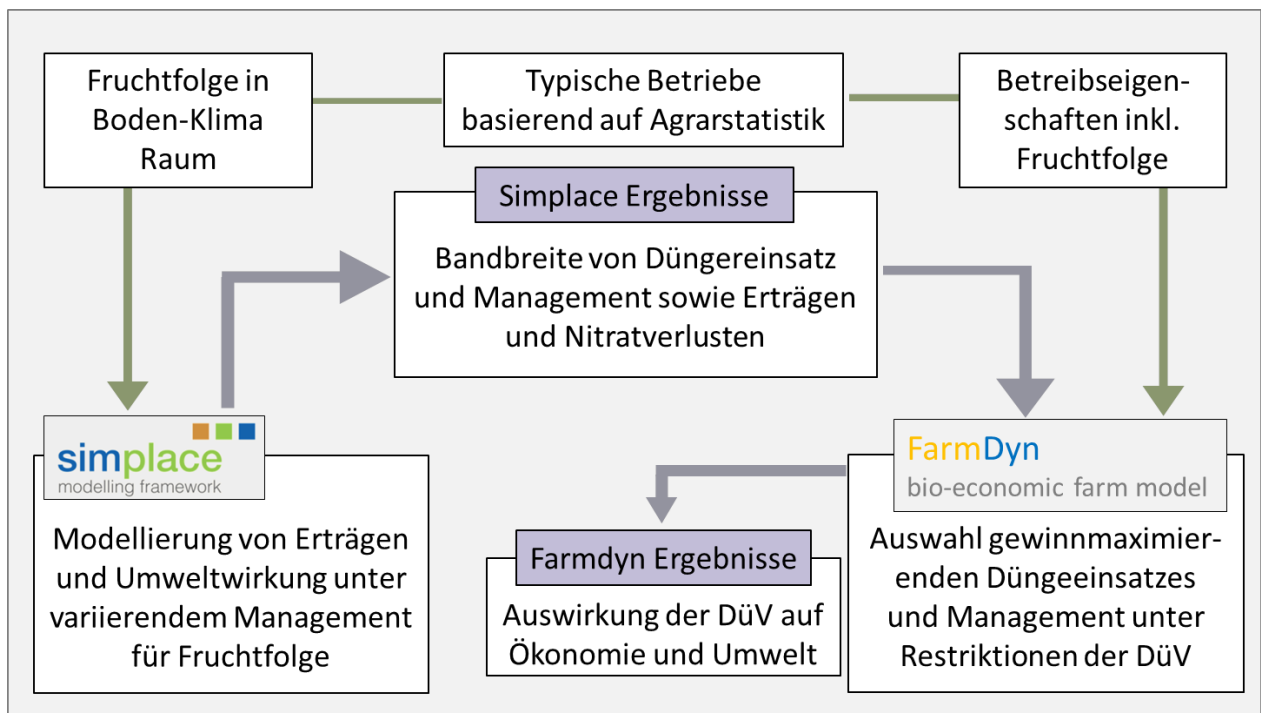


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Verknüpfung von SIMPLACE und FarmDyn

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 5 wird die Verknüpfung von SIMPLACE und FarmDyn vereinfacht dargestellt. Zuerst werden die zu untersuchenden typischen Betriebe und die relevanten Fruchtfolgen festgelegt. In SIMPLACE werden für diese Erträge jeder Feldfrucht in der Fruchtfolge und die NO_3^- -Auswaschungsverluste für unterschiedliche Managementszenarien modelliert. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Menge des ausgebrachten Düngers, des Verhältnisses von Mineral- und Wirtschaftsdünger, des Zeitpunktes der Wirtschaftsdüngerausbringung, des Anbaus von Zwischenfrüchten sowie der Abfuhr von Ernterückständen. SIMPLACE generiert eine Ergebnisdatei mit den Charakteristika der Szenarien, den ermittelten Erträgen in den einzelnen Fruchtfolgen und Umweltwirkungen. Hier sind auch Managementoptionen enthalten, die unter der DüV nicht zulässig sind. FarmDyn liest diese Datei ein und fasst die Szenarien als Pflanzenbauaktivitäten auf. Es werden die Aktivitäten vom Modell gewählt, bei denen die Vorgaben der DüV eingehalten werden und die gleichzeitig den optimalen ökonomischen Zielwert realisieren. Durch die DüV 2017 werden unter Umständen andere Managementszenarien als unter der DüV 2007 ausgewählt, die mit anderen Erträgen und NO_3^- -Verlusten verbunden sind. So können die Veränderungen durch die DüV-Novelle 2017 quantifiziert werden.

3.4 Datengrundlage für die untersuchten Betriebe

Dieses Kapitel stellt die Datengrundlage für die Generierung der Betriebspopulation sowie die typischen Betriebe dar. Letztere werden aus einer Typologie abgeleitet, die im Rahmen des Forschungsprojektes für NRW entwickelt wurde und ebenfalls im Folgenden vorgestellt wird.

3.4.1 Population

Aufgrund der Geheimhaltungspflichten der ASE können nicht real existierende und beobachtete Betriebe der Population für die Modellierung ausgewählt werden. Daher wird eine Betriebspopulation basierend auf den beobachteten Merkmalen der tatsächlichen Betriebspopulation generiert (Kapitel 3.2). Dafür werden jene Merkmale ausgewählt, die einen vermeintlichen Einfluss auf die Anpassungskosten an die DüV 2017 haben könnten (siehe Kapitel 2). Hierzu zählen die Tierbesatzdichte, die Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger, die derzeit verwendeten Anwendungstechniken, der Anteil an Grünland, die P-Versorgung des Bodens sowie die Betriebsgröße in Hektar. Die Besatzdichte ist direkt oder indirekt mit allen Änderungen der DüV 2017 verbunden. Sie bestimmt weitgehend die Notwendigkeit, sich an strengere Grenzwerte für die Nährstoffanwendung anzupassen. Darüber hinaus hängt die Pflicht zur Erhöhung der Lagerkapazität von 6 auf 9 Monate direkt von der Tierbesatzdichte ab. Diese Maßnahme ist gleichzeitig der Grund, auch die vorhandene Lagerkapazität in Monaten als Betriebsmerkmal aufzunehmen. Aufgrund der verpflichtenden Nutzung von emissionsarmen Ausbringungstechniken unter der DüV 2017, werden auch die derzeit verwendeten Anwendungstechniken als Betriebsmerkmal in die Simulation einbezogen. Die Berücksichtigung des prozentualen Anteils an Grünland hat mehrere Gründe. Erstens sind die erforderlichen emissionsarmen Ausbringungstechniken im Rahmen der DüV 2017 auf Grünland etwas teurer als auf Ackerland (KTBL 2018b). Zweitens sind gesetzlich zulässige Nährstoffüberschüsse in der DüV vom angenommenen Nährstoffentzug der jeweiligen Feldfrucht abhängig, der auf intensivem Grünland besonders hoch ist. Die P-Versorgung des Bodens wird aufgenommen, da sie den zulässigen P_2O_5 -Überschuss determiniert. Zusätzlich bestimmt die Betriebsgröße in Kombination mit der Tierbesatzdichte den Tierbestand, welcher wiederum mit Skaleneffekten verknüpft ist. So nehmen beispielsweise die Investitionskosten in Lagerkapazitäten pro m^3 mit der Lagergröße ab (KTBL 2016). Für die beschriebenen Betriebseigenschaften werden grundsätzlich Daten aus der ASE 2016 verwendet (Tabelle 4). Für Betriebseigenschaften, die nicht der ASE zu entnehmen sind, müssen weitere Quellen herangezogen werden. Dies führt zu Unsicherheiten bezüglich der ermittelten Population, die in Kapitel 5.2.4 diskutiert werden.

Tabelle 4 Merkmale von Milchvieh- und Schweinemastbetrieben zur Generierung der Betriebspopulation

Erklärende Faktoren	Betriebstyp	Minimum	Median	Maximum	Datenquelle
Betriebsgröße [ha]	Milchvieh	8,14	61,24	221,35	ASE 2016 ^b
	Schweine	6,84	48,20	159,05	
Anteil Grünland [%]	Milchvieh	0,06	0,51	1	ASE 2016 ^b
	Schweine	-	-	-	
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹]	Milchvieh	0,63	1,75	5,94	ASE 2016 ^b
	Schweine	1,11	2,06	14,82	
Lagerkapazität Dünger [m]	Milchvieh	6,00	8,00	8,00	ASE 2007 in Osterburg & Techen (2012)
	Schweine	6,00	8,00	8,00	
Emissionsarme Anwendungstechniken [1/0] ^a	Milchvieh	0	0	1	ASE 2016 ^b
	Schweine	0	0	1	
P-angereicherte Böden [1/0] ^a	Milchvieh	0	1	1	Jacobs (2014), ASE 2016 ^b
	Schweine	0	1	1	

^a Emissionsarme Anwendungstechniken und P-angereicherte Böden werden als binäre Variablen eingeführt; ^b Detaillierte Quelle: FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Agrarstrukturerhebung, 2016, eigene Berechnung; ASE – Agrarstrukturerhebung; P – Phosphor; GVE - Großvieheinheit

Darüber hinaus werden basierend auf der ASE 2016 und der Landwirtschaftszählung 2010 Korrelationen zwischen den wichtigsten erklärenden Variablen berechnet. Sie finden sich in Tabelle Anhang B.1 und Tabelle Anhang B.2. Der Korrelationsfaktor zwischen dem P-Status des Bodens und der Besatzdichte wird basierend auf regionalen Daten, die auf diesen Zusammenhang hindeuten (Osterburg & Techen 2012), auf +0,3 festgelegt.

Für die systematische Sensitivitätsanalyse wird das Sampling wiederholt und zusätzliche erklärende Variablen berücksichtigt, für die Auswirkungen auf die Anpassungskosten vermuten werden und die nicht von der ASE abgedeckt bzw. nicht auf einzelbetrieblicher Ebene mit ihr verknüpft werden können (Tabelle 5). Es wird eine gleichförmige Verteilung angenommen, plausible Wertebereiche sind aus der Literatur abgeleitet. Es handelt sich dabei vor allem um Preise, die bei einer einzelbetrieblichen Modellierung exogen sind, und Annahmen zum Nährstoffmanagement des Betriebes.

Tabelle 5 Werte für die Sensitivitätsanalyse

Erklärende Faktoren	Minimum	Standardwert	Maximum
Schweinepreis [€ (kg Schlachtgewicht) ⁻¹]	1,30 ^a	1,44 ^a	1,60 ^a
Milchpreis [€ (kg ECM) ⁻¹]	0,29 ^a	0,32 ^a	0,37 ^a
Strohpreis [€ t ⁻¹]	70,00 ^a	115,00 ^a	190,00 ^a
Exportkosten Wirtschaftsdünger [€ m ⁻³]	1,00 ^b	12,00 ^b	20,00 ^b
Ausbringungskosten Wirtschaftsdünger [€ m ⁻³]	Schleppschlauch 1,80 ^c Schleppschuh 1,92 ^c Einspritze 2,30 ^c	Schleppschlauch 2,80 ^c Schleppschuh 3,01 ^d Einspritze 3,90 ^d	Schleppschlauch 3,58 ^c Schleppschuh 3,85 ^c Einspritze 5,00 ^c
Minimaler chemischer Düngerbedarf [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	Mais: 0 kg P ₂ O ₅ 0 kg N Winterweizen: 0 kg N Wintergerste: 0 kg N Zuckerrüben: 0 kg N	Mais: 20 kg P ₂ O ₅ ^c 8 kg N ^c Winterweizen: 40 kg N ^c Wintergerste: 40 kg N ^c Zuckerrüben: 30 kg N ^c	Mais: 40 kg P ₂ O ₅ 16 kg N Winterweizen: 80 kg N Wintergerste: 80 kg N Zuckerrüben: 60 kg N
Mineraldüngeräquivalente [%]	- -	Schweinegülle 0,7 ^f Rindergülle 0,6 ^f	Schweinegülle 0,8 ^g Rindergülle 0,7 ^g

^a KTBL (2014); ^b Anhang A; ^c Noordhof (2018), Annahme, dass sich die höchsten und die niedrigsten genannten Preise auf die Technologie mit dem höchsten bzw. niedrigsten Standardpreis beziehen. Der Preis für andere Technologien wird entsprechend angepasst; ^d Kuratorium für Betriebshilfsdienste und Maschinenringe in Westfalen-Lippe e.V. (2017) und KTBL (2018b); ^e Gaiser (2018); ^f BMEL (2017b); ^g LWK SH (2018, S. 119); € – Euro; EKM – energiekorrigierte Milch; N – Stickstoff; P₂O₅ – Phosphat

3.4.2 Betriebstypologie

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wird eine Betriebstypologie für NRW basierend auf der ASE 2016 entwickelt. Aus dieser werden 10 Betriebe für die Analyse der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der DüV 2017 mit Hilfe der Modellverknüpfung ausgewählt. Unter einer Betriebstypologie wird die Gruppierung von Betrieben nach Merkmalen verstanden, die für die Forschungsfrage von Bedeutung sind. Dabei bildet jede abgeleitete Gruppe von Betrieben innerhalb der Typologie einen sogenannten Betriebstyp oder typischen Betrieb. Ein Betriebstyp repräsentiert eine Anzahl realer Betriebe aus den zugrunde liegenden Daten.

Eine Betriebstypologie für NRW

Um eine Betriebstypologie für NRW zu erstellen, wird eine Methodik von Andersen *et al.* (2007) angepasst. Dabei werden Betriebe aus offiziellen Agrarstatistiken hinsichtlich relevanter Betriebseigenschaften gruppiert. Die Definitionen der einzelnen Gruppengrenzen basiert auf Expertenwissen, wohingegen die Betriebseigenschaften aus der Statistik abgeleitet werden.

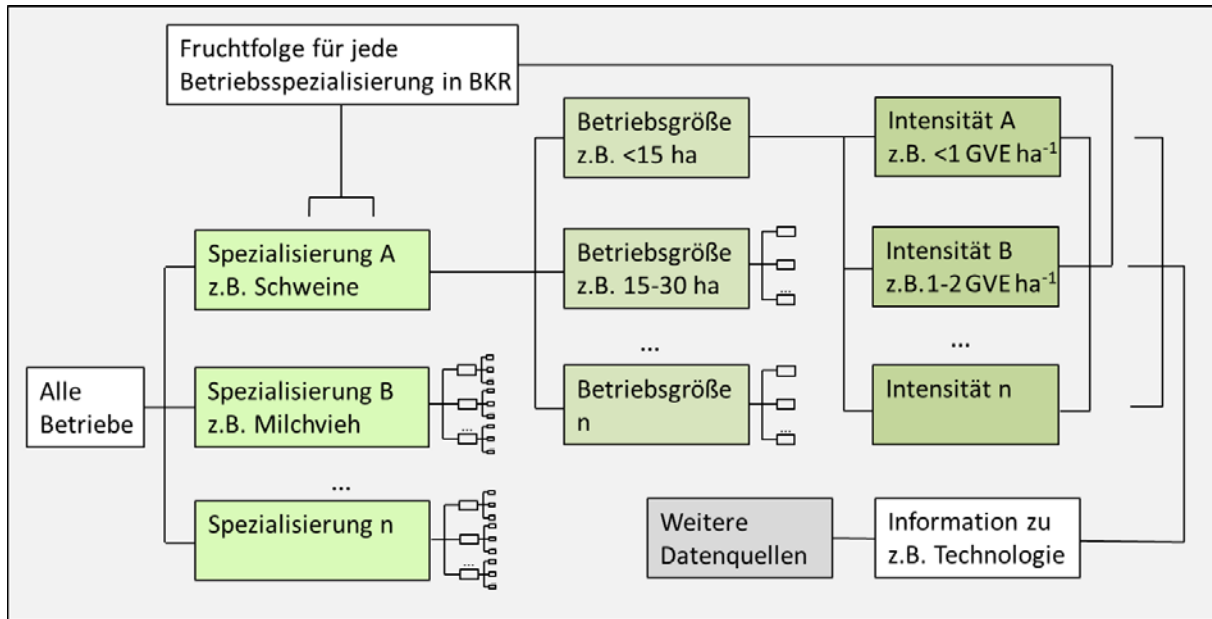


Abbildung 6 Konzept der Typologie landwirtschaftlicher Betriebe in Nordrhein-Westfalen zur Analyse der Düngeverordnung

Quelle: Eigene Darstellung; BKR – Boden-Klima-Raum; GVE – Großvieheinheiten

Die Betriebstypologie dieser Studie deckt alle landwirtschaftlichen Betriebe in NRW ab, die ab einer bestimmten Größe registriert sind, und enthält zahlreiche betriebliche Merkmale, wie z.B. die Flächen der angebauten Feldfrüchte, Tierbestände und Arbeitskräfte sowie den Standort auf Gemeindeebene (Destatis o.D.). Die Gruppierung aller landwirtschaftlichen Betriebe in NRW erfolgt bezüglich (1) Spezialisierung, (2) Betriebsgröße und (3) Besatzdichte (Abbildung 6). Aufbauend auf Andersen *et al.* (2007, S. 355), wird eine aus der amtlichen Agrarstatistik bestehende Typologie zur Spezialisierung von Betrieben erweitert. Bei der ASE werden die landwirtschaftlichen Betriebe nach ihren wichtigsten landwirtschaftlichen Tätigkeiten zusammengefasst. Diese basieren auf ihrem relativen Beitrag zum Standardoutput, der wiederum aus bestimmten landwirtschaftlichen Tätigkeiten gemäß der EU-Typologie von 2008 berechnet wird (Europäische Kommission 2008). Der Standardoutput ist definiert als „standardisierter Wert der Bruttoerzeugung“ (Europäische Kommission 2008, S. 4). So realisiert beispielsweise ein Schweinemastbetrieb mehr als 2/3 seines Standardoutputs mit dem Verkauf von Mastschweinen. Die EU-Typologie unterscheidet zwischen 61 verschiedenen Spezialisierungen. Für die Typologie dieser Studie werden jedoch 44 Spezialisierungen ignoriert, da sie weder für NRW relevant, noch von Interesse für die untersuchte Forschungsfrage sind. Anschließend findet eine Gruppierung der Betriebe einer bestimmten Spezialisierung bezüglich ihrer Betriebsgröße in ha und ihrer Besatzdichte in GVE pro ha statt. Wie in Kapitel 3.4.1 dargelegt, stehen diese

Betriebsmerkmale im Zusammenhang mit der Betroffenheit von Betrieben durch die DüV-Novelle.

Die abgeleitete Betriebstypologie umfasst 25.914 landwirtschaftliche Betriebe und damit rund 77% aller Betriebe in NRW. Gartenbaubetriebe sowie Betriebe spezialisiert auf Dauerkulturen, Geflügel und anderes Weidevieh als Kühe werden nicht von der Typologie erfasst. Die entwickelte Betriebstypologie ermöglicht die Beurteilung der relativen Bedeutung von Betriebstypen in NRW. Die Bedeutung kann definiert werden als (1) Anteil der gesamten landwirtschaftlichen Betriebe, der durch einen Betriebstyp abgedeckt wird, (2) Anteil der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche, der durch einen Betriebstyp abgedeckt wird und (3) Anteil des Viehbestandes, der durch einen Betriebstyp abgedeckt wird.

Auswahl der untersuchten Betriebstypen

Für die Untersuchung werden Ackerbau-, Schweinemast-, Milchviehbetriebe und Betriebe mit Sauenhaltung aus der Typologie ausgewählt (Tabelle 6). Gemischtbetriebe, die sowohl Milchvieh als auch Schweinemast betreiben, sind in der Typologie enthalten, werden jedoch nicht weiter betrachtet. Die Betriebstypologie zeigt, dass alle Betriebstypen mit dieser Spezialisierung nur 6% des Mastschweinebestandes sowie 2% des Milchviehbestandes repräsentieren und daher nicht relevant sind. Darüber hinaus wird ein Schweinemastbetrieb mit einer Biogasanlage untersucht. Dieser wird jedoch nicht aus der Typologie abgeleitet, da die ASE 2016 keine Biogaserzeugung erfasst. Der Betrieb ist daher aus Literaturquellen sowie Experteneinschätzungen abgeleitet, welche in Tabelle Anhang C.2 dargelegt werden.

Die ausgewählten Betriebe, ihre Eigenschaften und zugrundeliegende Annahmen finden sich in Anhang C, sie sind jedoch in den Tabellen im Ergebnisteil enthalten. Grundsätzlich wurden typische Betriebe ausgewählt, die einen hohen Anteil der Betriebe in NRW, der landwirtschaftlichen Nutzfläche oder des Viehbestandes abdecken. Folglich repräsentieren die zehn ausgewählten typischen Betriebe 20% der landwirtschaftlichen Betriebe in NRW, 21% der landwirtschaftlichen Nutzfläche und 18% des Tierbestandes. Darüber hinaus wurden ein typischer intensiver Schweinemastbetrieb (Schw_int) und ein intensiver Betrieb mit Sauenhaltung (SauH) ausgewählt, die eine hohe Tierbesatzdichte aufweisen, da diese vermutlich besonders von der DüV-Novelle betroffen sind.

Tabelle 6 Prozentualer Anteil der ausgewählten Betriebstypen an landwirtschaftlichen Kenngrößen in NRW

Betriebstyp	Anteil an Landfläche	Anteil an Betrieben	Anteil am Tierbestand	Anteil am Milchkuhbestand	Anteil am Mastschweinbestand
Ackerbaubetrieb ohne Wirtschaftsdüngerimport (Ack_kW)	4%	8%	0%	0%	0%
Ackerbaubetrieb mit Winterraps (Ack_WR)	3%	2%	0%	0%	0%
Ackerbaubetrieb mit Zuckerrüben (Ack_ZR)	1%	1%	0%	0%	0%
Großer Milchviehbetrieb (Mil_gr)	5%	1%	5%	15%	0%
Kleiner Milchviehbetrieb (Mil_kl)	5%	3%	6%	17%	0%
Intensiver Milchviehbetrieb (Mil_int)	3%	2%	5%	14%	0%
Betrieb mit Sauenhaltung (SauH)	0%	0%	0%	0%	0%
Intensiver Schweinemastbetrieb (Schw_int)	0%	0%	1%	0%	3%
Extensiver Schweinemastbetrieb (Schw_ex)	0%	1%	0%	0%	9%
Mittel-intensiver Schweinemastb. (Sch_mit)	0%	1%	0%	0%	9%
Summe	21%	20%	18%	46%	21%

Quelle: FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Agrarstrukturerhebung, 2016, eigene Berechnung

Die Betriebe wurden in den Boden-Klima-Räumen (BKR) verortet, wo sie am häufigsten vorkommen. Der BKR determiniert die Fruchtfolge der Betriebe und somit die Eingangsdaten von SIMPLACE. Der Bericht des Teilprojektes 1 enthält eine detaillierte Erklärung des Konzepts der BKR und seiner Nutzung im Clusterprojekt. Die Ackerbaubetriebe mit Winterraps (Ack_WR) und mit Zuckerrüben (Ack_ZR) beginnen unter der DüV 2017 Wirtschaftsdünger zu importieren. Der Import von Wirtschaftsdünger wird im Rahmen der DüV 2017 mit $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ für Betriebstyp Ack_ZR und mit $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ für Betriebstyp Ack_WR exogen vorgeben. Die Betriebe werden jedoch nicht in dem BKR verortet, wo sie am häufigsten vorkommen, sondern in BKR, die nah an viehstarken Regionen sind und vermutlich unter der DüV 2017 mehr Wirtschaftsdünger importieren.

4. Ergebnisse

4.1 Kostenabschätzung für Population

Die Anpassungskosten an die DüV 2017 für spezialisierte Schweinemast- und Milchviehbetriebe sind sehr heterogen. Sie reichen von 0 bis 2,66 € je Schwein (Abbildung 7) und von 0 bis 0,83 Cent (ct) pro kg energiekorrigierter Milch (EKM) (Abbildung 8). Die durchschnittlichen Anpassungskosten je Schweinemastbetrieb betragen 959,99 € oder 0,29 ct Schwein⁻¹. Die durchschnittlichen Anpassungskosten je Milchviehbetrieb betragen wiederum 1.715,63 € oder 0,21 ct (kg EKM)⁻¹. Ein hoher Anteil der landwirtschaftlichen Betriebe (47,3% der Schweinemastbetriebe und 38,4% der Milchviehbetriebe) hat jedoch gar keine betrieblichen Anpassungskosten durch die Novellierung der DüV 2017.

4.1.1 Auswirkung der Betriebseigenschaften auf die Kosten

Um Einflussfaktoren auf die Anpassungskosten zu identifizieren, werden die Milchvieh- und Schweinemastbetriebe nach ihren Anpassungskosten gruppiert und anschließend die Unterschiede der Gruppen sowie die Merkmale der Betriebe in den Gruppen analysiert (Tabelle 7). Das statistische Metamodell, das Betriebscharakteristika als erklärende Variablen enthält, gibt außerdem Einblicke in deren durchschnittliche Auswirkung auf die Anpassungskosten (Tabelle 8).

Schweinemastbetriebe

Unter die Gruppe ohne Anpassungskosten, zu der 47% aller Schweinemastbetriebe zählen, fallen Betriebe, die bereits emissionsarme Ausbringungstechniken nutzen und eine Besatzdichte zwischen 1,11 und 2,89 GVE ha⁻¹ aufweisen. Dadurch müssen sie sich weder an strengere Grenzwerte für die Nährstoffausbringung anpassen noch in zusätzliche Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger investieren. Allerdings wenden 14,02% der Betriebe in dieser Gruppe bisher keine emissionsarmen Ausbringungstechniken an. Aufgrund ihrer geringen Besatzdichte von 1,11 - 1,47 GVE ha⁻¹ können sie jedoch weiterhin ihre gesamten Wirtschaftsdünger mit Breitverteilern auf unbestelltem Ackerland ausbringen, was gemäß DüV 2017 noch zulässig ist.

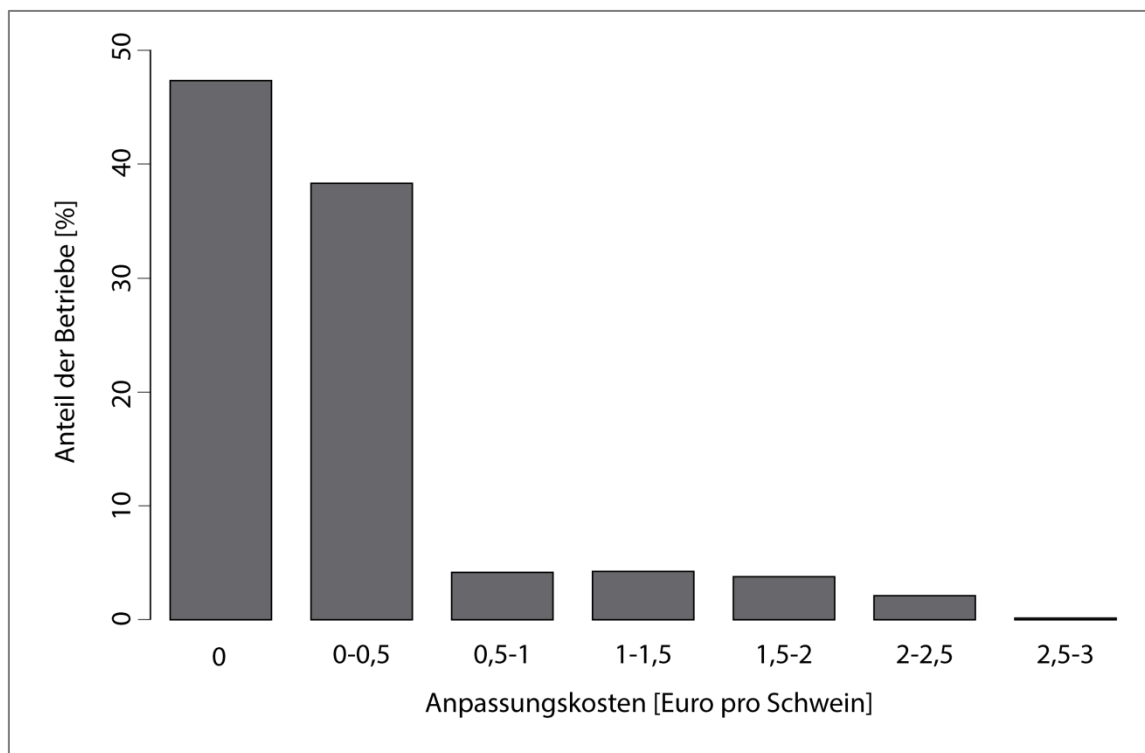


Abbildung 7 Anpassungskosten an die Düngeverordnung 2017 für spezialisierte Schweinemastbetriebe in Nordrhein-Westphalen

Das Vorhandensein von emissionsarmen Ausbringungstechniken für Wirtschaftsdünger spielt eine große Rolle für die Höhe der Anpassungskosten. Im Falle von vorhandener entsprechender Technik, sinken die durchschnittlichen Anpassungskosten um $0,19 \text{ € Schwein}^{-1}$. Der Großteil der Betriebe in der Gruppe mit Anpassungskosten zwischen 0 und $0,5 \text{ € Schwein}^{-1}$ muss sich nur durch den Einsatz von emissionsarmer Ausbringungstechnik anpassen und weist somit geringe Kosten auf. Strengere Grenzwerte für die Nährstoffausbringung oder Investitionen in zusätzliche Güllelagerkapazität müssen in dieser Gruppe nicht vorgenommen werden. Grund dafür ist die relativ geringe Besatzdichte von durchschnittlich $2,15 \text{ GVE ha}^{-1}$.

Höhere Anpassungskosten von $0,5 - 1 \text{ € Schwein}^{-1}$ bis zu $2,5 - 3 \text{ € Schwein}^{-1}$ fallen für Betriebe mit einer Besatzdichte über $2,88 \text{ GVE ha}^{-1}$ an. Anpassungskosten in dieser Höhe werden für 14,42% aller Schweinemastbetriebe ermittelt. Diese Betriebe haben zusätzliche Anpassungskosten an die strengeren Grenzwerte für die Nährstoffausbringung, insbesondere der geringere zulässige P_2O_5 -Saldo des Nährstoffvergleichs ist restriktiv für die Wirtschaftsdüngerausbringung. Welcher Grenzwert die Wirtschaftsdüngerausbringung zuerst limitiert wird durch das $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5$ Verhältnis von Schweinegülle und dem Pflanzenbedarf bedingt. Anpassungskosten fallen für diese Betriebe jedoch nicht nur aufgrund ihrer hohen Besatzdichte an, sondern auch aufgrund der P-Versorgung der Böden. Sie determiniert den

zulässigen P_2O_5 -Saldo und verursacht so Kosten für Betriebe mit hohem Tierbesatz. Das Metamodell zeigt eine Erhöhung der Anpassungskosten für Betriebe mit P-angereicherten Böden um durchschnittliche $0,05 \text{ € Schwein}^{-1}$.

Generell ist der Effekt der Tierbesatzdichte auf die Anpassungskosten differenziert zu beurteilen. Einerseits erhöht eine höhere Besatzdichte die Kosten, da der P_2O_5 -Saldo höher ist und der Anpassungsdruck größer. Die untersuchten Betriebe passen sich durch die Nutzung von stark NP-reduzierter Fütterung und dem Export von Wirtschaftsdünger an. Andererseits reduziert ab $3,8 \text{ GVE ha}^{-1}$ ein höherer Tierbesatz die Anpassungskosten. Betriebe mit einem Tierbesatz zwischen $3,8$ bis $14,82 \text{ GVE ha}^{-1}$ haben die gleichen Kosten pro ha, um sich an den strengeren P_2O_5 -Saldo anzupassen. Bei einem höheren Tierbesatz verteilen sich diese Kosten jedoch auf mehr Tiere. Das Metamodell zeigt daher nur eine geringere durchschnittliche Steigerung der Anpassungskosten um $0,11 \text{ € Schwein}^{-1}$ für eine zusätzliche GVE ha^{-1} . Auch die Investitionen in höhere Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger hängen mit der Besatzdichte der Betriebe zusammen: Erst ab 3 GVE ha^{-1} muss in zusätzliche Lagerkapazität investiert werden. Betriebe mit mehr als 3 GVE ha^{-1} finden sich in den Gruppen mit Anpassungskosten von $0,5 - 1 \text{ €}$ bis zu $2,5 - 3 \text{ € Schwein}^{-1}$. Die Anpassungskosten sinken durchschnittlich um $0,04 \text{ € Schwein}^{-1}$ für jeden weiteren Monat bereits vorhandener Lagerkapazität.

Schweinemastbetriebe, die alle oben genannten Kostentreiber aufweisen, haben die höchsten Anpassungskosten und finden sich in den Gruppen mit Kosten von $2,0 - 2,5 \text{ €}$ und $2,5 - 3,0 \text{ € Schwein}^{-1}$. Ihr Anteil an allen Schweinemastbetrieben entspricht jedoch nur $2,26\%$.

Tabelle 7 Gruppierung der Betriebe nach den Anpassungskosten an die Düngeverordnung 2017

Schweinemast							
Anpassungskostengruppe [€ Schwein ⁻¹]	0	0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹]	1,83 ^a ±0,49	2,13 ^b ±0,44	6,52 ^c ±5,20	5,28 ^c ±3,34	4,20 ^c ±1,22	3,85 ^c ±0,45	3,75 ^c ±0,16
Land [ha]	61,04 ^a ±33,50	48,42 ^b ±31,18	45,58 ^b ±28,14	47,56 ^b ±32,85	47,06 ^b ±31,07	46,75 ^b ±26,61	17,27 ^c ±12,37
Lagerkapazität Dünger [Monate]	7,09 ^a ±1,00	7,10 ^a ±0,99	7,32 ^b ±0,95	7,29 ^b ±0,96	7,08 ^a ±1,00	6,02 ^c ±0,19	6,00 ^c ±0,00
P-angereicherte Böden [Anteil der Betriebe] ¹	0,55 ^a	0,69 ^b	0,98 ^c	1,00 ^d	1,00 ^{c,d}	1,00 ^{c,d}	1,00 ^{b,c,d}
Emissionsarme Anwendungstechniken [Anteil der Betriebe] ¹	0,86 ^a	0,05 ^b	0,43 ^{c,d}	0,53 ^c	0,38 ^{d,e}	0,28 ^{e,f}	0 ^{b,f}
Milchvieh							
Anpassungskostengruppe [Cent (kg EKM) ⁻¹]	0	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,9	-	-	-
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹]	1,68 ^a ±0,58	2,13 ^b ±1,11	2,19 ^c ±1,04	1,78 ^a ±0,96	-	-	-
Land [ha]	78,98 ^a ±48,57	65,09 ^b ±38,33	60,74 ^c ±35,08	57,99 ^d ±35,97	-	-	-
Anteil Grünland [%]	0,51 ^a ±0,29	0,36 ^b ±0,20	0,64 ^c ±0,20	0,94 ^d ±0,15	-	-	-
Lagerkapazität Dünger [Monate]	7,18 ^a ±0,98	7,01 ^b ±1,00	7,07 ^b ±1,00	6,99 ^b ±1,00	-	-	-
P-angereicherte Böden [Anteil der Betriebe]	0,46 ^a	0,56 ^b	0,62 ^c	0,55 ^b	-	-	-
Emissionsarme Anwendungstechniken [Anteil der Betriebe]	0,99 ^a	0,26 ^b	0,04 ^c	0,00 ^d	-	-	-

Mittelwert für Betriebsmerkmale, sofern nicht anders angegeben; Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppenmitteln ($p > 0,05$) werden mit verschiedenen Buchstaben innerhalb einer Zeile angezeigt. Buchstaben werden aus den Testergebnissen unter Verwendung des R-Pakets „rcompanion“ 2.0.0 abgeleitet; ± – Standardabweichung; EKM – energiekorrigierte Milchleistung; GVE – Großvieheinheiten; P – Phosphor; € – Euro

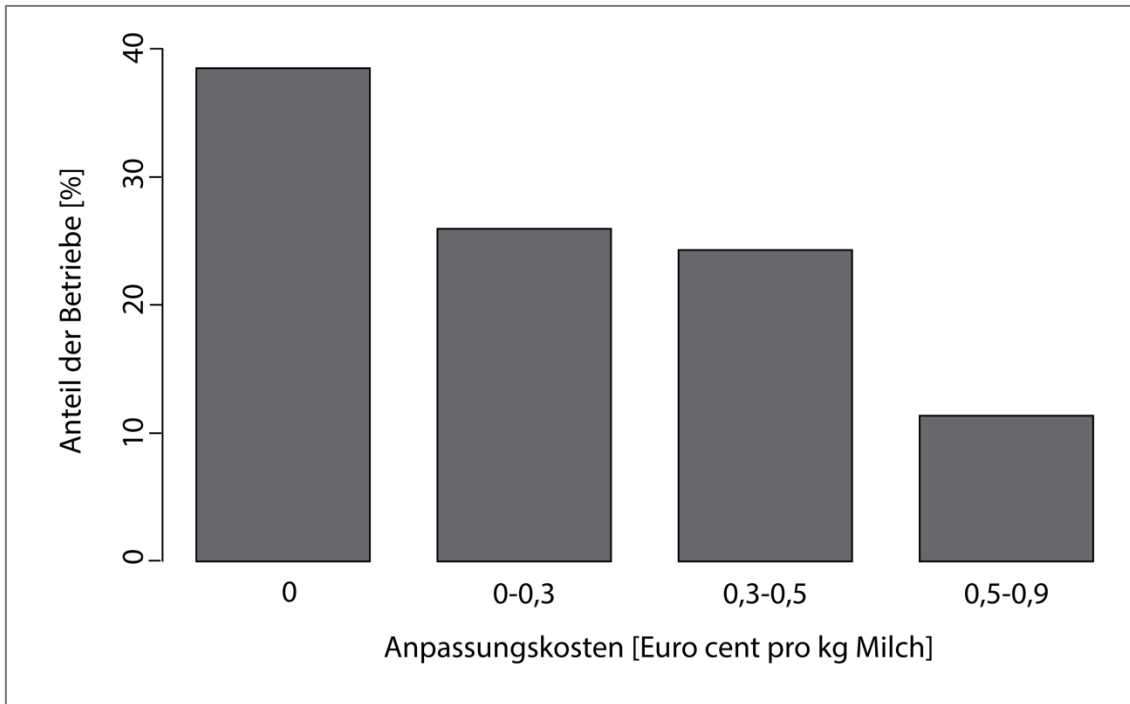


Abbildung 8 Anpassungskosten an die Düngeverordnung 2017 für spezialisierte Milchviehbetriebe in Nordrhein-Westfalen

Milchviehbetriebe

Größter Treiber der Anpassungskosten für Milchviehbetriebe ist der obligatorische Einsatz von emissionsarmen Techniken für die Wirtschaftsdüngerausbringung sowie die Investitionen in zusätzliche Lagerkapazitäten für Betriebe mit mehr als 3 GVE ha⁻¹. Während Schweinemastbetriebe sich an verschärfte Grenzwerte für die Nährstoffausbringung anpassen müssen, entfällt dies bei Milchviehbetrieben. Grund dafür ist das abweichende N:P₂O₅ Verhältnis bei Rindergülle, das den geringen P₂O₅-Überschuss unter der DüV 2017 nicht verbindlich macht. Für Milchbetriebe limitiert die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha⁻¹ den Einsatz von Wirtschaftsdünger, die unter der DüV 2007 und 2017 weitestgehend gleichgeblieben ist.

Für eine Gruppe von 37% aller Milchviehbetriebe fallen keinerlei Anpassungskosten an. Sie zeichnen sich durch eine geringe Besatzdichte (0,62 - 0,85 GVE ha⁻¹) und einen geringen Grünlandanteil (11,64% - 36,07%) aus. Grund für das Ausbleiben von Anpassungskosten sind eine Besatzdichte unter 3 GVE ha⁻¹ womit Investitionskosten in neue Lagerkapazitäten entfallen. Des Weiteren sind bei 98% aller Betriebe in dieser Gruppe bereits emissionsarme Ausbringungstechniken vorhanden. Die restlichen 2% der Betriebe können ihren gesamten Wirtschaftsdünger auf unbestelltem Acker ausbringen, was unter der DüV 2017 in Kombination mit zeitnaher Einarbeitung noch erlaubt ist.

In allen anderen Gruppen mit Anpassungskosten von 0 - 0,3 € bis zu 2,5 - 3,0 € ist vor allem der verbindliche Einsatz von emissionsarmen Ausbringungstechniken für die Anpassungskosten verantwortlich. Diese Betriebe haben unter der DüV 2007 noch ausschließlich Breitverteiler eingesetzt. Eine genauere Betrachtung der Grünlandanteile der einzelnen Gruppen zeigt, dass die Kosten für neue Technologien mit steigendem Grünlandanteil zunehmen. Bei einem Anstieg des Grünlandanteils um 1% erhöhen sich die Anpassungskosten um $0,002 \text{ ct (kg EKM)}^{-1}$. Grund dafür ist zum einen, dass Betriebe mit einem hohen Anteil an Ackerland die Verwendung der teuren Technologie teilweise vermeiden können indem sie Wirtschaftsdünger auf unbestelltem Land ausbringen. Zum anderen ist die Anwendung von Schleppschuh auf Grünland leicht teurer als die Verwendung von Schleppschlauch auf Ackerland. Das Metamodell zeigt eine durchschnittliche Kostensenkung von $0,31 \text{ ct (kg EKM)}^{-1}$, wenn bereits emissionsarme Ausbringungstechnologie auf dem Milchviehbetrieb vorhanden ist.

Ebenso wie bei den Schweinemastbetrieben gibt es auch unter den Milchviehbetrieben eine Gruppe, die zwar bereits emissionsarme Ausbringungstechnologien verwendet, aber aufgrund von Besatzdichten über 3 GVE ha^{-1} und unzureichenden Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger dennoch Anpassungskosten aufweist. Insgesamt haben 11,5 % der Milchviehbetriebe einen Tierbesatz von mehr als 3 GVE ha^{-1} . Unter der DüV 2017 sind Lagerkapazitäten von mindestens 9 Monaten nachzuweisen. Das Metamodell zeigt, dass bei Betrieben, die bereits über Lagerkapazitäten von 8 anstelle von 6 Monaten verfügen, die Anpassungskosten im Durchschnitt um $0,013 \text{ ct (kg EKM)}^{-1}$ sinken.

4.1.2 Meta-Model für systematische Sensitivitätsanalysen

Input- und Outputpreise beeinflussen ebenfalls die Höhe der Anpassungskosten. Das Metamodell zeigt einen signifikanten Einfluss von Schweinepreisen. Eine Erhöhung des Schweinepreises um $1 \text{ € (kg Schlachtgewicht)}^{-1}$ erhöht die Anpassungskosten um $0,33 \text{ € Schwein}^{-1}$ (Tabelle 8). Für Milchpreise findet das Metamodell auch einen signifikanten Einfluss. Die Anpassungskosten hängen aus zwei Gründen von den Schweinepreisen ab. Zum einen reduzieren Betriebe ihre Besatzdichte, um den niedrigeren P_2O_5 -Saldo einzuhalten, insbesondere wenn die Preise für überbetriebliche Nährstoffverwertung hoch sind. Die Reduktion der Besatzdichte ist folglich teurer bei hohen Schweinepreisen. Des Weiteren verringern Betriebe mit einer Besatzdichte von etwas über 3 GVE ha^{-1} die Herdengröße, um Investitionen in zusätzliche Lagerkapazitäten zu vermeiden. Letzteres ist auch für Milchviehbetriebe vereinzelt der Fall, das Metamodell findet jedoch keinen signifikanten Zusammenhang.

Tabelle 8 Statische Meta-Modelle für systematische Sensitivitätsanalysen

	Schweine	Milchvieh
Schnittpunkt	0,1178	0,1832***
Land [ha]	-0,000039	-0,00018***
Anteil Grünland [%]	-	0,2292***
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹]	0,1109***	0,0438***
Lagerkapazität Dünger [Monate]	-0,0378***	-0,00636***
Emissionsarme Anwendungstechniken [Dummy]	-0,1903***	-0,3052***
P-angereicherte Böden [Dummy]	0,0507***	-0,0037
Schweinepreis [€ (kg Schlachtkörpergewicht) ⁻¹]	0,3314***	-
Milchpreis [€ (kg EKM ⁻¹)]	-	-0,00036
Strohpreis [€ t ⁻¹]	0,000068	0,000044
Gülle Exportkosten [€ m ⁻³]	0,0085***	0,000409*
Gülle Ausbringungskosten [€ m ⁻³]	0,0642**	0,1771***
Minimaler Bedarf an chemischem Dünger [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	0,0712***	0,0105***
Mineraldüngeräquivalente [%]	-0,5161***	0,000755
R-Quadrat angepasst	0,2699	0,7559

Anmerkung: Die Zahlen in den Spalten stellen Regressionskoeffizienten dar; *, ** und *** zeigt die Signifikanz bei 0,01, 0,001 und 0 an; GVE – Großvieheinheit; EKM – energiekorrigierten Milchleistung; € – Euro

Wie zu erwarten zeigt das Metamodell, dass die Kosten für Wirtschaftsdüngerexport einen starken Einfluss auf die Anpassungskosten durch die DüV 2017 haben. Dieser Zusammenhang ist hochsignifikant für Schweinemastbetriebe, da der Export von Wirtschaftsdünger eine zentrale Anpassungsstrategie ist, um den strengere P₂O₅-Saldo einzuhalten. Der Anstieg der Exportkosten um 1 € m⁻³ erhöht die Anpassungskosten um 0,0085 € Schwein⁻¹. Der Wert ist gering, da er den durchschnittlichen Anstieg repräsentiert und sich zahlreiche Schweinemastbetriebe aufgrund einer geringen Tierbesatzdichte nicht an strengere Nährstoffsalden anpassen müssen. Milchviehbetriebe mit mehr als 3 GVE ha⁻¹, die unter der DüV 2007 bereits Wirtschaftsdünger exportieren, verringern ihren Tierbesatz im Falle besonders hoher Exportkosten von 15-20 € m⁻³. Produktion ist dann in der Kombination mit den vorgeschriebenen Investitionen in zusätzliche Lagerkapazitäten nicht mehr profitabel. Daher findet sich im Metamodell auch ein signifikanter Einfluss des Milchpreises auf die Anpassungskosten.

Auch ein Anstieg der Kosten für die verpflichtenden emissionsarmen Ausbringungstechniken erhöht die Anpassungskosten deutlich. Ein Preisanstieg von 1 € m⁻³ führt im Durchschnitt zu einer Erhöhung der Anpassungskosten eines Milchviehbetriebs um 0,18 ct (kg EKM)⁻¹, für Schweinemastbetriebe um 0,06 € Schwein⁻¹.

Die Annahmen bezüglich des Mineraldüngers, der unabhängig vom und zusätzlich zum Wirtschaftsdünger benötigt wird, beeinflusst die Nährstoffsalden und hat so ebenfalls Auswirkungen auf die Höhe der Anpassungskosten der Betriebe. Der Effekt ist bei Schweinemastbetrieben besonders stark: Ein kg zusätzlicher Mineraldünger erhöht die Anpassungskosten um 0,07 € Schwein⁻¹. Grund dafür ist die Annahme, dass alle Kulturpflanzen im Gegensatz zu Grünland Mineraldünger benötigen. Mais spielt hierbei eine besondere Rolle, da die typische mineralische Starter-Düngung bei 20 kg P₂O₅ ha⁻¹ liegt. Diese Düngung unabhängig vom Wirtschaftsdüngereinsatz beeinflusst stark den P₂O₅-Saldo, welches für Schweinemastbetriebe am restriktivsten auf die Wirtschaftsdüngerausbringung wirkt. Aber auch Milchviehbetriebe, die in der Sensitivitätsanalyse einen hohen Anteil an Ackerland haben sowie einen hohen Mindestbedarf an Mineraldünger, müssen aufgrund des abgesenkten P₂O₅-Saldos Wirtschaftsdünger exportieren. Demnach erhöhen sich bei einer Steigerung des Mindestbedarfs an Mineraldünger die Anpassungskosten bei Milchviehbetrieben ebenfalls.

In der Düngedarfsermittlung der DüV 2017 werden auch die MDÄ für N im Wirtschaftsdünger festgelegt. Das Metamodell zeigt exemplarisch die Auswirkungen der Realisierung höherer MDÄ durch optimales Wirtschaftsdüngermanagement. Ein Anstieg der MDÄ um 1% reduziert die Anpassungskosten durchschnittlich um 0,005 € Schwein⁻¹. Betriebe mit hohem Tierbesatz müssen unter der DüV 2017 Wirtschaftsdünger exportieren, um den strengerem P₂O₅-Saldo einzuhalten. Dabei wird nicht nur das überschüssige P₂O₅ exportiert, sondern auch N, der für die Pflanzenernährung benötigt und durch teuren Mineraldünger ersetzt werden muss. Grund dafür ist die Divergenz des N:P₂O₅ Verhältnisses im Wirtschaftsdünger und dem Nährstoffbedarf der Pflanzen (Schröder 2005). Höhere MDÄ führen zu einer Annäherung der N:P₂O₅ Verhältnisse und senkt die Kosten für zusätzlichen mineralischen N-Dünger.

4.2 Kosten und Umweltwirkung typischer Betriebe

Die Darstellung der Kosten und Umweltwirkungen ist nach Ausrichtung der Betriebstypen in Schweinemastbetriebe, Sauenhaltung, Milchviehbetriebe und reine Ackerbaubetriebe gegliedert. Die Bedeutung der ausgewählten Betriebstypen in NRW ist Tabelle 6 zu entnehmen, die detaillierten Betriebseigenschaften finden sich in Anhang C.

4.2.1 Schweinemastbetriebe

Extensiver Schweinemastbetrieb (Schw_ex)

Der extensive Schweinemastbetriebstyp (Schw_ex) ist durch eine geringe Tierbesatzdichte von 1,7 GVE ha⁻¹ und einer Flächenausstattung von 75 ha gekennzeichnet. Er findet sich in dem BKR 142 (Niederrhein/Südl. Münsterland), baut die Fruchtfolge Winterweizen,

Wintergerste und Mais für Corn-Cob-Mix an und verwendet bereits unter der DüV 2007 emissionsarme Technik zur Wirtschaftsdüngerausbringung (Tabelle Anhang C.1). Der Betrieb muss keinerlei Anpassungen vornehmen, um die DüV 2007 zu erfüllen (Tabelle 9). Die verfügbaren Nährstoffe aus Wirtschaftsdünger würden nur zu geringen Ernteerträgen führen, so dass der Betrieb zusätzlich Mineraldünger von $91,70 \text{ kg N ha}^{-1}$ und $19,27 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ im betrieblichen Durchschnitt einsetzt. Obwohl rechtlich gesehen keine Nährstoffüberschüsse gesenkt werden müssen, setzt der landwirtschaftliche Betrieb sowohl unter der DüV 2007 als unter der DüV 2017 eine NP-reduzierte Fütterungsstrategie ein, da die Futterkosten im Vergleich zu Alternativen etwas geringer sind (Kapitel 7). Aufgrund des geänderten Berechnungsschemas, steigen unter der DüV 2017 sowohl der N-Überschuss als auch die Ausbringungsobergrenze. Die NO_3^- -Auswaschung beträgt $33,4 \text{ kg NO}_3^- \text{ N ha}^{-1}$. Die NH_3 -Emissionen aus Stall, Lagerung und Ausbringung liegen bei $38,0 \text{ kg NH}_3 \text{ N ha}^{-1}$, die Emissionen aus der Ausbringung machen mit $5,4 \text{ kg NH}_3 \text{ N ha}^{-1}$ lediglich einen geringen Anteil aus. Unter der DüV 2007 sind die NH_3 -Verluste im Vergleich zu mittelintensiven Schweinemastbetrieben (Schw_mit) und intensiven Schweinemastbetrieben (Schw_int) geringer, da der Betrieb bereits emissionsarme Ausbringungstechniken einsetzt und aufgrund der geringen Besatzdichte das gesamte ausgeschiedene und eingesetzte N geringer ist.

Mittelintensiver Schweinemastbetrieb (Schw_mit)

Der mittelintensive Schweinemastbetrieb ist durch eine Besatzdichte von $2,3 \text{ GVE ha}^{-1}$, hoch mit P versorgten Böden sowie durch das Fehlen von emissionsarmen Ausbringungstechniken charakterisiert. Er findet sich in dem BKR 148 (Südl. Weser-Ems-Gebiet), weist eine Flächenausstattung von 63 ha auf und baut die Fruchtfolge Winterweizen, Wintergerste, Mais und Mais für Corn-Cob-Mix an (Tabelle Anhang C.1). Im Rahmen der DüV 2007 erreicht der Betriebstyp keine Grenzwerte zur Nährstoffausbringung und kann die Zeit, in der die Wirtschaftsdüngerausbringung untersagt ist, mit der vorhandenen Lagerkapazität von 6 Monaten überbrücken. Ebenso wie Schw_ex setzt Schw_mit bereits unter der DüV 2007 NP-reduzierte Fütterung ein. Schw_mit weist unter der DüV 2007 eine NO_3^- -Auswaschung von $46,57 \text{ kg ha}^{-1}$ und eine NH_3 -Ausgasung von $56,67 \text{ kg ha}^{-1}$ auf (Tabelle 9).

Im Rahmen der DüV 2017 muss Schw_mit den P_2O_5 -Überschuss leicht von $2,41$ auf 0 kg ha^{-1} senken sowie emissionsarme Ausbringungstechniken einsetzen. Darüber hinaus nimmt unter der DüV 2017 die Menge an Wirtschaftsdünger, die nach der Ernte der Hauptkultur ausgebracht werden kann, ab. Dies führt jedoch nicht zu einer Anpassung des Anbauprogramms für Schw_mit, da es zur Einhaltung der Sperrfristen ausreicht, den Wirtschaftsdünger im Herbst zur Wintergerste auszubringen. Die Anpassungskosten je Schwein für diesen Betriebstyp betragen lediglich $0,41 \text{ €}$. Diese entstehen hauptsächlich durch die Notwendigkeit, emissionsarme Technik zur Wirtschaftsdüngerausbringung einzusetzen.

Um den P_2O_5 -Überschuss zu senken, verkauft Schw_mit sowohl Stroh von 4,49 ha, um den Nährstoffentzug zu erhöhen, und exportiert mit $0,54 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ eine kleine Menge Wirtschaftsdünger. Aufgrund des geänderten Berechnungsschemas der DüV 2017, steigen die Grenzwerte für den N-Überschuss und die Ausbringungsobergrenze. Die Berechnung des N-Überschusses nach der Methodik der DüV 2007 zeigt, dass tatsächlich ein Rückgang des Überschusses vorliegt. Aufgrund niedriger NH_3 -Verluste erhöht die Verwendung der Schleppschlauchtechnologie für 65% des ausgebrachten Wirtschaftsdüngers die pflanzenverfügbare Menge an N. Dadurch kann der Mineraldüngereinsatz leicht verringert werden, was zu einem reduzierten N Überschuss führt. Der Rückgang an Mineraldünger von 79,88 auf $77,00 \text{ kg ha}^{-1}$ senkt die Düngemittelkosten von 102,21 auf $98,99 \text{ € ha}^{-1}$. Dies kompensiert jedoch nicht die höheren Kosten für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger mit der neuen Technologie von $13,61 \text{ € ha}^{-1}$ oder $0,32 \text{ € Schwein}^{-1}$ im betrieblichen Durchschnitt.

Der Schweinemastbetriebstyp Schw_mit muss folglich nur geringfügige Anpassungen vornehmen, um die DüV 2017 zu erfüllen. Daher ist auch die Veränderung der Emissionen gering. Die NO_3^- Verluste sinken lediglich von 46,57 auf $45,12 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$, bedingt durch die leicht geringeren Mengen an eingesetztem Wirtschafts- und Mineraldünger. NH_3 -Ausgasungen aus der Wirtschaftsdüngerausbringung sinken hingegen deutlich von 12,83 auf $8,70 \text{ kg NH}_3 \text{-N ha}^{-1}$. Da die Emissionen aber hauptsächlich im Stall und während der Lagerung auftreten, beträgt die Reduktion der gesamten NH_3 -Verluste nur 7,32%. Aufgrund der generellen Verringerung des N-Einsatzes, nehmen auch die N_2O - und NO -Verluste leicht ab.

Tabelle 9 Betriebsindikatoren für typische Schweinemastbetriebe unter Düngeverordnung 2007 und 2017

		Schw_ex		Sch_mit		Schw_int		
		DüV 2007	DüV 2017	DüV 2007	DüV 2017	DüV 2007	DüV 2017	DüV 2017/SB
N-Überschuss ^a	kg ha ⁻¹	21,64	38,54 (21,64)	33,82	49,45 (26,59)	29,13	37,89 (4,11)	37,89 (4,11)
P ₂ O ₅ -Überschuss	kg ha ⁻¹	0	0	2,41	0	20	0	0
N-Überschuss Stoffstrombilanz	kg ha ⁻¹	-	-	-	-	154,52	129,83	129,83
N-Überschuss Stoffstrombilanz Betriebsgrenze ^b	kg ha ⁻¹	-	-	-	-	106,04	104,22	104,22
Ausbringungsobergrenze für N org.	kg ha ⁻¹	78,83	90,09	106,64	119,22	153,03	138,71	138,71
N-Quote (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	11.760,84	11.760,84	10.469,68	10.474,05	5.536,11	5.565,54	5.565,54
N-Anwendung (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	10.939,55	10.939,55	9.704,02	9.405,3	5120,2	4.694,79	4.694,79
N-Entzug mit Ernte	kg ha ⁻¹	137,62	137,62	137,47	139,16	148,76	149,93	149,93
Wirtschaftsdünger	m ³ ha ⁻¹	15,94	15,94	21,56	21,02	30,93	23,44	23,44
Chemischer N-Dünger	kg ha ⁻¹	91,7	91,7	79,88	77	47,36	60,36	60,36
Chemischer P ₂ O ₅ -Dünger	kg ha ⁻¹	19,27	19,27	10	10	10	10	10
Besatzdichte	GVE ha ⁻¹	1,7	1,7	2,3	2,3	3,4	3,4	3,4
Wirtschaftsdüngerexport	m ³ ha ⁻¹	0	0	0	0,54	0,92	8,42	8,42
Lagerkapazität Wirtschaftsdünger	m ³ Betrieb ⁻¹	595	595	679	679	530	802	802
Strohexport	ha Betrieb ⁻¹	0	0	0	4,49	16,64	16,64	16,64
Ausbringung mit Breitverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	0	0	1.357,5	457,31	1.029,38	437,33	437,33
Ausbringung mit Schleppschlauchverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	1.189,5	1.189,5	0	866,23	0	342,79	342,79
Zwischenfruchtanbau	ha Betrieb ⁻¹	0	0	0	0	0,65	0	0
NH ₃ -N-Emissionen	kg ha ⁻¹	38,07	38,07	56,67	52,52	81,73	72,82	72,82
NO-N-Emissionen	kg ha ⁻¹	2,1	2,1	2,31	2,24	2,51	2,22	2,22
N ₂ O-N-Emissionen	kg ha ⁻¹	2,67	2,67	3,21	3,11	3,96	3,63	3,63
NO ₃ -N-Emissionen	kg ha ⁻¹	33,40	33,40	46,57	45,12	50,16	37,94	37,94
Anpassungskosten	€ Mastschwein ⁻¹				0,42		2,32	

^a Der N-Überschuss in Klammern unter DüV 2017 wird nach dem Kalkulationsschema des DüV 2007 berechnet; ^b Im Rahmen der Stoffstrombilanzverordnung wird ein betriebsindividueller Grenzwert für die Beschränkung des Saldos herangezogen, der jedoch in der Modellierung nicht bindend ist, da der vorliegende Betrieb stattdessen die einheitliche Obergrenze von 175 kg N ha⁻¹ wählt. DüV – Düngeverordnung; org. – organisch; GVE – Großvieheinheiten; N – Stickstoff; P₂O₅ – Phosphat; NH₃ – Ammoniak; NO – Stickstoffmonoxid; N₂O – Distickstoffoxid; NO₃⁻ – Nitrat; € – Euro; SB – Stoffstrombilanzverordnung; Schw_ex – Extensiver Schweinemastbetrieb; Sch_mit – Mittelintensiver Schweinemastbetrieb; Schw_int – Intensiver Schweinemastbetrieb

Intensiver Schweinemastbetrieb (Schw_int)

Der intensive Schweinemastbetrieb zeichnet sich durch eine hohe Tierbesatzdichte von 3,40 GVE ha⁻¹, hoch mit P versorgte Böden und dem Fehlen von emissionsarmer Ausbringungstechnik aus. Er findet sich in dem BKR 148 (Südl. Weser-Ems-Gebiet), weist eine Flächenausstattung von 33 ha auf und baut die Fruchtfolge Winterweizen, Wintergerste, Mais und Mais für Corn-Cob-Mix an (Tabelle Anhang C.1). Um den Nährstoffsaldo für P₂O₅ von 20 kg ha⁻¹ einzuhalten, verkauft der Betriebstyp bereits unter der DüV 2007 Stroh von 16,64 ha Wintergetreide und exportiert 0,92 m³ ha⁻¹ Wirtschaftsdünger. Trotz des Überschusses verwendet der Betriebstyp P₂O₅-Mineraldünger als Startdünger für Mais. Wie die anderen untersuchten Schweinemastbetriebe setzt Schw_int bereits unter der DüV 2007 NP-reduzierte Fütterung ein. Darüber hinaus baut der Betriebstyp auf 0,65 ha Zwischenfrüchte an, um im Herbst mehr Wirtschaftsdünger ausbringen zu können. Die zur Verfügung stehende Lagerkapazität reicht nicht aus, um die Sperrfristen der DüV 2007 und den NRW Herbstlerlass zu erfüllen. Schw_int weist mit 50,16 kg NO₃⁻-N ha und 81,73 kg NH₃-N ha⁻¹ im Vergleich zu den anderen Schweinemastbetrieben höhere Emissionen unter der DüV 2007 auf.

Im Rahmen der DüV 2017 muss sich Schw_int an den abgesenkten P₂O₅-Saldo anpassen, die Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger erhöhen sowie emissionsarme Ausbringungstechniken einsetzen. Dadurch entstehen Anpassungskosten in Höhe von 2,32 € Schwein⁻¹. Um den P₂O₅-Überschuss von 20 auf 0 kg ha⁻¹ zu senken, exportiert der Betriebstyp zusätzlich 7,50 m³ ha⁻¹ Wirtschaftsdünger. Mit 1,41 € Schwein⁻¹ verursacht dies einen erheblichen Anteil der Anpassungskosten. Der P₂O₅-Überschuss im Rahmen der DüV 2007 reflektiert ein niedriges N:P₂O₅ Verhältnis in Schweinegülle. Der erhöhte Export von Wirtschaftsdünger unter der DüV 2017 führt daher dazu, dass N, der für die Pflanzenernährung gebraucht wird, den Betrieb verlässt. Als Folge steigt der Verbrauch von N aus Mineraldünger von 47,36 auf 60,63 kg N ha⁻¹, und somit auch die Kosten für Mineraldünger von 65,94 auf 80,44 € ha⁻¹. Aufgrund des geänderten Berechnungsschemas der DüV 2017, erhöht sich der N Überschuss leicht. Nach der alten Überschussberechnung kommt es jedoch zu einem Rückgang von 29,13 auf 4,11 kg N ha⁻¹. Unter der DüV 2017 muss der Betriebstyp 342,79 m³ des Wirtschaftsdüngers mit Schleppschlauchtechnik ausbringen. Die verbleibenden 428,89 m³ können immer noch mit dem Breitbrandverteiler ausgebracht werden, gefolgt von einer sofortigen Einarbeitung. Der Betriebstyp baut 50% Mais in der Fruchtfolge an, was dem Betrieb, im Gegensatz zu Ackerbaubetrieben mit mehr Winterkulturen, im Frühjahr mehr Wirtschaftsdüngerausbringung auf unbestelltem Ackerland ermöglicht. Da der Schweinemastbetrieb Schw_int die 3 GVE ha⁻¹ überschreitet, muss er seine Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger von 530 auf 802 m³ erhöhen. Dies ist mit jährlichen Kosten von 0,85 € Schwein⁻¹ verbunden. Da nun die Lagerkapazität ausreicht, um die Sperrfristen zu

überdauern, ist der Anbau von Zwischenfrüchten im Rahmen der DüV 2017 nicht mehr notwendig und wird aufgegeben.

Durch die DüV 2017 erzielt Schw_int hohe Emissionsreduktionen. Die NO_3^- -Auswaschung wird von 50,16 auf 37,94 kg NO_3^- -N reduziert. Dies ist auf den starken Rückgang des eingesetzten Wirtschaftsdüngers um 40 kg N ha^{-1} zu erklären, wohingegen der Einsatz von N aus Mineraldünger nur um 13 kg ha^{-1} steigt. NH_3 -Ausgasung durch die Ausbringung von Wirtschaftsdünger wird aufgrund der schnelleren Einarbeitung auf unbestelltem Ackerland sowie der Anwendung von emissionsarmen Ausbringungstechniken von 17,53 auf 8,48 kg NH_3 -N reduziert. Da die Emissionen aber hauptsächlich im Stall und während der Lagerung auftreten, beträgt die Reduktion der gesamten NH_3 -Verluste nur 10,90%. Die Emissionsminderung wird auch durch den verstärkten Export von Wirtschaftsdünger aus dem Betrieb erzielt, was zu Emissionsänderungen im importierenden Betrieb führen kann (Kapitel 4.2.5). Der Wirtschaftsdüngerexport sowie die insgesamt geringere Anwendungsmenge an N sind auch hauptverantwortlich für die Abnahme der N_2O - und NO -Verluste. Erstaunlicherweise ist die NO_3^- -Auswaschung unter der DüV 2017 für den intensiveren Betrieb Schw_int geringer als für Schw_mit. Letzterer bringt im Herbst Wirtschaftsdünger zu Wintergerste aus, um die Sperrfristen überbrücken zu können. Die Ausbringung im Herbst birgt ein besonders hohes Risiko für NO_3^- -Verluste. Im Gegensatz dazu ermöglicht die erhöhte Lagerkapazität von Schw_int, die Ausbringung des gesamten Wirtschaftsdüngers auf das Frühjahr zu verschieben und führt zu einer geringeren NO_3^- -Auswaschung.

Für den Schw_int wird darüber hinaus auch die Anpassung durch die Stoffstrombilanzverordnung berechnet, die ebenfalls in Tabelle 9 abgebildet werden. Der Saldo der Stoffstrombilanz liegt unter der DüV 2007 bei 154,52 g N ha^{-1} . Durch die Maßnahmen der DüV 2017 sinkt es auf 129,83 kg N ha^{-1} ab. In einem weiteren Modelllauf werden die Begrenzungen des Saldos nach Stoffstrombilanz eingeführt. Der Betrieb kann sich entscheiden, ob sein Saldo nach einer betriebsindividuellen Grenze oder einer einheitlichen Obergrenze von 175 kg N ha^{-1} bewertet werden soll. Letztere ist die günstigere Option, da der Wert bereits eingehalten wird und somit keine zusätzlichen Anpassungskosten, aber auch keine Emissionsreduktionen vorliegen. Der betriebsindividuelle Grenzwert, der für den Betrieb um 105 kg N ha^{-1} liegt, hätte hingegen deutliche Anpassungen notwendig gemacht.

4.2.2 Schweinemastbetrieb mit Biogasanlage

Die Biogasanlage wird in Kombination mit einem Schweinemastbetrieb betrieben. Im Gegensatz zu den anderen Betriebstypen ist sie nicht aus der ASE abgeleitet, sondern basiert auf Daten aus der Literatur und Experteneinschätzungen (Tabelle Anhang C.2). Der Betrieb betreibt eine 500 Kilowatt Anlage, die unter dem Erneuerbare-Energien-Gesetz 2009 gebaut wurde. Er weist eine Flächenausstattung von 150 ha auf, liegt in dem BKR 148 (Südliches

Weser-Ems Gebiet) und baut die Fruchtfolge Silomais, Silomais und Winterweizen an. Der Betrieb hat einen Tierbesatz von 2,7 GVE, weist hoch mit P versorgte Böden auf und hat noch keine emissionsarme Ausbringungstechnik unter der DüV 2007.

Tabelle 10 Betriebsindikatoren für einen Betrieb mit Biogasanlage und Schweinemast unter Düngeverordnung 2007 und 2017

		Schweinemast mit Biogasanlage	
		DüV 2007	DüV 2017
Erzeugte Energie	kWh	3.915,574	3.915,574
Anteil pflanzliches Substrat	%	70	70
Ausnutzung der Anlagenkapazität	%	100	100
Pflanzliches Substrat, eigene Erzeugung	t	4.602,59	4.620,00
Pflanzliches Substrat, Zukauf	t	4.693,24	4.673,45
N-Überschuss ^a	kg ha ⁻¹	-18,39	-7,50 (-34,32)
P ₂ O ₅ -Überschuss	kg ha ⁻¹	20	0
Ausbringungsobergrenze für N org.	kg ha ⁻¹	69,11	133,46
N-Quote (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	26.683	26.716
N-Anwendung (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	18.948	18.311
N-Entzug mit Ernte	kg ha ⁻¹	172,69	173,08
Wirtschaftsdünger	m ³ ha ⁻¹	34,98	27,36
Chemischer N-Dünger	kg ha ⁻¹	19,11	41,07
Chemischer P ₂ O ₅ -Dünger	kg ha ⁻¹	13,33	13,33
Besatzdichte	GVE ha ⁻¹	2,7	2,7
Wirtschaftsdüngerexport	m ³ ha ⁻¹	34,57	42,19
Lagerkapazität Wirtschaftsdünger	m ³ Betrieb ⁻¹	3.796	3.769
Strohexport	ha Betrieb ⁻¹	50	50
Ausbringung mit Breitverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	1.136,75	0
Ausbringung mit emissionsarmer Ausbringungstechnik	m ³ Betrieb ⁻¹	4.110,27	4.104,34
Zwischenfruchtanbau	ha Betrieb ⁻¹	0	0
NH ₃ -N Emissionen	kg ha ⁻¹	87,89	69,69
NO-N Emissionen	kg ha ⁻¹	2,71	2,53
N ₂ O-N Emissionen	kg ha ⁻¹	3,99	3,65
NO ₃ ⁻ -N Emissionen	kg ha ⁻¹	41,66	41,03
Anpassungskosten	€ kWh ⁻¹		0,004

^a Der N-Überschuss in Klammern unter DüV 2017 wird nach dem Kalkulationsschema des DüV 2007 berechnet; DüV – Düngeverordnung; org. – organisch; € – Euro; GVE – Großvieheinheiten; kWh – Kilowattstunde; N – Stickstoff; P₂O₅ – Phosphat; NH₃ – Ammoniak; NO – Stickstoffmonoxid; N₂O – Distickstoffoxid; NO₃⁻ – Nitrat; t – Tonne.

Bereits unter der DüV 2007 muss der Betrieb Gärreste exportieren, und zwar 34,57 m³ ha⁻¹ (Tabelle 10). Dabei ist der zulässige P₂O₅-Saldo von 20 kg ha⁻¹ für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger bindend. Der N-Saldo liegt bei -18,39 kg ha⁻¹ und die Ausbringungsobergrenze, die noch keine Gärreste pflanzlichen Ursprungs enthält, bei 69,11 kg ha⁻¹. Wie auch der Betriebstyp Schw_int, setzt der Betrieb bereits stark NP reduzierte Fütterung ein und verkauft Stroh von der gesamten Getreidefläche. Die hohen Exporte an

Gärresten sind auch vor dem Hintergrund zu bewerten, dass die Hälfte des pflanzlichen Substrats auf den Betrieb importiert wird. Bereits unter der DüV 2007 ist es für den Betrieb optimal, teurere emissionsarme Ausbringungstechnik zu nutzen, um eine höhere Ausnutzung von N zu gewährleisten, wodurch unter anderem der negative Saldo der N-Bilanz zustande kommt. Die NO_3^- -Auswaschungen liegen bei $42 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$ und die NH_3 -Verluste bei $87,89 \text{ kg NH}_3 \text{-N ha}^{-1}$.

Um die Vorgaben DüV 2017 einzuhalten, muss der Betrieb den Einsatz von emissionsarmer Ausbringungstechnik vergrößern und seinen P_2O_5 -Saldo von 20 auf 0 kg ha^{-1} senken. Dafür fallen Kosten von $0,004 \text{ € Kilowattstunde}^{-1}$ an. Der Großteil der Kosten entsteht durch den zusätzlichen Export von Wirtschaftsdünger, der von $34,57$ auf $42,19 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ steigt. Darüber hinaus steigen auch die Kosten für den Zukauf von Mineraldünger von $38,79$ auf $63,29 \text{ € ha}^{-1}$. Die Ausbringung von Wirtschaftsdünger steigt rechnerisch auf $133,46 \text{ kg N ha}^{-1}$ durch den Einbezug von Gärresten pflanzlichen Ursprungs. Dieser Grenzwert ist jedoch nicht bindend für die Wirtschaftsdüngerausbringung. Der Betrieb entscheidet sich, seinen gesamten Wirtschaftsdünger unter der DüV 2007 mit emissionsarmer Ausbringungstechnik auszubringen. Dadurch und durch den Export von Wirtschaftsdünger sinken die NH_3 -Verluste von $87,89$ auf $69,69 \text{ kg NH}_3 \text{-N ha}^{-1}$. Auch die NO_3^- -Auswaschungen sinken leicht von 42 auf $41 \text{ kg NO}_3^- \text{-N ha}^{-1}$.

Die Darstellung der Biogasanlage ist aufgrund der schlechten Datenlage als explorative und beispielhafte Analyse zu verstehen. So entsteht eine große Einschränkung unter anderem dadurch, dass die Biogasanlage nicht durch die Betriebstypologie abgebildet wird. Die Limitierungen werden in der Diskussion erneut aufgegriffen (Kapitel 5.2.4). Außerdem beschränkt sich die Analyse auf eine Biogasanlage in Kombination mit Schweinemast. Abweichende Betriebskombinationen, wie beispielweise mit Milchvieh, führen unter Umständen dazu, dass andere Vorgaben der DüV 2017 bindend sind und Kosten in anderer Höhe entstehen.

4.2.3 Sauenhaltung

Der typische Betrieb mit Sauenhaltung zeichnet sich durch eine Tierbesatzdichte von $2,4 \text{ GVE ha}^{-1}$, hoch mit P versorgte Böden und dem Fehlen von emissionsarmer Ausbringungstechnik aus. Er findet sich in dem BKR 148, weist eine Flächenausstattung von $35,52 \text{ ha}$ auf und baut die Fruchtfolge Winterweizen, Wintergerste und Mais für Corn-Cob-Mix an (Tabelle Anhang C.2). Bezogen auf die Betriebszahl kommt er neben dem flächenlosen Betriebstyp mit Sauenhaltung in NRW am häufigsten vor. Um den zulässigen Nährstoffsaldo von $20 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ einzuhalten verkauft der Betrieb bereits unter der DüV 2007 sein gesamtes Stroh und exportiert $3,17 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ an Wirtschaftsdünger (Tabelle 11). Trotz des Überschusses verwendet der Betrieb chemischen P_2O_5 -Dünger in Höhe von $6,67 \text{ kg}$

ha⁻¹ als Startdüngergabe für Mais. Die zur Verfügung stehende Lagerkapazität ist ausreichend, um den gesamten Wirtschaftsdünger im Frühjahr auszubringen. Unter der DüV 2007 ist der Betrieb durch NH₃-Emissionen von 82,61 kg NH₃-N ha⁻¹ und NO₃⁻-Auswaschungen von 33,18 kg NO₃⁻-N ha⁻¹ gekennzeichnet.

Tabelle 11 Betriebsindikatoren für typischen Betrieb mit Sauenhaltung unter Düngeverordnung 2007 und 2017

		SauH	
		DüV 2007	DüV 2017
N-Überschuss ^a	kg ha ⁻¹	17,81	28,06 (-4,18))
P ₂ O ₅ -Überschuss	kg ha ⁻¹	20	0
Ausbringungsobergrenze für N org.	kg ha ⁻¹	137,51	127,69
N-Quote (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	5.617,74	5.600,21
N-Anwendung (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	5.290,19	4.813,84
N-Entzug mit Ernte	kg ha ⁻¹	155,69	154,88
Wirtschaftsdünger	m ³ ha ⁻¹	31,91	24,26
Chemischer N-Dünger	kg ha ⁻¹	57,49	66,00
Chemischer P ₂ O ₅ -Dünger	kg ha ⁻¹	6,67	6,67
Besatzdichte	GVE ha ⁻¹	2,41	2,41
Wirtschaftsdüngerexport	m ³ ha ⁻¹	3,17	10,82
Lagerkapazität Wirtschaftsdünger	m ³ Betrieb ⁻¹	623	623
Strohexport	ha Betrieb ⁻¹	23,68	23,68
Ausbringung mit Breitverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	1.133,43	372,75
Ausbringung mit Schleppschlauchverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	0	488,94
Zwischenfruchtanbau	ha Betrieb ⁻¹	0	0
NH ₃ -N-Emissionen	kg ha ⁻¹	82,61	75,20
NO-N-Emissionen	kg ha ⁻¹	2,37	2,09
N ₂ O-N-Emissionen	kg ha ⁻¹	3,81	3,50
NO ₃ ⁻ -N-Emissionen	kg ha ⁻¹	33,18	23,75
Anpassungskosten	€ Sau ⁻¹		0,004

^a Der N-Überschuss in Klammern unter DüV 2017 wird nach dem Kalkulationsschema des DüV 2007 berechnet; DüV – Düngeverordnung; org. – organisch; GVE – Großvieheinheiten; N – Stickstoff; P₂O₅ – Phosphat; NH₃ – Ammoniak; NO – Stickstoffmonoxid; N₂O – Distickstoffoxid; NO₃⁻ – Nitrat; € – Euro; SauH – typischer Betrieb mit Sauenhaltung

Um sich an die Vorgaben der DüV 2017 anzupassen, muss der Betriebstyp SauH emissionsarme Ausbringungstechnik einsetzen und den P₂O₅-Saldo weiter absenken. Dies ist mit Anpassungskosten von 21,46 € Sau⁻¹ verbunden. Die höchsten Kosten entstehen durch den zusätzlichen Export von Wirtschaftsdünger, um den P₂O₅-Saldo von 0 kg ha⁻¹ einzuhalten. Wie bei dem Schw_{int} verlässt dabei jedoch auch N den Betrieb, das für die Pflanzenernährung gebraucht wird. Der Einsatz von mineralischem N-Dünger erhöht sich daher von 57,49 auf 66 kg N ha⁻¹, was mit einer Erhöhung der Düngerkosten von 72,87 auf 82,36 € ha⁻¹ verbunden ist. Der N-Überschuss des typischen Betriebs und die Ausbringungsobergrenze erhöhen sich unter der DüV 2017, was jedoch auf die veränderte Berechnung zurückzuführen ist. Beide Grenzwerte sind, ebenso wie die Vorgaben der

Düngebedarfsermittlung, nicht bindend für die Nährstoffausbringung unter der DüV 2007 oder 2017. Durch den erzwungenen Export von Wirtschaftsdünger wird eine andere Düngeintensität für den Betrieb optimal. Dies führt zu einem leichten Rückgang der Erträge, beispielsweise von 7,46 auf 7,35 t ha⁻¹ für Winterweizen. Um die Vorgaben zur Ausbringungstechnik für Wirtschaftsdünger zu erfüllen, muss der Betrieb 488,94 m³ mit Hilfe von Schleppschlauch ausbringen. Der verbleibende Wirtschaftsdünger kann mit Breitverteiltern gefolgt von sofortiger Einarbeitung ausgebracht werden. Die Verwendung der teureren Ausbringungstechnik ist neben dem Export von Wirtschaftsdünger der primäre Kostentreiber für die Anpassung von SauH an die DüV 2017.

Durch die DüV 2017 realisiert der Betriebstyp SauH deutliche Emissionsreduktionen. Die NO₃⁻-Auswaschung wird von 33,18 auf 23,75 kg NO₃⁻-N verringert. Dies ist auf den starken Rückgang des eingesetzten Wirtschaftsdüngers und den unterproportionalen Anstieg des Mineraldüngereinsatzes zu erklären. NH₃-Ausgasung durch die Ausbringung von Wirtschaftsdünger wird aufgrund der schnelleren Einarbeitung auf unbestelltem Ackerland sowie der Anwendung von emissionsarmen Ausbringungstechniken von 15,17 auf 7,69 kg NH₃-N reduziert. Da die Ausbringung aber nur einen kleinen Teil der gesamten NH₃-Emissionen des Betriebes ausmacht, sinken diese nur um 9%. Der Wirtschaftsdüngerexport sowie die insgesamt geringere Anwendungsmenge an N verursachen auch die leichte Abnahme der N₂O- und NO-Verluste.

4.2.4 Milchviehbetriebe

Kleiner Milchviehbetrieb (Mil_kl)

Der typische Milchviehbetrieb Mil_kl weist eine Flächenausstattung von 70 ha auf, wovon 45 ha Grünland sind. Der Betrieb hat einen Tierbesatz von 1,51 GVE ha⁻¹, nutzt noch keine emissionsarme Ausbringungstechnik und befindet sich im BKR 134 (Sauerland). Mil_kl baut die Fruchtfolge Winterweizen, Silomais und Silomais an (Tabelle Anhang C.2). Unter der DüV 2007 erreicht er weder die zulässigen Nährstoffsalden noch die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha⁻¹. Mil_kl ist unter der DüV 2007 durch NH₃-Emissionen von 68,66 kg NH₃-N ha⁻¹ und NO₃⁻-Verlusten von 28,53 kg NO₃⁻ ha⁻¹ charakterisiert.

Um sich an die Vorgaben der DüV 2017 anzupassen, muss der Betrieb nur emissionsarme Ausbringungstechnik auf Grünland und bestelltem Ackerland einsetzen. Dies führt zu Kosten von 0,15 ct kg (EKM)⁻¹ (Tabelle 12). Zwar kann der Betrieb durch die bessere Ausnutzung von Wirtschaftsdünger seinen Mineraldüngereinsatz von 40,49 auf 25,35 kg N ha⁻¹ senken, die eingesparten Kosten kompensieren jedoch nicht die höheren Ausgaben für die emissionsarme Ausbringungstechniken im Vergleich zum Breitverteiler. Der Einsatz der Technik realisiert jedoch einen deutlichen Rückgang der NH₃-Verluste von 68,66 auf 51,20 kg NH₃-N ha⁻¹. Da sich Mil_kl nicht an strengere Vorgaben zur Nährstoffausbringung wie die

Absenkung der zulässigen Nährstoffüberschüsse anpassen muss, bleiben die NO_3^- -Verluste von der Einführung der DüV 2017 weitestgehend unberührt. Durch den geringen Tierbesatz ist außerdem keine Investition in zusätzliche Lagerkapazitäten notwendig.

Großer Milchviehbetrieb (Mil_gr)

Der typische Milchviehbetrieb Mil_gr weist eine Flächenausstattung von 125 ha auf, wovon 80 ha Grünland sind. Der Betrieb hat einen Tierbesatz von $1,49 \text{ GVE ha}^{-1}$, befindet sich im BKR 134 (Sauerland) und verwendet unter der DüV 2007 bereits emissionsarme Ausbringungstechnik. Mil_gr baut die Fruchtfolge Winterweizen, Silomais und Silomais an (Tabelle Anhang C.2). Auswertungen der ASE zeigen, dass es eine positive Korrelation zwischen der Betriebsgröße in ha und dem Einsatz von emissionsarmer Technik zur Wirtschaftsdüngerbringung gibt (Tabelle Anhang B.2).

Unter der DüV 2007 weist der Betrieb NH_3 -Ausgasungen von $50,01 \text{ kg NH}_3\text{-N ha}^{-1}$ und NO_3^- -Auswaschungen von $28,29 \text{ kg NO}_3^-\text{-N ha}^{-1}$ auf. Der N-Saldo nach DüV ist negativ und liegt bei $-38,02 \text{ kg N ha}^{-1}$. Er steigt unter der DüV 2017 auf $-29,87 \text{ kg N ha}^{-1}$ an, was jedoch auf das veränderte Berechnungsschema zurückzuführen ist. Mil_gr muss keinerlei Anpassungen vornehmen, um die Vorgaben der DüV 2017 zu erfüllen. Daher sind folglich auch die Emissionen unter DüV 2007 und 2017 identisch.

Intensiver Milchviehbetrieb (Mil_int)

Der typische Milchviehbetrieb Mil_int weist eine Flächenausstattung von 69 ha auf, wovon 26 ha Grünland sind. Damit ist der Anteil an Grünland an der gesamten Betriebsfläche geringer als bei Mil_kl und Mil_gr. Darüber hinaus hat der Betrieb eine Tierbesatzdichte von $2,36 \text{ GVE ha}^{-1}$ und nutzt noch keine emissionsarme Ausbringungstechnik unter der DüV 2007. Mil_int befindet sich in dem BKR 142 (Niederrhein/Südl. Münsterland) und repräsentiert einen typischen intensiven Milchviehbetrieb in der Region Niederrhein. Er baut die Fruchtfolge Winterweizen, Silomais und Silomais an.

Unter der DüV 2007 gelangt der Betrieb an die Ausbringungsobergrenze von 170 kg N ha^{-1} und muss daher Wirtschaftsdünger in Höhe von $10,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ exportieren. Er überschreitet auch die N-Quote unter der Düngebedarfsermittlung, diese ist jedoch unter der DüV 2007 noch nicht bindend. Hintergrund ist, dass der Betrieb durch die hohe Tierbesatzdichte einen höheren Grundfutterbedarf hat und daher das Grünland intensiver bewirtschaftet als Mil_kl und Mil_gr. Der Betrieb weist NH_3 -Emissionen von $94,68 \text{ kg NH}_3\text{-N ha}^{-1}$ und NO_3^- -Verluste von $31,61 \text{ kg NO}_3^-\text{-N ha}^{-1}$ auf.

Unter der DüV 2017 muss sich Mil_int nicht an die strengeren Nährstoffsalden anpassen, da die Ausbringungsobergrenze die Ausbringung von Wirtschaftsdünger limitiert und diese unter der neuen DüV für Milchviehbetriebe weitestgehend unverändert geblieben ist. Für diesen

Betrieb würde daher eine Wiedereinführung der Derogation eine große Rolle spielen (Kapitel 7). Der Betrieb muss sich folglich nur durch den Einsatz von emissionsarmer Ausbringungstechnik anpassen, was mit Kosten von $0,09 \text{ ct (kg EKM)}^{-1}$ verbunden ist. Die Kosten sind geringer als bei Mil_kl, da dieser einen höheren Anteil Grünland aufweist und die Kosten für emissionsarme Ausbringungstechnik dort leicht höher sind als auf Ackerland. Außerdem ermöglicht der höhere Anteil an Ackerland eine Ausbringung von mehr Wirtschaftsdünger mit Breitverteilern gefolgt von Einarbeitung innerhalb von vier Stunden. Durch den Einsatz der effizienteren Ausbringungstechnik erreicht mehr N aus der Gülle den Pflanzenbestand. Dadurch kann der Betrieb seinen Einsatz von Mineraldünger von $78,04$ auf $60,55 \text{ kg N ha}^{-1}$ reduzieren. Dies stellt außerdem sicher, dass die Vorgaben im Rahmen der Düngeplanung eingehalten werden. Der Einsatz der emissionsarmen Ausbringungstechnik reduziert die Ausgasung von NH_3 von $94,68$ auf $74,53 \text{ kg NH}_3\text{-N ha}^{-1}$ auf Betriebsebene. Die NO_3^- -Auswaschungen bleiben konstant.

Tabelle 12 Betriebsindikatoren für typische Milchviehbetriebe unter Düngeverordnung 2007 und 2017

		Mil_kl		Mil_gr		Mil_in	
		DüV 2007	DüV 2017	DüV 2007	DüV 2017	DüV 2007	DüV 2017
N-Überschuss ^a	kg ha ⁻¹	-22,7	-29,53 (-37,67)	-38,02	-29,87 (-38,02)	5,76	1,33 (-11,77)
P ₂ O ₅ -Überschuss	kg ha ⁻¹	0	0	0	0	0	0
Ausbringungsobergrenze für N org.	kg ha ⁻¹	138,27	138,27	138,41	138,41	170	170
N-Quote (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	9.595,37	9.587,18	17.134,42	17.134,42	12.094,28	12.095,97
N-Anwendung (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	8.534,78	7.474,84	13.302,98	13.302,98	12.252,66	11.045,64
N-Entzug mit Ernte	kg ha ⁻¹	189,95	189,75	189,71	189,71	210,52	210,56
Wirtschaftsdünger	m ³ ha ⁻¹	28,45	28,45	28,48	28,48	35,02	35,02
Chemischer N-Dünger	kg ha ⁻¹	40,49	25,35	24,91	24,91	78,04	60,55
Chemischer P ₂ O ₅ -Dünger	kg ha ⁻¹	9,05	8,95	8,98	8,98	11,49	11,5
Besatzdichte	GVE ha ⁻¹	1,5	1,5	1,5	1,5	2,3	2,3
Wirtschaftsdüngerexport	m ³ ha ⁻¹	0	0	0	0	10,8	10,8
Lagerkapazität Wirtschaftsdünger	m ³ Betrieb ⁻¹	996	996	1.785	1.785	1.581	1.581
Ausbringung mit Breitverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	1.825,61	426,39	0	0	2.416,7	665,39
Ausbringung mit Schleppschlauchverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	0	180,87	1.101,97	1.101,97	0	296,06
Ausbringung mit Schleppschuhverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	0	1.218,36	2.165,97	2.165,97	0	1.455,26
NH ₃ -N-Emissionen	kg ha ⁻¹	68,66	51,2	50,01	50,01	94,68	74,53
NO-N-Emissionen	kg ha ⁻¹	2,2	2,01	2,01	2,01	3,06	2,85
N ₂ O-N-Emissionen	kg ha ⁻¹	3,28	2,96	2,94	2,94	4,73	4,35
NO ₃ ⁻ -N-Emissionen	kg ha ⁻¹	28,53	28,01	28,29	28,29	31,61	31,84
Anpassungskosten	€ Cent kg Milch ⁻¹		0,15		0		0,09

^a Der N-Überschuss in Klammern unter DüV 2017 wird nach dem Kalkulationsschema des DüV 2007 berechnet; DüV – Düngeverordnung; org. – organisch; GVE – Großvieheinheiten; N – Stickstoff; P₂O₅ – Phosphat; NH₃ – Ammoniak; NO – Stickstoffmonoxid; N₂O – Distickstoffoxid; NO₃⁻ – Nitrat; € – Euro; Mil_k l – Kleiner Milchviehbetrieb; Mil_gr – Großer Milchviehbetrieb; Mil_in – Intensiver Milchviehbetrieb

4.2.5 Ackerbaubetriebe

Die Auswirkungen von Wirtschaftsdüngerimporten unter der DüV werden für die typischen Ackerbaubetriebe Ack_ZR und Ack_WR im Folgenden unterschiedlich analysiert und dargestellt. Um die Anpassung an die DüV 2017 ohne Wirtschaftsdüngerimport zu erfassen, ist für den Betriebstyp Ack_ZR ein zusätzlicher Modelllauf enthalten. Da sich Ack_WR und Ack_kW in demselben BKR befinden und die identische Fruchtfolge anbauen, ist ein zusätzlicher Modelllauf für Ack_WR nicht erforderlich.

Ackerbaubetrieb mit Zuckerrüben (Ack_ZR)

Der Ackerbaubetrieb mit Zuckerrüben, Ack_ZR, befindet sich in der BKR 141 (Jülicher Börde, Zülpicher Börde) und baut die Fruchtfolge Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrüben an. Unter der DüV 2007 erreicht der Betriebstyp keine Grenzen der Nährstoffsalden. Der Betriebstyp übersteigt jedoch die N-Quote der Düngedarfsermittlung um 1.085,96 kg N (Tabelle 13), was im Rahmen der DüV 2007 noch nicht verbindlich ist.

Um die Düngedarfsermittlung unter der DüV 2017 einzuhalten, reduziert Ack_ZR seinen durchschnittlichen Einsatz von N-Mineraldünger von 169,36 zu 151,93 kg N ha⁻¹. Dadurch reduziert sich der Ertrag leicht von Winterweizen um 0,13 t ha⁻¹ und von Zuckerrübe um 1,16 t ha⁻¹. Die Anpassungskosten sind ebenfalls gering und betragen 4,74 € ha⁻¹. Dies zeigt, dass der Betriebstyp im wirtschaftlichen Optimum arbeitet, bei dem der Erlös aus dem zusätzlichen Ertrag den Grenzkosten für Düngemittel entspricht. Dies impliziert jedoch eine relativ niedrige N-Nutzungseffizienz, da nur ein kleiner Teil des zusätzlichen N von 17,43 kg N ha⁻¹ unter der DüV 2007 im Vergleich zur DüV 2017 im geernteten Produkt wiederzufinden ist (2,57 kg N ha⁻¹). Wenn der überschüssige N-Dünger nicht in den Bodenpool aufgenommen wird, entweicht er in die Umwelt. Daher führt die geringe Ertragsreduktion zu einer hohen Reduktion der NO₃⁻-Auswaschung von 35,44 kg ha⁻¹ auf 23,55 kg NO₃⁻ ha⁻¹. Aufgrund der generellen Verringerung des N-Einsatzes, nehmen auch die NH₃-, N₂O- und NO-Emissionen leicht ab.

Im zweiten Modelllauf wird angenommen, dass Ack_ZR bis zu 20 m³ ha⁻¹ Wirtschaftsdünger importiert. Dieser substituiert jeweils 90,49 kg N und 59,02 kg P₂O₅-Mineraldünger. Der P₂O₅-Überschuss nimmt von 0 auf 8,62 kg ha⁻¹ zu, da das importierte P₂O₅ den Pflanzenbedarf überschreitet. Da der Boden von Ackerbaubetrieben jedoch häufig einen P-Mangel aufweist, ist dies ein willkommener Effekt. Der Wirtschaftsdüngerimport ist auch mit einem Anstieg des N-Überschusses von 30,06 auf 41,39 kg N ha⁻¹ im Vergleich zur DüV 2007 ohne Wirtschaftsdüngerimport verbunden. Die Änderung spiegelt sowohl den höheren N-Gesamteinsatz wider, wenn N aus Mineraldünger durch N aus Wirtschaftsdünger ersetzt wird, als auch das überarbeitete Überschussberechnung gemäß DüV 2017. Dennoch bleibt der Betrieb unter dem zulässigen Bilanzsaldo von 50 kg N ha⁻¹. Die Kosten reduzieren sich um

108,00 € ha⁻¹, hauptsächlich aufgrund der Kosteneinsparungen durch die Reduktion von Mineraldünger von 266,29 auf 87,97 € ha⁻¹. Diese Einsparungen überwiegen die zusätzlichen Kosten von 56,00 € ha⁻¹ für die teurere Ausbringung von Wirtschaftsdünger. Durch den Wirtschaftsdüngerimport steigt die NO₃⁻-Auswaschung von 23,55 auf 31,68 kg NO₃⁻-N im Vergleich zu dem Szenario, in dem unter der DüV 2017 kein Wirtschaftsdünger importiert wird. Folglich ist der importierte N im Wirtschaftsdünger weniger effizient als N aus mineralischem Dünger, da die Erträge konstant bleiben. Wie oben erwähnt, beträgt die NO₃⁻-Auswaschung unter der DüV 2007 ohne Wirtschaftsdünger 35,44 kg ha⁻¹. Die Anpassung im Rahmen der Düngedarfsermittlung unter der DüV 2017 überkompensiert den durch den Wirtschaftsdüngerimport verursachten Anstieg der Auswaschungen. Der Einsatz von Wirtschaftsdünger erhöht auch die NH₃-Emissionen von 1,39 auf 8,64 kg NH₃-N ha⁻¹. Dies wird durch die höhere Ausgasung von NH₃ bei Wirtschaftsdüngerausbringung im Vergleich zur Anwendung von Mineraldünger verursacht. Da insgesamt der N-Einsatz ansteigt, erhöhen sich auch die NO- und N₂O-Emissionen geringfügig.

Ackerbaubetrieb mit Winterraps (Ack_WR) und ohne Wirtschaftsdüngerimport (Ack_kW)

Beide Betriebstypen, sowohl mit Winterraps (Ack_WR), als auch ohne Wirtschaftsdüngerimport (Ack_kW) befinden sich in der BKR 142 (Niederrhein/Südl. Münsterland) und bauen die Fruchtfolge Winterweizen, Wintergerste und Winterraps an. Die Betriebstypen werden gemeinsam beschrieben, da sie sich nur durch Größe und Wirtschaftsdüngerimport im Rahmen der DüV 2017, der nur für Ack_WR stattfindet, unterscheiden. Die Analyse von Ack_kW unter der DüV 2017 erlaubt die Isolierung der Auswirkungen der DüV 2017 ohne Wirtschaftsdüngerimport. Ein zusätzlicher Modelllauf wie bei Ack_ZR ist nicht erforderlich.

Im Rahmen der DüV 2007 erreichen Ack_kW und Ack_WR nicht die Begrenzungen der Nährstoffsalden, sie betragen lediglich 19,20 kg N ha⁻¹. Die Emissionen sind 1,21 kg NH₃-N ha⁻¹, 1,77 kg NO-N ha⁻¹, 1,51 kg N₂O-N ha⁻¹ und 40,22 kg NO₃⁻-N ha⁻¹. Unter der DüV 2007 ist die NO₃⁻-Auswaschung höher als bei Ack_ZR, da die Erntereste von Raps mehr N enthalten als die Blätter von Zuckerrüben. Darüber hinaus besteht bei Winterraps eine größere Pause bis zur nächsten Frucht als bei Zuckerrüben. Folglich ist die Zeit für N-Abbau und Auswaschung nach Winterraps länger. Im Gegensatz zu Ack_ZR ist eine geringere Intensität des Düngemitelesinsatzes für Ack_kW und Ack_WR gewinnmaximierend, so dass die Grenzen der Düngedarfsermittlung nicht erreicht werden. Beide Betriebe haben weder Anpassungskosten zu tragen noch realisieren sie Emissionsänderungen im Rahmen der DüV 2017 ohne Gülleimport.

Ack_WR importiert im Rahmen der DüV 2017 15 m³ ha⁻¹ Wirtschaftsdünger. Dadurch werden 50,41 bzw. 49,20 kg mineralischer N-Dünger und P₂O₅-Dünger ersetzt. Während der

P_2O_5 -Überschuss unverändert bleibt, steigt der gesetzlich berechnete N Überschuss von 19,20 auf 41,41 kg N ha⁻¹ an. Dies ist auf das überarbeitete Berechnungsschema im Rahmen der DüV 2017 und den höheren Gesamt-N-Einsatz beim Austausch von Mineraldünger mit Wirtschaftsdünger zurückzuführen. Wendet man die Überschussberechnung der DüV 2007 an, steigt der N Überschuss nur auf 37,49 kg N ha⁻¹. Ack_WR realisiert eine Kostensenkung von 97,41 € ha⁻¹, da die Kosten für Mineraldünger um 120,73 € ha⁻¹ sinken, aber zusätzliche Ausgaben in Höhe von 42,00 € ha⁻¹ für die Ausbringung des Wirtschaftsdüngers anfallen. Darüber hinaus erhöht der Betrieb die Düngeintensität und erzielt leicht höhere Erträge. So steigt beispielsweise der durchschnittliche Winterrapserttrag von 2,99 auf 3,02 t ha⁻¹. Die Verfügbarkeit von Wirtschaftsdünger reduziert die Kosten von N, was zu einer veränderten gewinnmaximierenden Intensität führt. Der Wirtschaftsdüngerimport führt für Ack_ZR zu einem Anstieg der NO₃⁻-Auswaschung von 40,22 auf 45,68 kg NO₃⁻-N ha⁻¹. Dies lässt sich auf die höhere Menge von eingesetztem N (175,69 kg N ha⁻¹) im Vergleich zu unter der DüV 2007 (147,8 kg N ha⁻¹) zurückführen, wohingegen die Entzüge mit dem Erntegut fast identisch sind (128,6 gegenüber 130,4 kg N ha⁻¹). Die NH₃-Emissionen steigen von 1,21 auf 8,67 kg NH₃-N ha⁻¹, da die Wirtschaftsdüngerausbringung mit höheren Ausgasungen verbunden ist als die Ausbringung von Mineraldünger. Die N₂O- und NO-Emissionen steigen primär aufgrund des um 27,95 kg N ha⁻¹ erhöhten Gesamt-N-Inputs.

Tabelle 13 Betriebsindikatoren für typische Ackerbaubetriebe unter Düngeverordnung 2007 und 2017

		Ack_ZR			Ack_WR		Ack_kW	
		DüV 2007	DüV 2017 kein Wirtschaftsdünger	DüV 2017	DüV 2007	DüV 2017	DüV 2007	DüV 2017
N-Überschuss ^a	kg ha ⁻¹	30,06	15,19 (15,19)	41,39 (36,17)	19,20	41,41 (37,49)	19,20	19,20 (19,20)
P ₂ O ₅ -Überschuss	kg ha ⁻¹	0	0	8,62	0	0	0	0
Ausbringungsobergrenze für N org.	kg ha ⁻¹	0	0	104,47	0	78,36	0	0
N-Quote (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	10.761,11	10.627,46	10.632,71	10.526,73	10.596,82	2.668,77	2.668,77
N-Anwendung (Düngebedarf)	kg Betrieb ⁻¹	11.847,07	10.627,46	10.632,71	9.858,09	10.154,09	2.499,26	2.499,26
N-Entzug mit Ernte	kg ha ⁻¹	139,31	136,74	136,73	128,6	130,42	128,6	128,6
Wirtschaftsdünger	m ³ ha ⁻¹	0	0	20	0	15	0	0
Chemischer N-Dünger	kg ha ⁻¹	169,36	151,93	78,87	147,8	97,39	147,8	147,8
Chemischer P ₂ O ₅ -Dünger	kg ha ⁻¹	59,02	57,93	0	56,93	7,73	56,93	56,93
Ausbringung mit Schleppschlauchverteiler	m ³ Betrieb ⁻¹	0	0	1.399	0	1.000,5	0	0
NH ₃ -N-Emissionen	kg ha ⁻¹	1,39	1,25	8,64	1,21	8,67	1,21	1,21
NO-N-Emissionen	kg ha ⁻¹	2,03	1,82	2,2	1,77	2,11	1,77	1,77
N ₂ O-N-Emissionen	kg ha ⁻¹	1,73	1,55	1,94	1,51	1,87	1,51	1,51
NO ₃ ⁻ -N-Emissionen	kg ha ⁻¹	35,44	23,55	31,68	40,22	45,68	40,22	40,22
Kosteneinsparungen	€ ha ⁻¹		-4,74	108,00		97,41		

^a Der N-Überschuss in Klammern unter DüV 2017 wird nach dem Kalkulationsschema des DüV 2007 berechnet; DüV – Düngeverordnung; org. – organisch; N – Stickstoff; P₂O₅ – Phosphat; NH₃ – Ammoniak; NO – Stickstoffmonoxid; N₂O – Distickstoffoxid; NO₃⁻ – Nitrat; € – Euro; Ack_ZR – Ackerbaubetrieb mit Zuckerrüben; Ack_WR – Ackerbaubetrieb mit Winterraps; Ack_kW – Ackerbaubetrieb ohne Wirtschaftsdüngerimport

5. Diskussion

5.1 Ergebnisse

Bei der Analyse der Anpassungskosten, die für Betriebe aufgrund der neuen DüV entstehen, wird nicht das Einkommen angegeben. Grund dafür ist, dass dieses von zahlreichen Merkmalen wie der Zinsbelastung oder der Rechtsform abhängt, die für die Analyse nicht detailliert genug zugänglich sind. Die Kostenabschätzung in der Population sowie die Analyse typischer Betriebe geben jedoch Hinweise auf die finanzielle Belastung durch die Novelle und können mit Ergebnissen ähnlicher Studien sowie Werten aus der Betriebsplanung verglichen werden. Der Vergleich mit Untersuchungen zur Höhe der Anpassungskosten durch die DüV zeigt sowohl ähnliche als auch abweichende Ergebnisse. Es ist jedoch festzuhalten, dass nicht für alle untersuchten Betriebstypen vergleichbare Berechnungen vorliegen.

Die vorliegende Studie ermittelt, dass durch die DüV 2017 Anpassungskosten in Höhe von 0 bis 2,66 € Schwein⁻¹ und von 0 bis 0,83 ct (kg EKM)⁻¹ entstehen. Ähnliche Ergebnisse finden Menghi *et al.* (2015). Sie kalkulieren die Anpassungskosten für die Einhaltung der Nitratrichtlinie für typische landwirtschaftliche Betriebe in der EU. Ihre Analyse ergibt Kosten im Bereich von 0 bis 1,05 € Schwein⁻¹ und 0,02 bis 0,68 ct (kg EKM)⁻¹ (siehe Anhang D für notwendige Umrechnungen). Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass Menghi *et al.* (2015) Maßnahmen wie emissionsarme Ausbringungstechniken und Begrenzung des P₂O₅-Überschusses, die in der vorliegenden Analyse die Anpassungskosten stark beeinflussen, nicht berücksichtigen. Eine größere Abweichung hinsichtlich der Forschungsergebnisse lässt sich gegenüber Karl & Noleppa (2017) finden. Sie quantifizieren die mit der DüV 2017 verbundenen Kosten in einem Top-Down-Ansatz und ermitteln Kosten für zwei durchschnittliche deutsche Betriebe von 2,90 bzw. 4,62 € Schwein⁻¹ (siehe Anhang E für notwendige Umrechnung). Grund für die abweichenden Ergebnisse sind methodische Unterschiede zu Karl & Noleppa (2017), wie eine statische Kostenkalkulation sowie das Fehlen von Anpassungsstrategien. Darüber hinaus verknüpfen Karl & Noleppa (2017) die aggregierten Kosten auf Bundesebene mit der Landfläche durchschnittlicher landwirtschaftlicher Betriebe. Dies lässt im Gegensatz zu der vorliegenden Studie keine Rückschlüsse auf die Verteilung der Kosten in der Betriebspopulation oder auf kostentreibende Betriebseigenschaften zu.

Im Rahmen des Gesetzgebungsprozesses zur DüV 2017, wurden ebenfalls die aggregierten Kosten der Novelle abgeschätzt (BMEL 2017d). Es ergaben sich Anpassungskosten für den gesamten Agrarsektor in Höhe von 112 Millionen €. Demnach sind der größte Kostenfaktor die Investitionen in zusätzliche Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger, wohingegen strengere Begrenzungen des P₂O₅-Überschusses sowie emissionsarme Anwendungstechniken

nur einen geringen Einfluss auf die Anpassungskosten haben. Die Unterschiede zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie resultieren aus der Annahme niedrigerer Kosten für die Einhaltung der P_2O_5 -Überschussbegrenzungen und geringen zusätzlichen Kosten für den Einsatz emissionsarmer Ausbringungstechniken. Dagegen geht die vorangegangene Studie von höheren und fixen Kosten für zusätzliche Lagerkapazitäten aus und berücksichtigt dabei keine Skaleneffekte. Berechnungen zu den Gesamtkosten durch die Nitratrichtlinie für die Niederlande bestätigen jedoch die Relevanz des Wirtschaftsdüngertransports als Kostentreiber (van Grinsven *et al.* 2016), jedoch ist ein Vergleich hinsichtlich der landwirtschaftlichen Struktur in NRW nur bedingt möglich. Studien zu dem bereits abgeschlossenen niederländischen Mineral Accounting System (MINAS), das eine Besteuerung von Nährstoffüberschüssen vorsah, betonen das Potenzial erhöhter Produktivität in der Tierproduktion zur Senkung der Anpassungskosten (Berentsen 2003). Eine Veränderung der Produktivität wird in der vorliegenden Studie jedoch nicht untersucht.

Im Folgenden werden die ermittelten Anpassungskosten mit Standarddeckungsbeiträgen und relevanten variablen Kosten verglichen. Für den Standarddeckungsbeitrag wird die geldliche Bruttoleistung (erzeugte Menge mal zugehörigem Preis) ermittelt und die zurechenbaren variablen Spezialkosten abgezogen (KTBL 2018c). Im Jahr 2016/17 betrug der durchschnittliche Standarddeckungsbeitrag in Deutschland 27,20 € Schwein⁻¹ und 17,94 ct (kg EKM)⁻¹ (KTBL 2018c). Abgesehen von den Fütterungskosten von 67,20 € Schwein⁻¹ und 10,07 ct (kg EKM)⁻¹, sind besonders die Kosten für Ferkel von 65,20 € Schwein⁻¹ und die Remontierung des Milchviehbestands von 3,60 ct (kg EKM)⁻¹ relevante Kostenfaktoren. Der typische Betrieb mit Sauenhaltung weist Anpassungskosten von 21,46 € Sau⁻¹. Der Standarddeckungsbeitrag lag 2016/17 bei 583 € Sau⁻¹ und die variablen Kosten bei 889 € Sau⁻¹ (KTBL 2018c). Der Betrieb mit Biogasanlage hat Kosten von 0,004 € Kilowattstunde⁻¹, welche mit 0,22 € vergütet wird.

Die Werte zeigen, dass die Anpassungskosten an die DüV 2017 im Vergleich zu anderen Kostenpositionen oder dem Erlös gering sind. Betriebe mit besonders hohen Anpassungskosten verlieren jedoch einen relevanten Teil ihres Standarddeckungsbeitrags durch die DüV 2017. Darüber hinaus werden die Kosten quantifiziert, die Ackerbaubetriebe durch den Einsatz von Wirtschaftsdünger anstelle von Mineraldünger einsparen können. Sie liegen bei 108 € ha⁻¹ für Ack_ZR und bei 98 € ha⁻¹ für Ack_WR. Der Standarddeckungsbeitrag für Feldfrüchte, die diese Betriebe anbauen, liegt zwischen 516 € ha⁻¹ für Wintergerste und 1.854 € ha⁻¹ für Zuckerrüben. Dies verdeutlicht, dass die Betriebe durch den Import von Wirtschaftsdünger relevante Erhöhungen der Standarddeckungsbeiträge realisieren können.

Grundsätzlich kann der Einfluss der Anpassungskosten auf das Einkommen höher sein als die ermittelten Werte. Hierfür gibt es mehrere Gründe. Zum einen werden in der vorliegenden Studie mögliche zusätzliche Kosten, die durch die DüV 2017 verursacht werden, vernachlässigt. Hierzu gehören beispielsweise Transaktionskosten, um Abnehmer für Wirtschaftsdünger zu finden, oder für die nötige Dokumentation zur Düngedarfsermittlung. Des Weiteren kann der methodische Ansatz ein Grund für zu gering ermittelte Anpassungskosten an die DüV 2017 sein (Kapitel 5.2.2). Außerdem konzentriert sich die vorliegende Analyse auf die wichtigsten Maßnahmen der DüV und ignoriert Maßnahmen wie beispielsweise Mindestabstände zu Gewässern oder Ausbringungseinschränkungen in Abhängigkeit von der Witterung. Die eingesparten Kosten bei Ackerbaubetrieben sind vor dem Hintergrund zu bewerten, dass das Pflanzenbaumodell langfristige Effekte abbildet und somit auch die langfristige positive Auswirkung von vermehrtem Einsatz von Wirtschaftsdünger. Die kurzfristigen Kostensenkungen sind vermutlich geringer.

Nur eine vergleichbare Studie nutzt die Verknüpfung von Betriebs- und Pflanzenbaumodell, um die Auswirkung der Nitratrictlinie zu untersuchen. Belhouchette *et al.* (2011) finden geringe Einkommensänderungen für Ackerbaubetriebe im Südwesten Frankreichs durch die Erfüllung der Nitratrictlinie. Ein Ergebnis, das mit den Erkenntnissen der vorliegenden Untersuchung übereinstimmt. Im Allgemeinen sind Vergleiche aufgrund der Unterschiede in den bewerteten Maßnahmen sowie den Annahmen über die Einhaltung der Verordnung schwer. Die Autoren ermitteln, dass sich die NO_3^- -Auswaschung für einen Betriebstyp um 6% reduzieren, da dieser alternative und effizientere Anbaumethoden wählt (Belhouchette *et al.* 2011, S. 142). Dagegen zeigt die vorliegende Studie für die obligatorische Düngedarfsermittlung bei Ack_ZR eine Reduktion der Auswaschungen um 34%. In der Analyse von Belhouchette *et al.* (2011) ist jedoch eine Nichteinhaltung der rechtlichen Vorgaben möglich, wodurch die richtlinienkonformen Aktivitäten nur auf einem Teil der landwirtschaftlichen Flächen durchgeführt werden. Auf der Feldebene liegen die eingesparten NO_3^- -Auswaschungen zwischen 2,5% und 50%, was mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung übereinstimmt.

5.2 Methodisches Vorgehen

Im Folgenden wird das methodische Vorgehen kritisch reflektiert, um eine Einordnung der Ergebnisse zu ermöglichen. Der Fokus liegt dabei auf dem Betriebsmodell FarmDyn sowie der verwendeten Datengrundlage. Für die Einordnung der Analyse der typischen Betriebe ist jedoch auch eine Diskussion der Stärken und Schwächen der Modellierungsplattform SIMPLACE notwendig, die sich im Abschlussprojekt von Teilprojekt 1 findet.

5.2.1 Vergleich mit beobachteten Nährstoffsalden

Im Rahmen des Clusterprojektes wurden den Projektnehmern durch die LWK NRW anonymisierte und vereinfachte einzelbetriebliche Nährstoffvergleiche für N und P_2O_5 bereitgestellt, die im Rahmen von systematischen Kontrollen von Betrieben in NRW angefordert wurden. Sie werden nicht als Datenquelle für die Modellierungen genutzt, sondern für eine Einordnung der Modellergebnisse deskriptiv ausgewertet.

Für Abbildung 9 und Abbildung 10 wurden die Nährstoffsalden nach dem Einsatz von Wirtschaftsdünger gruppiert (inklusive Gärreste pflanzlichen Ursprungs), um den Zusammenhang zwischen Tierbesatzdichte und Nährstoffsalden zu untersuchen.

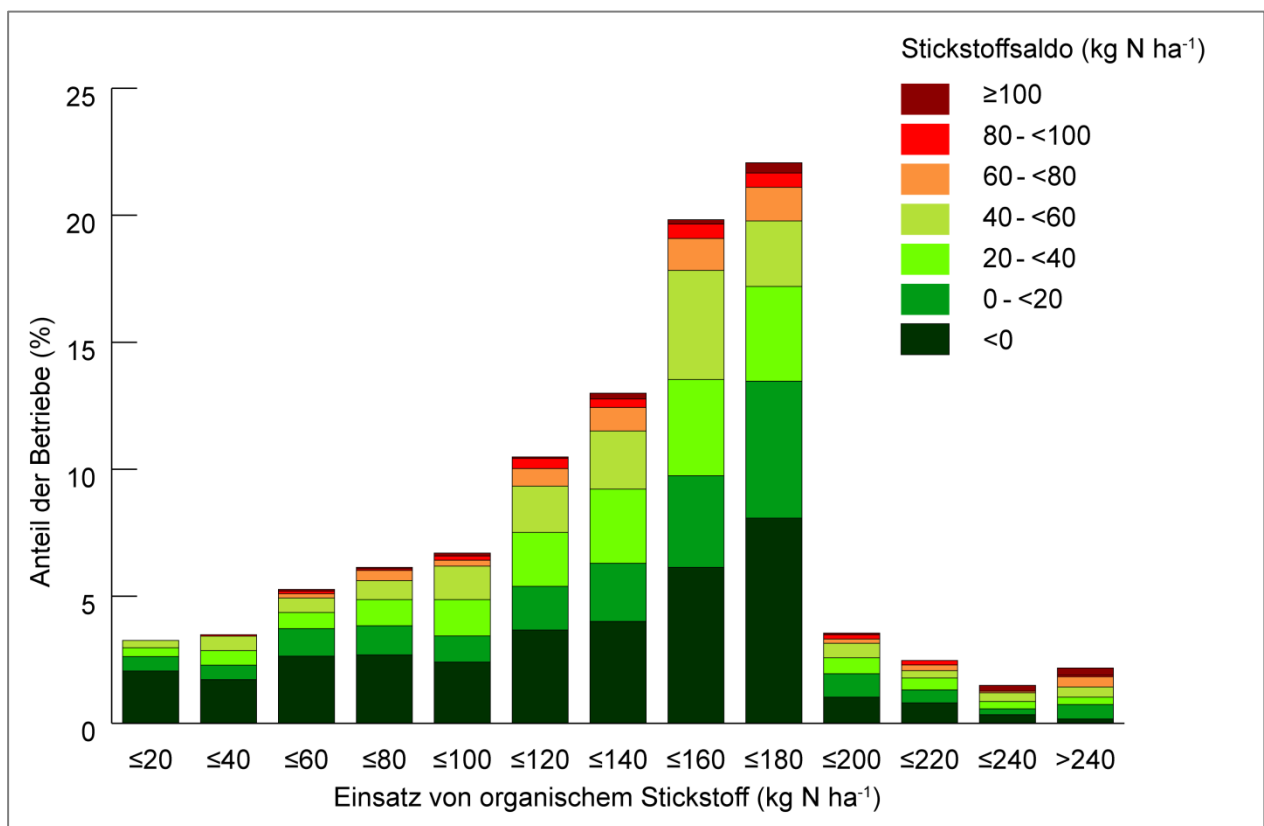


Abbildung 9 Häufigkeitsverteilung des mehrjährigen Stickstoffsaldos laut Nährstoffvergleich ausgewählter Betriebe in Abhängigkeit der organischen Düngung

Quelle: Eigene Auswertung und Darstellung basierend auf Daten der LWK NRW (2018) und Graphikgestaltung von Osterburg & Techen 2012, S. 192). Daten beinhalten Nährstoffvergleiche landwirtschaftlicher Betriebe in Nordrhein-Westfalen (n=1.745) aus einer nicht-repräsentativen Stichprobe des Kalenderjahres 2015 und des Wirtschaftsjahres 2014/15. Diese wurden von dem Direktor der LWK NRW für systematische Kontrollen des Düngerechts angefordert. Der organische Stickstoffeinsatz wurde nach Düngeverordnung 2007 berechnet (Lager- und Ausbringungsverluste abgezogen) und beinhaltet Gärreste pflanzlichen Ursprungs. Der Nährstoffvergleich wurde nach Düngeverordnung 2007 berechnet, der Nährstoffsaldo ist je nach Datenlage zwischen ein und fünf Jahren gemittelt.

Die beobachteten und modellierten N und P₂O₅-Salden unterscheiden sich teilweise deutlich. So enthalten die Kontrolldaten Betriebe, die oberhalb des zulässigen Nährstoffsaldos von 60 kg N ha⁻¹ (Abbildung 9) und 20 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Abbildung 10) liegen. Dies kann auf eine Missachtung der Vorschriften oder Schwankungen der Salden zwischen den Jahren zurückzuführen sein. So enthalten die Daten auch Betriebe mit Angaben zu Nährstoffsalden aus ein oder zwei Jahren. Die Kontrollwerte müssen jedoch im mehrjährigen Durchschnitt eingehalten werden und insbesondere Ertragsschwankungen können zu hohen Überschüssen in einzelnen Jahren führen. In FarmDyn liegt der berechnete Nährstoffsaldo hingegen immer unterhalb des zulässigen Grenzwertes, da eine Missachtung der Vorgaben der DüV nicht möglich ist und die genutzten Daten mehrjährige Durchschnitte repräsentieren. Ertragsschwankungen, die zu erhöhten Salden führen, können somit nicht auftreten.

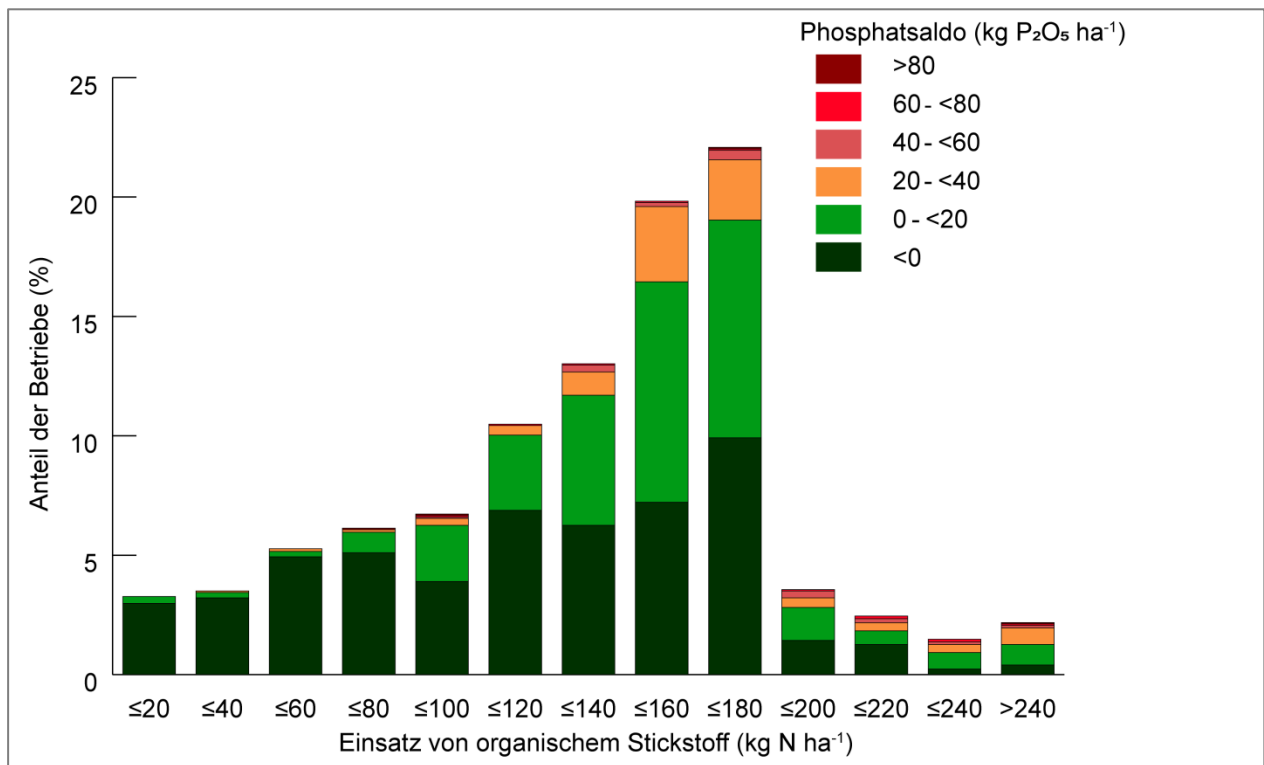


Abbildung 10 Häufigkeitsverteilung des mehrjährigen Phosphatsaldo laut Nährstoffvergleich ausgewählter Betrieb in Abhängigkeit der organischen Düngung

Quelle: Eigene Auswertung und Darstellung basierend auf Daten der LWK NRW (2018) und Graphikgestaltung von Osterburg & Techen 2012, S. 192). Daten beinhalten Nährstoffvergleiche landwirtschaftlicher Betriebe in Nordrhein-Westfalen (n=1.745) aus einer nicht-repräsentativen Stichprobe des Kalenderjahres 2015 und des Wirtschaftsjahres 2014/15. Diese wurden von dem Direktor der LWK NRW für systematische Kontrollen des Düngerechts angefordert. Der organische Stickstoffeinsatz wurde nach Düngerverordnung 2007 berechnet (Lager- und Ausbringungsverluste abgezogen) und beinhaltet Gärreste pflanzlichen Ursprungs. Der Nährstoffvergleich wurde nach Düngerverordnung 2007 berechnet, der Nährstoffsaldo ist je nach Datenlage zwischen ein und fünf Jahren gemittelt.

Darüber hinaus gibt es in den beobachteten Nährstoffsalden zahlreiche Betriebe mit einem hohen Einsatz von Wirtschaftsdünger (und damit verbunden einem hohen Tierbesatz), die stark negative Nährstoffsalden aufweisen. Dies ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass Futterbaubetriebe die Abfuhr von der Fläche unterschätzen und somit zu hohe Entzüge im Nährstoffvergleich angeben. Dieser Effekt wird auch von Osterburg & Techen (2012, S. 191) bei der Analyse eines Datensatzes mit ausschließlich Nährstoffvergleichen von Futterbaubetrieben aufgezeigt. Im Rahmen der DüV 2017 müssen Futterbaubetriebe die Abfuhr von Futterflächen über den Bedarf des vorhandenen Tierbestandes plausibilisieren, was einer Überschätzung der Entzüge entgegenwirkt. Dieser Effekt wird nicht in den Modellierungen mit FarmDyn abgebildet. Basierend auf der Annahme eines perfekt informierten Landwirts, sind die Erträge und Nährstoffgehalte im Futterbau zu jeder Zeit bekannt. Die Auswirkungen der plausibilisierten Flächenbilanz der DüV 2017 auf die Nährstoffsalden können somit in der vorliegenden Studie nicht abgebildet werden.

Wie in Abbildung 10 zu erkennen, gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Tierbesatz und der Höhe der P_2O_5 -Salden, welcher auch von dem Modellierungsansatz erfasst wird. Bei Schweinemastbetrieben mit hohen Tierbesatzdichten limitiert der P_2O_5 -Saldo die Wirtschaftsdüngerausbringung und ein höherer Tierbesatz führt zu einem höheren Saldo. Dies ist beispielsweise beim Vergleich der drei typischen Schweinemastbetriebe in 4.2.1 zu erkennen, deren Salden sich mit zunehmender Tierbesatzdichte erhöhen. Bei N-Salden besteht dieser Zusammenhang jedoch nicht, es gibt auch Betriebe mit einem geringen Einsatz von Wirtschaftsdünger und einem hohen N-Saldo (Abbildung 9). Dies findet sich auch in den Modellierungsergebnissen für typische Betriebe, wie beispielsweise bei Ack_ZR. Dieser Betrieb weist auch unter der DüV 2007 einen Saldo von 30 kg N ha^{-1} auf, da er eine hohe Düngungsintensität wählt, die mit hohen Überschüssen und potentiellen Verlusten in die Umwelt verbunden ist. Jedoch gibt es noch einen weiteren Treiber von betrieblichen N Überschüssen, der vom Modellierungsansatz nicht aufgegriffen werden kann. So zeigen empirische Auswertungen von Nährstoffvergleichen, dass ähnliche Betriebe sehr unterschiedliche Mengen an mineralischem N-Dünger einsetzen (Osterburg & Techen 2012, S. 195ff.). Dies deutet auf einen ineffizienten N-Einsatz und ein hohes Einsparungspotential durch ein verbessertes Management hin. Der Modellierungsansatz geht jedoch von einem optimalen und ökonomisch effizienten Düngereinsatz aus, resultierend aus der Verhaltensannahme eines gewinnmaximierenden, komplett rationalen und perfekt informierten Landwirts. Bei einer solchen Modellierung werden stets Ergebnisse ausgegeben, die einen technisch effizienten und wirtschaftlichen Einsatz von Produktionsmitteln repräsentieren. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Modellierungsansatz die Wahl der Düngungsintensität der Treiber der N-Überschüsse ist, während Kontrolldaten darauf

hindeuten, dass der ineffiziente Einsatz von Dünger für einen Teil der Überschüsse verantwortlich ist.

5.2.2 Einzelbetriebliches Modell FarmDyn

Betriebsmodelle ermöglichen die Erfassung wirtschaftlicher und biophysikalischer Eigenschaften gegenwärtiger und zukünftiger landwirtschaftlicher Aktivitäten sowie die damit verbundenen externen Effekte (Janssen *et al.* 2010, S. 863). Daher sind sie für die Bewertung von Agrar- und umweltpolitischen Maßnahmen besonders geeignet. In Bezug auf die Bewertung der Novellierung der DüV können somit Maßnahmen und Anpassungsstrategien detailliert abgebildet und nicht nur wirtschaftliche, sondern auch ökologische Auswirkungen bestimmt werden. Darüber hinaus ermöglicht die Modellierung auf Betriebsebene die Erfassung der Betriebsheterogenität (Blanco 2016, S. 2). Dies ist Voraussetzung, um Aussagen über die Verteilung der Kosten in Betriebspopulation und kostentreibende Betriebsmerkmale treffen zu können, was einer der wichtigsten Beiträge dieses Projektes ist.

FarmDyn bietet im Vergleich zu anderen Modellen die Möglichkeit, realistischere Anpassungskosten zu ermitteln. Grund hierfür ist, dass viele innerbetriebliche Anpassungsstrategien berücksichtigt werden (Kapitel 3.1.1) und hiervon die optimale Kombination ausgewählt wird. Im Vergleich dazu berücksichtigen andere Ansätze wenige und statische Anpassungen an die DüV 2017, was zu einer Überschätzung der Kosten führen kann (Karl & Noleppa 2017). So wird beispielsweise eine unveränderbare Herdengrößen oder ein statisches Futtermangements angenommen. Allerdings bringt ein komplexeres Modell wie FarmDyn auch mehr (unsichere) Parameter mit sich, die mit Sensitivitätsanalysen untersucht und diskutiert werden müssen. Des Weiteren berücksichtigt die vorliegende Analyse keinen möglichen technischen Fortschritt, wie beispielsweise eine innovative Gülleaufbereitung oder verbesserte Ausbringungstechnik, welcher die Anpassungskosten in der Zukunft senken könnte.

Angebotsmodelle wie FarmDyn zeichnen sich durch exogene Input- und Outputpreise aus. Die Sensitivitätsanalyse liefert Erkenntnisse über die Einflussfaktoren von diesen Preisen auf die Anpassungskosten. Produktionspreise, Preise für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger sowie die überbetriebliche Wirtschaftsdüngerverwertung wirken sich stark auf die Anpassungskosten durch die DüV 2017 aus (Kapitel 4.1.2). Allerdings kann alleine mit Hilfe von FarmDyn nicht untersucht werden, wie sich diese Preise in der Zukunft verändern werden. So werden sich beispielsweise die Transportdistanzen sowie Transaktionskosten für überbetriebliche Nährstoffverwertung erhöhen, da mehr Betriebe ihren überschüssigen Wirtschaftsdünger exportieren müssen. Dies kann im vorliegenden Teilprojekt nicht erfasst werden. Modelle zur Verteilung von Wirtschaftsdünger im Raum (van der Straeten *et al.*

2012; Schäfer & Britz 2017), oder (partielle) Gleichgewichtsmodelle (Britz *et al.* 2012) können Einblicke in Wirtschaftsdüngerströme und die damit verbundenen Exportkosten oder Marktreaktionen geben. Allerdings erfassen diese Modelle die Politikvorgaben und mögliche betrieblichen Anpassungsstrategien in der Regel weniger detailliert als Betriebsmodelle.

5.2.3 Betriebsgenerierung

Die Verwendung von Betriebsmodellen wie FarmDyn macht eine Auswahl der Betriebe, die modelliert werden, notwendig. Für die Abschätzung der Kostenverteilung wird das Modell auf alle Betriebe in der Betriebspopulation von Milchvieh- und Schweinemastbetrieben angewendet. Dabei wird mit Hilfe von LHS eine Population generiert, deren Eigenschaften der beobachteten Population entsprechen, die aber keine tatsächlich existierenden Einzelbetriebe beinhaltet. So können die Vorgaben zur Geheimhaltung im Rahmen der offiziellen Agrarstatistik eingehalten werden. LHS bietet gegenüber anderen Modellierungen, wie der Monte-Carlo Simulation oder der Auswahl einer Zufallsstichprobe von Betrieben aus beobachteten Populationen, einige Vorteile. So basiert LHS auf einem stratifizierten Zufallsstichprobenansatz, der gewährleistet, dass die beobachtete Verteilung weitestgehend abgedeckt ist. Ein einfacher Monte-Carlo-Ansatz sowie eine nicht stratifizierte Zufallsstichprobe aus der beobachteten Population würden hingegen eine weitaus größere Anzahl von Ziehungen erfordern, um eine ähnliche ausgewogene Abdeckung der Verteilung zu erreichen. So ist die Modellierung von weniger Betrieben notwendig, wodurch die Laufzeit des Modells zur Abbildung der Population gesenkt werden kann. Darüber hinaus ermöglicht und erleichtert LHS grundsätzlich die Verknüpfung von unterschiedlichen Datenquellen (Kapitel 5.2.4).

Die Verbindung von FarmDyn und SIMPLACE wird auf ausgewählte Betriebstypen aus einer Typologie angewendet, welche im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes entwickelt wurde. Die Typologie basiert dabei primär auf Daten der ASE 2016, wodurch eine hohe Aktualität und eine leichte Wiederholbarkeit gegeben sind. Grundsätzlich ist die Erstellung von Betriebstypologien basierend auf Agrarstatistiken transparenter als die starke Nutzung von Expertenwissen als Datenquelle (z.B. Budde 2013). Allerdings können Schwächen der offiziellen Agrarstatistik, die in Kapitel 5.2.4 diskutiert werden, durch den Einbezug von Expertenwissen ausgeglichen werden. Es ist außerdem festzuhalten, dass sowohl die Abgrenzung zwischen den einzelnen Betriebstypen als auch die Auswahl der Betriebstypen für die weitere Analyse subjektiv ist.

5.2.4 Datenquellen

Für die Abbildung der Population als auch für die Betriebstypologie werden primär Daten der ASE 2016 angewendet. Jedoch reicht diese Datenquelle nicht aus, um alle notwendigen Eigenschaften der Population zu erfassen. Daher müssen für bestimmte Betriebsmerkmale

weitere Datenquellen herangezogen und restriktive Annahmen getroffen werden, die zu einer Über- bzw. Unterschätzung der Anpassungskosten führen können. So werden für die Verteilung der Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger Daten von 2006 verwendet, da die verfügbaren aktuelleren Zahlen diesbezüglich nicht detailliert genug sind. Seither haben sich die durchschnittlichen Kapazitäten vermutlich bereits erhöht, was zu einer Überschätzung der Anpassungskosten durch die DüV 2017 führt. Darüber hinaus enthält die ASE keine Informationen über die Technik für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger, die auf den jeweiligen Betrieben zur Verfügung stehen. Die Erhebung gibt ausschließlich Daten über den Anteil an Wirtschaftsdünger an, der mit unterschiedlichen Anwendungstechniken ausgebracht wird. Daher wird angenommen, dass ein bestimmter Anwendungsanteil mit dem Vorhandensein der emissionsarmen Ausbringungsverfahren übereinstimmt. Diese Annahme kann wiederum zu einer Unterschätzung der Anpassungskosten an die DüV 2017 und einer Überschätzung des Anteils an landwirtschaftlichen Betrieben ohne jegliche Kosten führen. Die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.1.2 gibt jedoch Hinweise auf die Auswirkungen der charakterisierten Unsicherheiten.

Die Diskussion um die Novelle der DüV begann bereits im Jahr 2014, die verwendeten Daten stammen jedoch weitestgehend aus 2016. Es ist nicht auszuschließen, dass sich Betriebe bereits vor der Novelle vorrausschauend an mögliche Verschärfungen angepasst haben. Kosten im Zusammenhang mit diesen Anpassungen können im gewählten Modellierungskonzept nicht in Zusammenhang mit der DüV 2017 gebracht werden, was zu einer Unterschätzung der Anpassungskosten in der Betriebspopulation führen kann.

Eine weitere Verzerrung entsteht dadurch, dass die ASE lediglich Betriebe erfasst, die als einzelne rechtliche Einheiten aufgeführt sind. Landwirtschaftliche Betriebe bestehen jedoch unter Umständen aus zahlreichen rechtlichen Einheiten oder mehrere Betriebe werden zu einer rechtlichen Einheit zusammengefasst. Derartige komplexe Strukturen sind in erster Linie auf die Vermeidung der Gewerblichkeit mit Auswirkungen auf die Steuerbelastung zurückzuführen (Forstner & Zavyalova 2017, S. 13). Diese komplexen Betriebe sind in der offiziellen Agrarstatistik von NRW nicht zu erkennen (Forstner & Zavyalova 2017, S. 33ff.). Dies führt zu einer Überschätzung der Anpassungskosten an die DüV 2017, wenn beispielsweise ein Betrieb mit hohem Tierbesatz in der vorliegenden Untersuchung hohe Kosten durch den Export von Wirtschaftsdünger hat, in Realität aber eine Einheit mit einem Ackerbaubetrieb bildet und so Wirtschaftsdünger eigentlich betriebsintern verwendet. Ähnliche Ungenauigkeiten entstehen auch bei flächenlosen Betrieben, die mit dem angewendeten Ansatz der Datenauswertung und Modellierung nicht erfasst werden.

Darüber hinaus wird die Biogasanlage aus Literaturquellen und Experteneinschätzungen abgeleitet, da detaillierte Angaben zur Biogaserzeugung nicht in der ASE enthalten sind. Die

analysierte Biogasanlage bildet nicht die existierende Diversität und Komplexität der Biogasproduktion in NRW ab, beispielsweise durch gemeinschaftlich betriebene Anlagen oder die Kombination mit unterschiedlicher Tierproduktion. Die Modellierung der Biogasanlage ist daher als explorative und beispielhafte Analyse zu verstehen.

5.2.5 Modellverknüpfung

Die Kopplung des bio-ökonomischen Betriebsmodells FarmDyn und des Pflanzenwachstumsmodells SIMPLACE ist der zentrale methodische Beitrag des vorliegenden Clusterprojektes. Die Modellverknüpfung hat sich als hilfreich erwiesen, um in FarmDyn den Zusammenhang zwischen Düngereinsatz, Ertrag und NO_3^- -Auswaschungen detailliert abzubilden. Darüber hinaus werden so die pflanzenbaulichen Aktivitäten in FarmDyn auf die naturräumlichen Gegebenheiten von NRW ausgerichtet, was räumlich differenzierte und praxisnähere Ergebnisse generiert. Die Verwendung der Simulationsergebnisse aus der SIMPLACE Plattform in FarmDyn erhöht jedoch die Rechenzeit des Modells deutlich, was eine Modellierung aller Betriebe einer Population nicht mehr zulässt. Daher wird die Modellverknüpfung nur auf ausgewählte Betriebstypen angewendet.

Die Integration von weiteren biophysikalischen Modellen in FarmDyn könnte die Validität der Ergebnisse weiter verbessern. Im Hinblick auf die DüV wären Modelle zu den Emissionen aus Stall und Lagerung, die mit hoher Detailgenauigkeit Emissionsänderungen in Abhängigkeit von Wetter und Management abbilden, eine sinnvolle Ergänzung. Auch Fütterungsmodelle, die die aktuellen Standardausscheidungsfaktoren ersetzen, könnten die Aussagekraft von FarmDyn weiter erhöhen. In der Zukunft könnten so Maßnahmen aus der Agrar- und Umweltpolitik noch detaillierter und differenzierter bewertet werden.

5.3 Novelle der Düngeverordnung im Jahre 2020

Obwohl die DüV erst 2017 überarbeitet wurde, wird im Frühjahr 2019 bereits eine weitere Novellierung diskutiert und für 2020 geplant (Agra-Europe 2019b, S. 35). Die europäische Kommission hält die DüV 2017 für unzureichend, um die Nitratrichtlinie in Deutschland zu erfüllen. Um ein erneutes Vertragsverletzungsverfahren zu vermeiden, was zu hohen Strafzahlungen führen könnte, erarbeitet die Bundesregierung unter Federführung des Landwirtschaftsministeriums eine neue DüV. Ein offizieller Referentenentwurf zur DüV 2020 liegt zum Zeitpunkt des Entstehens des vorliegenden Berichtes noch nicht vor, die im Folgenden genannten Maßnahmen sind daher äußerst unsicher und als vorläufig anzusehen. Darüber hinaus handelt es sich um eine qualitative Einschätzung der Maßnahmen basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes, die Modelle werden jedoch nicht erneut auf die Maßnahmen der DüV 2020 angewendet.

Bereits im Rahmen der DüV 2017 müssen die Bundesländer in Regionen, die die Zielwerte der NO_3^- -Konzentration in Gewässern überschreiten, mindestens drei zusätzliche Maßnahmen ergreifen. Die zur Verfügung stehenden Maßnahmen sind jedoch weitestgehend wenig ambitioniert. Sie wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt, da die Entscheidung über die Auswahl der Maßnahmen in NRW erst im Januar 2019 getroffen wurde (MULNV 2019). Die anstehende Novellierung der DüV konzentriert sich auf die Reduzierung der NO_3^- -Emissionen in diesen Regionen und die folgenden zusätzlichen und erheblich strengeren Maßnahmen sind in der Diskussion (Agra-Europe 2019b, S. 35f.):

- Verpflichtender Anbau von Zwischenfrüchten vor Sommerkulturen
- Keine Düngieranwendung im Herbst bei Wintergerste und Winterraps
- Senkung des Sollwertes der Düngungsplanung um 20% im Vergleich zu Regionen, in denen die NO_3^- Zielwerte nicht überschritten werden
- Flächenspezifische Einhaltung der Ausbringungsobergrenze für Wirtschaftsdünger von 170 kg N ha^{-1}
- Senkung der Ausbringungsobergrenze für Wirtschaftsdünger von 170 auf 130 kg N ha^{-1}
- Ausweitung der Möglichkeiten der Bundesländer zur Umsetzung zusätzlicher Maßnahmen

Die vier zuerst genannten Maßnahmen sind keine fakultativen Maßnahmen für Bundesländer, sondern zwingend in Regionen einzuführen, die NO_3^- -Zielkonzentrationen in Gewässern überschreiten (top agrar 2019). Zusätzlich wird die folgende Maßnahme als landesweite Anpassung unabhängig von der Umweltbelastung diskutiert:

- Ersetzung des Nährstoffvergleichs und der Überschusslimitierung durch eine flächenspezifische Aufzeichnung des eingesetzten Düngers, um die Einhaltung der Düngebedarfsermittlung besser zu erfassen

Auch wenn die vorgeschlagenen Maßnahmen nicht Teil dieser Studie sind, erlaubt sie eine erste Bewertung. Für den intensiven Schweinemastbetrieb (Schw_int) führt die Verschiebung der Ausbringungszeit des Wirtschaftsdüngers vom Herbst in den Frühling für Wintergerste zu einer starken Verringerung der NO_3^- -Auswaschung. Grundsätzlich ist die Ausbringung von Wirtschaftsdünger im Herbst mit höheren Auswaschungen verbunden als im Frühling (Cameron *et al.* 2013, S. 151). Daher ist die Einschränkung der Anwendung im Herbst sowie der obligatorische Anbau von Zwischenfrüchten, der die Aufnahme überschüssiger Nährstoffe aus der vorherigen Kultur erhöht, eine sinnvolle Maßnahme zur weiteren Verringerung der NO_3^- -Verluste. Betriebe mit weniger als 3 GVE ha^{-1} müssen nur eine Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger von 6 Monaten vorweisen. Wie die Ergebnisse für mittelintensive Schweinemastbetriebe (Schw_mit) zeigen, reicht dies unter Umständen nicht aus, um den

längeren Zeitraum zu überbrücken, in dem die Ausbringung von Wirtschaftsdünger verboten ist.

Wenn der Zielwert der Düngedarfsermittlung um 20% gesenkt wird, müssen fast alle in Kapitel 4.2 bewerteten Betriebstypen ihren Düngereinsatz anpassen. In dem gewählten Modellierungsansatz würden die Betriebe dies dadurch erreichen, dass sie die Intensität des Düngereinsatzes reduzieren und Ertragseinbußen hinnehmen. Der typische Ackerbaubetrieb mit Zuckerrüben (Ack_ZR), der den Einsatz von Düngereinsatz reduzieren muss, um die Düngedarfsermittlung gemäß DüV 2017 zu erfüllen, senkt die NO_3^- -Auswaschung bei gleichzeitig geringem Ertragsverlust und geringen Kosten erheblich. Ohne das Modell erneut anzuwenden sind die tatsächlichen Veränderungen der NO_3^- -Auswaschung und die damit verbundenen Kosten durch die Vorschläge zur DüV 2020 jedoch schwer vorherzusagen. Sie hängen von der kultur-, boden- und klimaspezifischen Ertragsreaktion der N-Düngung in Relation zum zulässigen N-Sollwert ab.

Die flächenspezifische Einhaltung der Ausbringungsobergrenze sowie die Absenkung dieser von 170 auf 130 kg N ha⁻¹ wird vermutlich zu einer Verringerung der NO_3^- -Auswaschung sowie zu hohen Kosten für einige landwirtschaftliche Betriebstypen führen. Die Ergebnisse in Kapitel 4.2 zeigen, dass ein hoher Einsatz von N aus Wirtschaftsdünger zu einer höheren NO_3^- -Auswaschung führt als der Einsatz von Mineraldünger. Folglich weisen landwirtschaftliche Betriebe, die Wirtschaftsdünger importieren, einen Anstieg der NO_3^- -Auswaschung auf. Umgekehrt verringert der reduzierte Einsatz von N aus Wirtschaftsdünger die ausgebrachte Gesamtmenge an N und die Verluste. Die Analyse in Kapitel 4 zeigt, dass die Ausbringungsobergrenze für die Wirtschaftsdünger von Milchviehbetrieben bindenden ist. Eine weitere Verringerung des Grenzwertes oder eine flächenspezifische Berechnung, die eine Umverteilung innerhalb des Betriebes verhindert, führt vermutlich zu zusätzlichen Kosten durch den Export von Wirtschaftsdünger oder eine mögliche Abstockung. Außerdem nimmt der Einsatz von Mineraldünger zu, da der N Bedarf bei intensivem Grünland weit über 130 kg N ha⁻¹ liegt (BMEL 2017c, S. 28). In Schweinemastbetrieben ist der P_2O_5 -Saldo bindenden für die Anwendung von Wirtschaftsdünger. Daher können die Betriebe die Ausbringungsobergrenze für Wirtschaftsdünger nicht vollständig ausnutzen und eine weitere Verringerung hat geringere Auswirkungen.

Während die oben beschriebenen Maßnahmen nur für Gebiete vorgesehen sind, die Zielkonzentrationen für NO_3^- in Gewässern überschreiten, soll der Nährstoffvergleich landesweit durch eine flächenspezifische Erfassung des Düngereinsatzes ersetzt werden, um die Einhaltung der Düngedarfsermittlung besser kontrollieren zu können. Die wenigen verfügbaren Informationen zu dieser Maßnahme machen jedoch eine erste Beurteilung schwierig. Die Düngedarfsermittlung der DüV 2017 repräsentiert bereits eine

Gesamtnährstoffeinsatzgrenze, die nicht überschritten werden darf. Die Landwirte führen diese Planung jedoch vor der Ausbringung der Nährstoffe durch, während für die DüV 2020 die Aufzeichnung zum Zeitpunkt des tatsächlichen Einsatzes vorgesehen ist. Im Modellierungsansatz dieser Studie hat die zusätzliche Erfassung des tatsächlich verwendeten Düngers jedoch keine Änderungen zur Folge, da die Anbauaktivitäten durchschnittliche Jahre ohne Ertragsschwankungen repräsentieren, die vollständige Einhaltung der Maßnahmen angenommen wird und somit der definierte Pflanzenbedarf aus der Düngbedarfsermittlung nicht überschritten wird.

Die Erfassung des eingesetzten Düngers soll die Durchsetzung der Düngbedarfsermittlung verbessern, was anscheinend die primäre Intention der europäischen Kommissionen bei dieser Maßnahme ist (Agra-Europe 2019b, S. 35). Es stellt sich jedoch die Frage, ob eine bessere Ermittlung des Nährstoffeinsatzes durch verpflichtende Beprobung von Wirtschaftsdünger oder die betriebsindividuelle Erfassung des zugekauften Wirtschaftsdüngers wie in Dänemark nicht sinnvoller ist als eine strengere Dokumentationspflicht für die Betriebe. Darüber hinaus sollte bedacht werden, dass der Nährstoffvergleich ein zentrales Instrument der DüV ist, dass Landwirte und kontrollierende Institutionen seit Jahrzehnten bei der Bewertung des betrieblichen Nährstoffmanagements im Fokus haben. Der Wegfall eines solch zentralen und etablierten Instruments hat vermutlich eine negative Signalwirkung und sollte vorsichtig abgewägt werden.

Ergänzend dazu plant die Bundesregierung ein Programm zur Förderung des Transports von überschüssigem Wirtschaftsdünger aus Tierhaltungs- in Ackerbauregionen sowie des Baus von Lagern für Wirtschaftsdünger (Agra-Europe 2019a, S. 14). Die Bedeutung des Exports von überschüssigem Wirtschaftsdünger als Anpassungsstrategie für tierhaltende Betriebe zur Einhaltung strengerer Nährstoffausbringungsgrenzen wird durch die Ergebnisse der Kapitel 4 bestätigt. Derartige Förderprogramme entlasten vor allem Betriebe, die sehr hohe Kosten durch die DüV aufweisen. Es ist jedoch zu beachten, dass die NO_3^- - und NH_3 -Verluste auf den aufnehmenden Betrieben ansteigen, wie für Ackerbaubetriebe in Kapitel 4.2.5 aufgezeigt wird. Dies kann zu negativen Verlagerungseffekten führen, denen entgegenzuwirken ist (siehe auch Kapitel 7).

6. Zusammenfassung

Die Düngeverordnung (DüV) ist das zentrale Instrument, um den Verlust von reaktivem Stickstoff (N) und Phosphor aus der Landwirtschaft zu reduzieren und stellt weitestgehend die Umsetzung der Nitratrichtlinie in Deutschland sicher. Nachdem verschiedene Umweltziele verfehlt wurden, ist die DüV im Juni 2017 novelliert und deutlich verschärft worden. Das vorliegende Forschungsprojekt „Einzelbetriebliche Modellierung der Auswirkung von novellierter Düngegesetzgebung und agrarpolitischer Entwicklung auf landwirtschaftliche Betriebe in NRW“ zielt auf eine Analyse der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der DüV 2017 ab und berücksichtigt dabei die politischen und naturräumlichen Gegebenheiten in Nordrhein-Westfalen (NRW). Es ist Teil des aus drei Teilprojekten bestehenden Clusterprojektes, das die DüV-Novelle auf den Skalen „Feld-Betrieb-Region“ untersucht und als methodischen Beitrag bestehende Modelle über diese Skalen hinweg verknüpft.

Methodik: Für die einzelbetriebliche Analyse wird das Betriebsmodell FarmDyn verwendet, das auf linearer Programmierung basiert und sowohl ökonomische als auch ökologische Variablen abbildet. Es enthält die wichtigsten Maßnahmen der DüV wie die Vorgaben zur Ausbringungstechnik von Wirtschaftsdünger oder zum Nährstoffvergleich. Darüber hinaus sind prominente Anpassungsstrategien und ihre Kosten erfasst, wie zum Beispiel die überbetriebliche Wirtschaftsdüngerverwertung oder die Investition in zusätzliche Lagerkapazitäten. FarmDyn wählt unter den Restriktionen der Faktorausstattung wie Land oder vorhandene Ställe aber auch der DüV das gewinnmaximierende Betriebsprogramm aus. Änderungen im Betriebsprogramm durch die Einführung der DüV 2017 lassen dann Rückschlüsse auf die damit verbundenen betrieblichen Anpassungskosten und die veränderte Umweltbelastung zu.

Im vorliegenden Projekt wird FarmDyn in zwei unterschiedlichen Modellierungskonzepten eingesetzt. So wird es erstens auf die gesamte Population von Schweinemast- und Milchviehbetrieben in NRW angewendet, um Erkenntnisse über die Verteilung der Anpassungskosten durch die DüV 2017 in der Betriebspopulation zu gewinnen. Zweitens wird es für ausgewählte typische Betriebe verwendet, um zusätzlich detailliertere Einblicke in Anpassungsreaktionen zu erlangen und die veränderte Umweltbelastung durch die DüV 2017 zu quantifizieren. Dafür wird FarmDyn im Rahmen des Clusterprojektes mit einem für das Verbundprojekt entwickelten Modell der Modellierungsplattform SIMPLACE verknüpft, das in Teilprojekt 1 auf NRW und die Analyse der DüV ausgerichtet wird.

Zur Abbildung der Verteilung der Kosten wird mit Hilfe eines Sampling-Ansatzes eine Population der Milchvieh- und Schweinemastbetriebe in NRW erzeugt. Dafür wird primär die

Agrarstrukturerhebung 2016 verwendet, die detaillierte und aktuelle einzelbetriebliche Daten fast aller Betriebe in NRW enthält. Eine direkte Verwendung der beobachteten Betriebe ist aufgrund von Geheimhaltungspflichten nicht möglich. FarmDyn berechnet für alle Betriebe der Population die Anpassungskosten durch die DüV 2017. Diese werden mit Hilfe von deskriptiver Statistik und im Rahmen einer systematischen Sensitivitätsanalyse ausgewertet.

Darüber hinaus wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine Betriebstypologie für NRW basierend auf der Agrarstrukturerhebung 2016 erstellt. Daraus werden Ackerbau-, Veredelungs- und Milchviehbetriebe ausgewählt, die typisch für NRW oder besonders durch die DüV Novelle betroffen sind. Für diese werden mit FarmDyn unter Einbezug der Simulationsergebnisse aus der Modellplattform SIMPLACE die Anpassungskosten durch die DüV 2017 sowie die veränderte Umweltwirkung quantifiziert. SIMPLACE stellt dabei Erträge und Nitratauswaschungen für unterschiedliches Managementszenarien und verschiedene Standorte in NRW zur Verfügung.

Ergebnisse: Die Resultate zeigen, dass die Anpassungskosten durch die DüV 2017 für Schweinemast- und Milchviehbetriebe sehr heterogen sind. Sie reichen von 0 bis 2,66 € Schwein⁻¹ und von 0 bis 0,83 Cent (kg Milch)⁻¹. 47% der Schweinemast- und 38% der Milchviehbetriebe haben keinerlei Anpassungskosten. Betriebe mit geringen Anpassungskosten müssen sich primär durch den Einsatz von emissionsarmer Technik zur Wirtschaftsdüngerausbringung anpassen. Schweinemastbetriebe mit hohen Tierbesatzdichten haben die höchsten Anpassungskosten. Diese Betriebe müssen zum Teil in zusätzliche Lagerkapazitäten investieren und ihre Wirtschaftsdüngerausbringung wird durch die geringeren zulässigen Phosphatüberschüsse unter der DüV 2017 limitiert. Daher hat auch die Phosphatversorgung der Böden, die die zulässigen Überschüsse determiniert, einen großen Einfluss auf die Anpassungskosten der Schweinemastbetriebe. Milchviehbetriebe müssen sich hingegen nicht an die strengeren Nährstoffsalden unter der DüV 2017 anpassen. Ihre Wirtschaftsdüngerausbringung wird durch die Obergrenze von 170 kg N ha⁻¹ limitiert, die unter DüV 2007 und 2017 weitgehend gleichgeblieben ist. Ihnen entstehen vor allem Anpassungskosten durch die verbindliche Verwendung von emissionsarmer Ausbringungstechnik. Dabei steigen die Kosten mit einem höheren Anteil an Grünland an, da die Technik auf Grünland etwas teurer ist als auf Ackerland und auf letzterem Breitverteiler auf unbestelltem Land immer noch zulässig sind.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Anpassungskosten durch die DüV 2017 von den Kosten für überbetriebliche Wirtschaftsdüngerverwertung und den Kosten für emissionsarme Ausbringungstechnik, die beispielsweise durch Lohnunternehmer bereitgestellt wird, abhängt. Darüber hinaus steigen die Anpassungskosten bei höheren Schweinepreisen, wenn Betriebe sich durch eine Abstockung der Bestände an die strengeren Vorgaben zu den Nährstoffsalden

oder der Lagerkapazität anpassen. Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht außerdem, dass die Anpassungskosten von dem angenommenen Mineraldüngeräquivalent für Stickstoff in Wirtschaftsdünger und den Mineraldüngergaben zusätzlich zum Wirtschaftsdünger abhängen. Dies verdeutlicht einerseits die Unsicherheiten in den Ergebnissen, da diesbezüglich in der Analyse Annahmen getroffen werden müssen. Andererseits zeigt es das Potential auf, die Anpassungskosten an die DüV 2017 durch ein verbessertes Dünge-Management zu reduzieren.

Die Analyse der Kosten und Änderungen der Umweltbelastung bei typischen Betrieben zeigt ebenfalls die Heterogenität der Betroffenheit. Ein typischer intensiver Schweinemastbetrieb mit hohem Tierbesatz reduziert seine Nitratemissionen deutlich von 50 auf 38 kg Nitrat-N ha⁻¹ und seine Ammoniakemissionen von 82 auf 73 Ammoniak-N ha⁻¹. Veränderungen werden primär durch den Export von Wirtschaftsdünger, die Nutzung von emissionsarmer Ausbringungstechnik und die Verschiebung der Wirtschaftsdüngerausbringung vom Herbst in das Frühjahr realisiert. Typische Schweinemastbetriebe mit geringerem Tierbesatz realisieren jedoch nur geringe Reduktionen der Umweltbelastung, primär durch den Einsatz emissionsarmer Ausbringungstechnik. Typische Milchviehbetriebe müssen sich nicht an strengere Vorgaben zu den Nährstoffsalden anpassen. Sie reduzieren ebenfalls primär Ammoniakemissionen durch den Einsatz emissionsarmer Ausbringungstechniken und die verbindliche schnellere Einarbeitung von Wirtschaftsdünger auf unbestelltem Acker. Auch für beispielhaft analysierte Betriebe mit Sauenhaltung und Biogaserzeugung wurden Reduktionen der Umweltbelastungen gefunden.

Darüber hinaus werden die Kosteneinsparungen und Emissionsänderungen auf typischen Ackerbaubetrieben simuliert, wenn diese unter der DüV 2017 Wirtschaftsdünger importieren. Beim Import von 15 und 20 m³ ha⁻¹ können Kosteneinsparungen von 98 und 100 € ha⁻¹ ermittelt werden. Die eingesparten Kosten für Mineraldünger überkompensieren die Kosten für die Wirtschaftsdüngerausbringung deutlich. Jedoch steigen die Nitrat- und Ammoniakemissionen durch den Wirtschaftsdüngerimport an. Für einen typischen Ackerbaubetrieb, der 15 m³ ha⁻¹ importiert, steigen die Emissionen beispielsweise von 40 auf 46 kg Nitrat-N ha⁻¹ und von 1 auf 9 kg Ammoniak-N ha⁻¹. Dieses Resultat verdeutlicht die Gefahr von möglichen räumlichen Verlagerungen von negativen Umweltwirkungen durch den Transport von Wirtschaftsdünger.

Diskussion: Das verwendete Modell FarmDyn erlaubt eine detaillierte und realistische Abbildung der Maßnahmen der DüV und korrespondierender Anpassungsstrategien. Die Verknüpfung mit dem Pflanzenbaummodell SIMPLACE generiert auf die naturräumlichen Gegebenheiten von NRW abgestimmte und differenzierte Zusammenhänge zwischen Management, Ertrag und Nitratauswaschungen. Die dem Modellierungsansatz zu Grunde liegenden Verhaltensannahmen greifen jedoch einige Aspekte des Verhaltens von Landwirten

und möglichen Anpassungen an die DüV nicht auf. So wird im Modell immer die optimale Menge an Dünger eingesetzt und Einsparungspotentiale durch verbessertes Management, die in der Realität durchaus bestehen, werden nicht erfasst. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass Betriebe sich sowohl unter der DüV 2007 als auch der DüV 2017 an die gesetzlichen Vorgaben halten. Somit werden Kosten- und Emissionsänderungen durch die DüV 2017, die sich aus einem verbesserten Nährstoffmanagement und dem strikteren Vollzug ergeben, von der vorliegenden Studie nicht erfasst.

Die Betriebspopulation sowie die Betriebstypologie basiert weitestgehend auf der Agrarstrukturerhebung 2016. Diese Datenquelle ist sehr geeignet für die Analyse von Agrar- und Umweltpolitiken, da sie fast alle Betriebe erfasst, zahlreiche relevante Variablen beinhaltet und sehr aktuell ist. Für die Erstellung der Betriebspopulation muss jedoch für einige Merkmale auf restriktivere Annahmen zurückgegriffen werden, was zu Unsicherheiten hinsichtlich der Kostenverteilung in der Population führt. Darüber hinaus werden komplexe Strukturen landwirtschaftlicher Betriebe nicht erfasst, was ebenfalls zu einer Verzerrung der Ergebnisse insbesondere von Veredelungsbetrieben führen kann. Das Konzept der Betriebsgenerierung sowie die angewendeten Modelle können in Zukunft für ähnliche Analysen der Agrar- und Umweltpolitik in NRW eingesetzt werden, beispielsweise hinsichtlich der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik oder der anstehenden DüV-Novelle.

7. Schlussfolgerungen für die Umsetzung in die Praxis

Im Fokus des Forschungsprojektes „Einzelbetriebliche Modellierung der Auswirkung von novellierter Düngegesetzgebung und agrarpolitischer Entwicklung auf landwirtschaftliche Betriebe in NRW“ steht die Analyse der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Düngeverordnung (DüV) von 2017 auf Betriebsebene. Die abgeleiteten Schlussfolgerungen richten sich an Entscheidungsträger in der Politik und sollen zu einer wissenschaftsbasierten Begleitung der aktuellen und zukünftigen Novellierung der DüV beitragen.

Die Anpassungskosten an die DüV sind sehr heterogen und hängen stark von Betriebsmerkmalen ab. Betriebe mit hohen Anpassungskosten haben einen höheren Anreiz sich nicht an die Vorgaben zu halten. Daher sollte sich der Vollzug auf Betriebe konzentrieren, die besonders betroffen sind. Dies sind beispielsweise Schweinemastbetriebe mit einer hohen Tierbesatzdichte und hoch mit Phosphor versorgten Böden. Auch kompensierende Maßnahmen sollten sich an der Kostenverteilung in der Betriebspopulation ausrichten. Grundsätzlich sind sie vor dem Hintergrund zu gestalten, ob sie viele Betriebe mit geringer Kostenbelastung oder wenige Betriebe mit hoher Belastung entlasten sollen. Bestehende finanzielle Förderprogramme unterstützen bereits die Nutzung emissionsarmer Techniken. Diese Techniken verursachen für eine Vielzahl von Betrieben Kosten; die Kosten pro Betrieb sind jedoch verhältnismäßig gering. Sehr hohe Kosten entstehen hingegen für einige Betriebe durch die Einhaltung der abgesenkten Nährstoffsalden. Sie können für die Betriebe durch die Förderung von überbetrieblicher Nährstoffverwertung reduziert werden, beispielsweise durch den erleichterten Bau von Güllelagern in Ackerbauregionen. Darüber hinaus sollten die Forschung und Beratung hinsichtlich stark Stickstoff und Phosphor reduzierter Fütterung intensiviert werden. Diese Anpassungsstrategie wird im vorliegenden Modellierungsansatz als kosteneffizient identifiziert. Sie findet jedoch in der Praxis noch wenig Einsatz, was auf Hemmnisse jenseits der ökonomischen Rentabilität hindeutet.

Bei der Berechnung des Nährstoffvergleichs sowie der Düngebedarfsermittlung werden in der DüV Standardfaktoren für Stickstoffverluste aus Stall, Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdünger bereitgestellt. In der vorliegenden Studie sind die berechneten Stickstoffverluste geringer als die Standardfaktoren, was eine höhere Anwendung von Stickstoff als von den Grenzwerten vorgegeben erlaubt. In einer zukünftigen Überarbeitung der DüV sollte die Standardverlustfaktoren überprüft und insbesondere an die neuen emissionsarmen Ausbringungstechniken angepasst werden. Dies fördert einen effizienteren Einsatz von Wirtschaftsdüngers, da die Stickstoffversorgung knapp werden und die Erträge sinken können, wenn die Mineraldüngeräquivalente, die sich in den Standardverlustfaktoren widerspiegelt, nicht realisiert werden. Die einheitliche Obergrenze von 175 kg Stickstoff pro

Hektar im Rahmen der Stoffstrombilanzverordnung ist ebenfalls zu hoch angesetzt und im Gegensatz zu den betriebsindividuellen Grenzwerten nicht bindend. Diese einheitliche Obergrenze sollte daher wie geplant in der Zukunft wegfallen.

Die Analyse der Milchviehbetriebe zeigt, dass der Einsatz von Wirtschaftsdünger durch die Ausbringungsobergrenze von 170 kg Stickstoff pro Hektar limitiert wird. In der Vergangenheit waren im Rahmen der Derogation höhere Ausbringungsmengen erlaubt, wenn der Betrieb bestimmte Voraussetzungen an sein Nährstoffmanagement erfüllt. Eine Wiedereinführung der Derogation könnte intensive Milchviehbetriebe entlasten, da weniger Wirtschaftsdünger überbetrieblich verwertet werden muss und der Zukauf von Mineraldünger reduziert werden kann. Die Wiedereinführung ist jedoch vor dem Hintergrund der anstehenden DüV-Novelle zu überprüfen und nur für Betriebe außerhalb von Belastungsgebieten denkbar.

Politikrelevante Agrarforschung ist stark von der Qualität der bereitgestellten Daten abhängig. Das vorliegende Forschungsprojekt nutzt primär die einzelbetrieblichen Daten aus der Agrarstrukturerhebung und Landwirtschaftszählung, die einen Großteil der Betriebspopulation in Nordrhein-Westfalen (NRW) abbilden und zahlreiche relevante Betriebsmerkmale beinhalten. Eine Einschränkung bei der Analyse kam dadurch zu Stande, dass die offizielle Agrarstatistik für NRW rechtliche Einheiten als einen Betrieb ausweist. Es bestehen jedoch Betriebe aus mehreren rechtlichen Einheiten, meist um die Steuerlast zu optimieren. Diese Betriebsstrukturen sind nicht zu erkennen, was die Aussagekraft der Ergebnisse einschränkt. Generell sind genaue Kenntnisse über landwirtschaftliche Betriebsstrukturen nicht nur für die Analyse von Umweltpolitiken hilfreich, sondern insbesondere auch im Hinblick auf landwirtschaftliche Einkommen. In einigen Bundesländern werden bereits verschiedene rechtliche Einheiten, die zu einem Betrieb gehören, zusammengefasst. Dies auch in NRW zu tun wäre ein erster Schritt, um landwirtschaftliche Betriebe realistischer in der Agrarstatistik abzubilden.

Die Analyse der Ackerbaubetriebe zeigt, dass ihre Nitrat- und Ammoniakemissionen durch den Import von Wirtschaftsdünger ansteigen. Man kann argumentieren, dass dies kein Problem darstellt solange die Emissionen auf dem abgebenden Betrieb stärker sinken und es so zu einer Nettovermeidung kommt. Der Schaden von Nitrat- und Ammoniakverlusten ist jedoch nicht an jedem Ort gleich. So ist ein Emissionsanstieg über Grundwasserkörpern, die bereits die zulässigen Nitratkonzentrationen übersteigen, oder in der Nähe von naturnahen Ökosystemen problematischer als andersorts. Es kann somit zu negativen Verlagerungseffekten von Umweltwirkungen durch den Transport von Wirtschaftsdünger kommen. Entscheidungsträger sollten dem entgegenwirken, indem der Transport in besonders sensitive Gebiete vermindert oder verhindert wird. Vorgaben, die im Rahmen der DüV

zusätzlich in bereits belasteten Gebieten erlassen werden dürfen, können den Import von Wirtschaftsdünger unattraktiver machen und seine effiziente Nutzung sicherstellt. Die kommende DüV wird hier vermutlich auf Länderebene noch mehr Handlungsmöglichkeiten beinhalten.

8. Literaturverzeichnis

- Agra-Europe 2019a. Aeikens wertet Nachschärfen der Düngeverordnung als „alternativlos“. *Agra-Europe* 7/19, 14–15.
- Agra-Europe 2019b. Kommission zwingt Deutschland zur Nachbesserung bei der Düngeverordnung. *Agra-Europe* 6/19, 35–36.
- Andersen, E., Elbersen, B., Godeschalk, F., Verhoog, D. 2007. Farm management indicators and farm typologies as a basis for assessments in a changing policy environment. *Journal of Environmental Management* 82(3), 353–362.
- Belhouchette, H., Louhichi, K., Therond, O., Mouratiadou, I., Wery, J., van Ittersum, M., Flichman, G. 2011. Assessing the impact of the Nitrate Directive on farming systems using a bio-economic modelling chain. *Agricultural Systems* 104(2), 135–145.
- Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Caraco, N. F. 2001. Human Impact on Erodable Phosphorus and Eutrophication - A Global Perspective. *BioScience* 51(3), 227–234.
- Berentsen, P.B.M. 2003. Effects of animal productivity on the costs of complying with environmental legislation in Dutch dairy farming. *Livestock Production Science* 84(2), 183–194.
- Blanco, M. 2016. Policy Impact Assessment. In S. Shrestha, A. Barnes, B. V. Ahmadi (Eds.): Farm-level modelling. Techniques, applications and policy. Oxfordshire: CABI, 1–13.
- BMEL 2017a. Verordnung über den Umgang mit Nährstoffen im Betrieb und betriebliche Stoffstrombilanzen, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), <https://www.gesetze-im-internet.de/stoffbilv/StoffBilV.pdf> (zuletzt geprüft 11.03.19).
- BMEL 2017b. Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), http://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/index.html (zuletzt geprüft 26.08.18).
- BMEL 2017c. Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), http://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/index.html (zuletzt geprüft 15.02.19).
- BMEL 2017d. Verordnung zur Neuordnung der guten fachlichen Praxis beim Düngen, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), <https://www.bundesrat.de/>

SharedDocs/drucksachen/2017/0101-0200/148-17.pdf?__blob=publicationFile&v=9
(zuletzt geprüft 19.03.19).

- BMELV 2007. Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen - DüV, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).
- BMU, BMELV 2012. Nitratbericht 2012, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU); Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).
- BMUB 2014. The German Government's Climate Action Programme 2020 - Cabinet decision of 3 December 2014, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/aktionsprogramm_klimaschutz_2020_broschuere_en_bf.pdf (zuletzt geprüft 19.03.19).
- BMUB & BMEL 2016. Nitratbericht 2016 - Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit sowie für Ernährung und Landwirtschaft, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB); Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/nitratbericht_2016_bf.pdf (zuletzt geprüft 21.03.19).
- Braun, J. 2015. Strategisch investieren für die betriebliche Entwicklung. presentation, Marl-Recklinghausen, 11/17/2015, https://www.vb-marl-recklinghausen.de/content/dam/g4008-0/4008_webbankplus_volksbank_marl_recklinghausen_eg/wir_fuer_sie/aktuelles_und_regionales/2013_11_19_kundenveranstaltung_landwirte_vom_07_11_13/VortragBraunFHSWFMarl071113.pdf (zuletzt geprüft 15.08.18).
- Britz, W., Gocht, A., Domingez, I. P., Jansson, T., Grosche, S., Zhao, N. 2012. EU-Wide (Regional and Farm Level) Effects of Premium Decoupling and Harmonisation Following the Health Check Reform. *German Journal of Agricultural Economics* 61(1), 44–56.
- Britz, W., Lengers, B., Kuhn, T., Schäfer, D., Pahmeyer, C. 2018. A dynamic mixed integer bio-economic farm scale model - model documentation, <http://www.ilr.uni-bonn.de/em/rsrch/farmdyn/FarmDynDoku/index.html> (zuletzt geprüft 15.02.19).
- Budde, J. 2013. Ökonomische Auswirkungen von Politiken zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie auf die Schweinehaltung im Münsterland, Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.

- Cameron, K. C., Di, H. J., Moir, J. L. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system - A review. *Annals of Applied Biology* 162(2), 145–173.
- Dämmgen, U., Haenel, H.-D., Rösemann, C., Eurich-Menden, B., Döhler, H. 2010. Derivation of TAN related ammonia emission factors in pig production. *Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research* 4 2010(60), 241–248.
- Destatis o.D. Informationen zur Agrarstrukturerhebung 2016, Statistisches Bundesamt (Destatis), <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Agrarstrukturerhebung2016/Agrarstrukturerhebung2016.html> (zuletzt geprüft 19.03.19).
- Dise, N. B., Ashmore, M., Belyazid, S., Bleeker, A., Boobink, R., De Vries, J. W., Erisman, J. W., Spranger, T., Stevens, C. J., van den Berg, L. 2011. Nitrogen as a threat to European terrestrial biodiversity. In M. A. Sutton, C. M. Howard, J. W. Erisman, G. Billen, Albert Bleeker, Peringe Greenfelt et al. (Eds.): *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives*, Chapter 20. Cambridge: Cambridge University Press, 463–494.
- DLG 2014. Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG), Frankfurt am Main.
- DLZ Agrarmagazin 2015. Stickstoff-Effizienz steigern bei Gülle und Gärresten, https://www.agrar.basf.de/agroportal/de/media/migrated/de/produkte_neu_1/vizura/DLZ-Beilage_Stickstoff-Effizienz_steigern_bei_Guelle_und_Gaerresten_11_2015.pdf (zuletzt geprüft 15.08.18).
- Döhler, H., Eurich-Menden, B., Dämmgen, U., Osterburg, B., Lüttich, M., Bergschmidt, A., Berg, W., Brunsch, W. 2002. BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahre 2010, Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL); Umweltbundesamt (UBA), 05/02, Berlin, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/short/k2071.pdf> (zuletzt geprüft 19.03.19).
- EEA. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 - 3.D Crop production and agricultural soils, European Environment Agency (EEA), Luxembourg.
- Europäische Kommission (2008). Commission Regulation (EC) No 1242/2008 of 8 December 2008 establishing a Community typology for agricultural holdings. *Official Journal of the European Communities* L 335, 3–24.

- Europäischer Rat (1991). Council Directive of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91 / 676 /EEC). *Official Journal of the European Communities* L 375, 1-8.
- Europäisches Parlament; Europäischer Rat (2008). Directive 2008/56/EC of the Europäisches Parlament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive) L 164, 19–40 (zuletzt geprüft 22.03.19).
- Europäisches Parlament; Europäischer Rat (2016). Directive (EU) 2016/2284 of the Europäisches Parlament and of the council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC. *Official Journal of the European Communities* L 344, 1–31.
- Europäisches Parlament; Europäischer Rat (2000). Directive 2000/60/EG of the Europäisches Parlament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities* L 327, 1–72.
- Forstner, B., Zavyalova, E. 2017. Betriebs- und Unternehmensstrukturen in der deutschen Landwirtschaft: Workshop zu vorläufigen Ergebnissen und methodischen Ansätzen, Thünen Working Paper 80, https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059277.pdf (zuletzt geprüft 19.03.19).
- Frehe, S. 2018. Gülle: Abgabekosten bleiben auf hohem Niveau, Schweinezucht und Schweinemast, <https://www.susonline.de/news/management/guelle-abgabekosten-erreichen-neues-rekordniveau-9214742.html> (zuletzt geprüft 27.08.18).
- Gaiser, T. 2018. Minimum chemical fertilizer need of selected crops, persönliche Kommunikation, Bonn, 2018.
- Gaiser, T., Perkons, U., Küpper, P. M., Kautz, T., Uteau-Puschmann, D., Ewert, F., Enders, A., Krauss, G. 2013. Modeling biopore effects on root growth and biomass production on soils with pronounced sub-soil clay accumulation. *Ecological Modelling* 256, 6–15.
- Grizzetti, B., Bouraoui, F., Billen, G., van Grinsven, H., Cardoso, A. C., Thieu, V., Garnier, J., Curtis, C., Howarth, R., Johnes, P. 2011. Nitrogen as a threat to European water quality. In M. A. Sutton, C. M. Howard, J. W. Erisman, G. Billen, Albert Bleeker, Peringe Greenfelt et al. (Eds.): *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives*, Chapter 17. Cambridge: Cambridge University Press, 379–404.

- H & K aktuell 2016. Markt für Gülle und Gärprodukte unter Druck, https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK_aktuell/2016/H_K_6-2016.pdf (zuletzt geprüft 15.08.18).
- Haenel, H.-D., Rösemann, C., Dämmgen, U., Döring, U., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Freibauer, A., Döhler, H., Schreiner, C., Osterburg, B. 2018. Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2016 - Report on methods and data (RMD) submission 2018, Thünen Report 57, Braunschweig.
- Haenel, H.-D., Rösemann, C., Dämmgen, U., Poddey, E., Freibauer, A., Döhler, H., Eurich-Menden, B., Wulf, S., Dieterle, M., Osterburg, B. 2012. Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990-2010 - Report on methods and data (RMD) submission 2012, Landbauforschung Special Issue 356, Braunschweig.
- Hartl, G., Piepel, H., Laurenz, L. 2013. Transport und Export von Gülle – Ökonomische Konsequenzen für den Betrieb. Präsentation. LWK Herbsttagung - Nährstoffvergleich in und zwischen den Regionen - Strategien für NRW 10.12.2013, Stadtlohn, 2013, <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/download/herbsttagung/2013-12-hartl.pdf> (zuletzt geprüft 27.08.18).
- Iman, R. L., Conover, W. J. 1982. A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables. *Communications in Statistics - Simulation and Computation* 11(3), 311–334.
- IPCC 2006a. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, Emissions from Livestock and Manure Management, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC 2006b. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions From Lime and Urea Application, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Jacobs, G. 2014. Phosphate status of soils in North Rhine-Westphalia 2012, persönliche Kommunikation, Bonn, 2014.
- Janssen, S., Louhichi, K., Kanellopoulos, A., Zander, P., Flichman, G., Hengsdijk, H., Meuter, E., Andersen, E., Belhouchette, H., Blanco, M., Borkowski, N., Heckeley, T., Hecker, M., Li, H., Oude Lansink, A., Stokstad, G., Thorne, P., van Keulen, H., van Ittersum, M. K. 2010. A generic bio-economic farm model for environmental and economic assessment of agricultural systems. *Environmental Management* 46(6), 862–877.
- Jarvis, S. C., Pain, B. F. 1994. Greenhouse gas emissions from intensive livestock systems: Their estimation and technologies for reduction. *Climatic Change* 27, 27–38.

- Kalbach-Nölke, K. 2018. Biogasdatenbank Nordrhein-Westfalen, persönliche Mitteilung, 18.10.2018
- Karl, H., Noleppa, S. 2017. Kosten europäischer Umweltstandards und von zusätzlichen Auflagen in der deutschen Landwirtschaft, HFFA Research Paper 05/2017, <https://media.repro-mayr.de/06/706506.pdf> (zuletzt geprüft 29.08.18).
- KTBL 2014. Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt.
- KTBL 2016. Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt.
- KTBL 2018a. Feldarbeitsrechner, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/home.html;jsessionid=CBE75FD0BF4BC56B09F8340B02F87DFB> (zuletzt geprüft 11.03.18).
- KTBL 2018b. KTBL-Feldarbeitsrechner, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), <https://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html> (zuletzt geprüft 15.02.19).
- KTBL 2018c. Standard gross margins, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), <https://daten.ktbl.de/sdb/welcome.do> (zuletzt geprüft 15.02.19).
- Kuratorium für Betriebshilfsdienste und Maschinenringe in Westfalen-Lippe e.V. 2017. Erfahrungssätze für Maschinenring-Arbeiten unter Landwirten, <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/beratung/pdf/erfahrungssaetze-rh.pdf> (zuletzt geprüft 07.05.18).
- Lengers, B., Britz, W., Holm-Müller, K. 2014. What Drives Marginal Abatement Costs of Greenhouse Gases on Dairy Farms? A Meta-modelling Approach. *Journal of Agricultural Economics* 65(3), 579–599.
- LWK Nds. 2016. Nährstoffbericht in Bezug auf Wirtschaftsdünger für Niedersachsen 2014/2015, Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK Nds.), Oldenburg, <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/24766.html> (zuletzt geprüft 19.03.19).
- LWK Nds. 2018. Strohpreisrechner, Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK Nds.), <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/30111.html> (zuletzt geprüft 07.12.18).
- LWK NRW o.D. Biogas in Nordrhein-Westfalen, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK NRW), <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/biogas/veroeffentlichungen/biogas-in-nrw.htm> (zuletzt geprüft 08.04.19).

- LWK NRW 2014. Nährstoffbericht 2014 über Wirtschaftsdünger und andere organische Düngemittel für Nordrhein-Westfalen, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK NRW), Münster, <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/naehrstoffbericht-nrw-2014.pdf> (zuletzt geprüft 04.08.17).
- LWK NRW 2018. Nährstoffbericht 2017 über Wirtschaftsdünger und andere organische Dünger, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK NRW), Münster, <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/naehrstoffbericht-2017.pdf> (zuletzt geprüft 15.02.19).
- LWK SH 2018. Richtwerte für die Düngung 2018, Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (LWK SH), Rendsburg.
- Mack, G., Huber, R. 2017. On-farm compliance costs and N surplus reduction of mixed dairy farms under grassland-based feeding systems. *Agricultural Systems* 154, 34–44.
- McKay, M. D., Beckman, R. J., Conover, W. J. 1979. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics* 42, 55–61.
- McKittrick, R. 1999. A Derivation of the Marginal Abatement Cost Curve. *Journal of Environmental Economics and Management* 37(3), 306–314.
- Menghi, A., Roest, K. de, Porcelluzzi, A., Deblitz, C., Davier, Z. von, Wildegger, B., Witte, T. de, Strohm, K., Garming, H., Dirksmeyer, W. 2015. Assessing farmers' cost of compliance with EU legislation in the fields of environment, animal welfare and food safety, ec.europa.eu/smart-regulation/evaluation/search/download.do?documentId=13205277 (zuletzt geprüft 15.02.19).
- MULNV 2018. Landbewirtschaftung: In unseren Kulturlandschaften nachhaltig produzieren - Nitrat im Grundwasser, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV), <http://www.nachhaltigkeitsindikatoren.nrw.de/nitrat-im-grundwasser/> (zuletzt geprüft 15.03.19).
- MULNV 2019. Kabinett billigt Entwurf zur Landesdüngeverordnung, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV), <https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/kabinett-billigt-entwurf-zur-landesduengeverordnung> (zuletzt geprüft 01.03.19).
- Neumann, H. 2015. Geschickte Logistik ist gefragt! <https://www.eilbote-online.com/artikel/guelletransport-in-ackerbauregionen-geschickte-logistik-ist-gefragt-14653/> (zuletzt geprüft 26.08.18).

- Noordhof, J. 2018. Trend-Report: Gülletechnik 2018, Lohnunternehmer 5/2018, <https://lu-web.de/redaktion/news/trend-report-2018-guelletechnik/> (zuletzt geprüft 11.05.18).
- Osterburg, B., Techen 2012. Evaluierung der Düngeverordnung - Ergebnisse und Optionen zur Weiterentwicklung, Bund-Länder-Arbeitsgruppe zur Evaluierung der Düngeverordnung, Braunschweig, https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn051542.pdf (zuletzt geprüft 19.03.19).
- Schäfer, D., Britz, W. 2017. Estimating impacts of the revised German fertilizer ordinance on manure transport flows within North Rhine-Westphalia, 15th EAAE Kongress, 29. August – 1. September 2017, Parma.
- Schäfer, D., Britz, W., Kuhn, T. 2017. Flexible Load of Existing Biogas Plants: A Viable Option to Reduce Environmental Externalities and to Provide Demand-driven Electricity? *German Journal of Agricultural Economics* 66, 109–123.
- Schnippe, F. 2013. Gülle-Kosten explodieren. - Hohe Viehdichten und Verschärfungen bei der Düngung heizen die Gülle-Kosten extrem an. Droht der Kollaps? *Schweinezeitung und Schweinemast* 3/2013, 10–15.
- Schröder, J. 2005. Revisiting the agronomic benefits of manure: a correct assessment and exploitation of its fertilizer value spares the environment. *Bioresource Technology* 96(2), 253–261.
- Stalljohann, G. 2017. Futter: So drehen Sie an der Nährstoffschraube. In top agrar (Ed.): Neue Düngeverordnung. Münster, 18–21.
- Stehfest, E., Bouwman, L. 2006. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation - Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74(3), 207–228.
- TI o.D. Daten & Fakten - Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft, Thünen Institut (TI), <https://www.thuenen.de/de/thema/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/ammoniak-emissionen-aus-der-landwirtschaft/> (zuletzt geprüft 13.03.19).
- top agrar 2013. Die Gülle-Kosten explodieren, <https://www.topagrar.com/news/Home-top-News-Die-Guelle-Kosten-explodieren-1122110.html> (zuletzt geprüft 27.08.18).
- top agrar 2019. Dünge-VO: „Von fehlender Planungssicherheit zu sprechen, ist unehrlich“, https://www.topagrar.com/management-und-politik/news/duenge-vo-von-fehlender-planungssicherheit-zu-sprechen-ist-unehrlich-10557849.html?utm_content=start (zuletzt geprüft 11.03.19).

- Townsend, A. R., Howarth, R. W., Bazzaz, F. A., Booth, M. S., Cleveland, C. C., Collinge, S. K., Dobson, A. P., Epstein, P. R., Holland, E. A., Keeney, D. R., Mallin, M. A., Rogers, C. A., Wayne, P., Wolfe, A. H. 2003. Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1(5), 240–246.
- UBA 2018. Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellkategorien, Umweltbundesamt (UBA), https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_tab_emi-ausgew-luftschadst_2018_0.pdf (zuletzt geprüft 13.03.19).
- Uthes, S., Sattler, C., Zander, P., Piorr, A., Matzdorf, B., Damgaard, M., Sahrbacher, A., Schuler, J., Kjeldsen, C., Heinrich, U., Fischer, H. 2010. Modeling a farm population to estimate on-farm compliance costs and environmental effects of a grassland extensification scheme at the regional scale. *Agricultural Systems* 103(5), 282–293.
- van der Straeten, B., Buysse, J., Nolte, S., Lauwers, L., Claeys, D., van Huylenbroeck, G. 2012. The effect of EU derogation strategies on the compliance costs of the nitrate directive. *Science of The Total Environment* 421-422, 94–101.
- van Grinsven, H.J.M., Tiktak, A., Rougoor, C. W. 2016. Evaluation of the Dutch implementation of the nitrates directive, the water framework directive and the national emission ceilings directive. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 78, 69–84.
- Webb, J., Pain, B., Bittman, S., Morgan, J. 2010. The impacts of manure application methods on emissions of ammonia, nitrous oxide and on crop response - A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 137(1-2), 39–46.

9. Anhang

Anhang A Ergebnisse zur Bandbreite der Kosten für die überbetriebliche Wirtschaftsdüngerverwertung

Quelle	Kosten	Jahr	Kommentare
Braun (2015, S. 39)	12 € m ⁻³	2015	-
DLZ Agrarmagazin (2015, S. 7)	10 € m ⁻³	2015	-
Frehe (2018)	Bis zu 15 € m ⁻³	2018	-
Hartl <i>et al.</i> (2013, S. 11)	9 - 11 € m ⁻³ 13 - 15 € m ⁻³	2013 2015 (geschätzt)	-
H & K aktuell (2016, S. 7)	bis zu 15 € m ⁻³	2016	-
Neumann (2015)	8 - 12 € m ⁻³	2015	-
Schnippe (2013, S. 10ff.)	9 - 11 € m ⁻³ bis zu 20 € m ⁻³	2013	Hohe Kosten durch Lagerengpässe im Winter
top agrar (2013)	8.50 - 9 € m ⁻³	2013	-

€ – Euro

Anhang B Korrelationskoeffizienten für Betriebsmerkmale

Tabelle Anhang B.1 Korrelationskoeffizienten für die Betriebsmerkmale in Schweinemastbetrieben

	Betriebsgröße	Besatzdichte	Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger	Emissionsarme Ausbringungstechniken	P-angereicherte Böden
Betriebsgröße	-	-0,1459 ^a	-0,1115 ^b	0,3216 ^a	
Besatzdichte		-	-0,0284 ^b	-0,0276 ^a	0,3 ^c
Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger			-		
Emissionsarme Ausbringungstechniken				-	
P-angereicherte Böden					-

Pearsons Korrelationskoeffizient; ^a RDC des Statistischen Bundesamtes und der Statistischen Ämter der Länder. Betriebsstrukturerhebung, 2016, eigene Berechnung; ^b RDC des Statistischen Bundesamtes und der Statistischen Ämter der Länder. Landwirtschaftszählung, 2010, eigene Berechnung; ^c angenommen auf Basis der Regionaldaten aus Osterburg & Techen (2012, S. 201)

Tabelle Anhang B.2 Korrelationskoeffizienten für die Betriebsmerkmale in Milchviehbetrieben

	Betriebsgröße	Grünland Anteil	Besatzdichte	Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger	Emissionsarme Ausbringungstechniken	P-angereicherte Böden
Betriebsgröße	-	-0,0322 ^a	-0,0796 ^a	0,0764 ^b	0,2042 ^a	
Grünland Anteil		-	-0,1015 ^a	-0,0067 ^b	0,0782 ^a	
Besatzdichte			-	-0,0294 ^b	-0,1859 ^a	0,3 ^c
Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger				-		
Emissionsarme Ausbringungstechniken					-	
P-angereicherte Böden						-

Pearsons Korrelationskoeffizient; ^a RDC des Statistischen Bundesamtes und der Statistischen Ämter der Länder. Betriebsstrukturerhebung, 2016, eigene Berechnung; ^b RDC des Statistischen Bundesamtes und der Statistischen Ämter der Länder. Landwirtschaftszählung, 2010, eigene Berechnung; ^c angenommen auf Basis der Regionaldaten aus Osterburg & Techen (2012, S. 201)

Anhang C Betriebseigenschaften ausgewählter Betriebstypen

Tabelle Anhang C.1 Betriebseigenschaften der ausgewählten typischen Schweinemastbetriebe

	Extensive Schweinemastbetriebe (Schw_ex)	Schweinemastbetriebe mittlerer Intensität (Schw_mit)	Intensive Schweinemastbetriebe (Schw_int)
Betriebsgröße [ha] ^a	74,64	62,97	33,28
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹] ^a	1,7	2,3	3,4
Repräsentation von Landfläche [%] ^a	- ^b	- ^b	0,37
Repräsentation von Betrieben [%] ^a	1,26	0,96	0,47
Repräsentation von Schweinebestand [%] ^a	8,99	8,63	3,50
Boden-Klima-Region ^a	142	148	148
Fruchtfolge ^a	WW-WG-CCM	WW-WG-CCM-CCM	WW-WG-CCM-CCM
Ausbringungstechnik unter DüV 2017 ^c	Schleppschlauch	Breitverteiler	Breitverteiler
Lagerkapazität Dünger unter DüV 2017 [Monate]	6	6	6
P Versorgung der Böden ^d	Hoher P Status	Hoher P Status	Hoher P Status
Wirtschaftsdüngerimport unter DüV 2017	-	-	-

^a FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Agrarstrukturerhebung 2016, Landwirtschaftszählung 2010, eigene Berechnung. ^b Werte sind aufgrund der Datenschutzrichtlinien nicht verfügbar, ^c Annahmen basierend auf Tabelle Anhang B.1; ^d Annahme basierend auf Osterburg & Techen (2012, S. 200ff.); WW – Winterweizen; WG – Wintergerste; CCM – Corn-Cob-Mix/Korn-Spindel-Gemisch; P – Phosphor; DüV – Düngeverordnung; GVE – Großvieheinheiten

Tabelle Anhang C.2 Betriebseigenschaften des ausgewählten Betriebs mit Biogasanlage

Betrieb mit Biogasanlage	
Betriebsgröße [ha]	150
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹]	2,7
Leistung Biogasanlage [KW]	500
Fördergrundlage Biogasanlage	EEG 2009
Boden-Klima-Region	148
Fruchtfolge	WW-WW-SM
Ausbringungstechnik unter DüV 2017	Breitverteiler
Lagerkapazität Dünger unter DüV 2017 [Monate]	6
P Versorgung der Böden	E

Der typische Betrieb mit Biogasanlage wird nicht aus der ASE 2016 abgeleitet, da diese Biogasanlagen nicht erfasst. Stattdessen wird auf Literaturquellen und Experteneinschätzungen zurückgegriffen, wodurch keinerlei Bezug zu den anderen Betriebstypen besteht. Der typische Betrieb mit Biogasanlage befindet sich in der BKR 148 (Südliches Weser-Ems Gebiet), da sich in diesem Teil von NRW die meisten Biogasanlagen befinden (LWK NRW o.D.). Die Anlage hat mit 500 Kilowatt eine typische Leistung von Biogasanlagen (Kalbach-Nölke 2018) und es wird der Bau unter dem Erneuerbare-Energien-Gesetz 2009 angenommen, da unter diesem der stärkste Zuwachs an Leistung in NRW stattfand (LWK NRW o.D.). Der Betrieb weist eine Flächenausstattung von 150 ha und einen Tierbesatz von 2,7 GVE ha⁻¹ durch Mastschweine auf, um das Gärsubstrat für die Anlage bereitzustellen. Es wird angenommen, dass der Betrieb keine emissionsarme Ausbringungstechnik unter der DüV 2007 verwendet und Lagerkapazitäten von 6 Monaten bereithält.; DüV – Düngeverordnung; EEG – Erneuerbare-Energien-Gesetz; KW – Kilowatt; P – Phosphor; SM – Silomais; WW – Winterweizen

Tabelle Anhang C.3 Betriebseigenschaften des ausgewählten typischen Betriebs mit Sauenhaltung

Betrieb mit Sauenhaltung	
Betriebsgröße [ha] ^a	35,52
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹] ^a	2,4
Repräsentation von Landfläche [%] ^a	-
Repräsentation von Betrieben [%] ^a	0,48
Repräsentation des Sauenbestandes [%] ^a	-
Boden-Klima-Region ^a	142
Fruchtfolge ^a	WW-WG-CCM
Ausbringungstechnik unter DüV 2017 ^b	Breitverteiler
Lagerkapazität Dünger unter DüV 2017 [Monate]	6
P Versorgung der Böden ^c	E

^a FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Agrarstrukturerhebung 2016, Landwirtschaftszählung 2010, eigene Berechnung; ^b Annahme basierend auf Tabelle Anhang B.2.; ^c Annahme basierend auf Osterburg & Techen (2012, S. 200ff.); CCM – Corn-Cob-Mix/ Korn-Spindel-Gemisch; P – Phosphor; WG – Wintergerste; WW – Winterweizen

Tabelle Anhang C.4 Betriebseigenschaften der ausgewählten typischen Milchviehbetriebe

	Intensiver Milchviehbetrieb (Mil_Int)	Kleiner Milchviehbetrieb (Mil_kl)	Großer Milchviehbetrieb (Mil_gr)
Betriebsgröße [ha] ^a	68,66	70	125
Grünland [ha] ^a	26,00	45	80
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹] ^a	2,36	1,51	1,49
Repräsentation von Landfläche [%] ^a	2,62	5,10	4,71
Repräsentation von Betrieben [%] ^a	1,59	3,03	1,45
Repräsentation von Milchviehbestand [%] ^a	13,85	17,04	15,47
Boden-Klima-Raum ^a	142	134	134
Fruchtfolge ^a	WW-SM-SM	WW-SM-SM	WW-SM-SM
Ausbringungstechnik unter DüV 2007 ^b	Breitverteiler	Breitverteiler	Schleppschlauch
Lagerkapazität Dünger unter DüV 2017 [Monate]	6	6	6
P Versorgung der Böden ^c	E	E	E

^a FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Agrarstrukturerhebung 2016, Landwirtschaftszählung 2010, eigene Berechnung; ^b Annahme basierend auf Tabelle Anhang B.2.; ^c Annahme basierend auf Osterburg & Techen (2012, S. 200ff.); P – Phosphor; SM – Silomais; WW – Winterweizen

Tabelle Anhang C.5 Betriebseigenschaften der ausgewählten typischen Ackerbaubetriebe

	Ackerbaubetriebe mit Zuckerrüben (Ack_ZR)	Ackerbaubetriebe mit Winterraps (Ack_WR)	Ackerbaubetriebe ohne Wirtschaftsdüngerimport (Ack_kW)
Betriebsgröße [ha] ^a	69,95	66,70	16,91
Besatzdichte [GVE ha ⁻¹] ^a	-	-	-
Repräsentation von Landfläche [%] ^a	1,38	2,90	3,80
Repräsentation von Betrieben [%] ^a	0,83	1,78	8,09
Repräsentation von Schweinebestand [%] ^a	0	0,02	0,01
Boden-Klima-Raum ^a	141	142	142
Fruchtfolge ^a	WW-WW-ZR	WW-WG-WR	WW-WG-WR
Ausbringungstechnik unter DüV 2017	-	-	-
Lagerkapazität Dünger unter DüV 2017 [Monate]	-	-	-
P Versorgung der Böden ^b	Ausgeglichener P Status	Ausgeglichener P Status	Ausgeglichener P Status
Wirtschaftsdüngerimport unter DüV 2017	20 m ³	15 m ³	-

^a FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Agrarstrukturerhebung 2016, Landwirtschaftszählung 2010, eigene Berechnung; ^b Annahme basierend auf Osterburg & Techen (2012, S. 200ff.); WW – Winterweizen; WG – Wintergerste; CCM – Corn-Cob-Mix/ Korn-Spindel-Gemisch; ZR – Zuckerrübe; WR – Winterraps; P – Phosphor; DüV – Düngeverordnung; GVE – Großvieheinheiten

Anhang D Berechnungen für den Ergebnisvergleich mit Menghi et al. (2015)

Menghi et al. (2015) berechnen die Anpassungskosten durch die Nitratrichtlinie in Kombination mit der Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der

Umweltverschmutzung. Um die ermittelten Kosten mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie zu vergleichen, müssen die in der folgenden Tabelle dargelegten Umrechnungen durchgeführt werden.

Betriebstyp	Kosten bei allen Richtlinien [€ (100 kg Schlachtgewicht) ⁻¹]	Relative Kostensenkung ohne Nitratrichtlinie [%]	Absolute Kosten im Zusammenhang mit der Nitratrichtlinie [€ (100 kg Schlachtgewicht) ⁻¹]	Absolute Kosten im Zusammenhang mit der Nitratrichtlinie [€ Schwein ⁻¹]
Dänemark (DK 614)	139,16 ^a	0,60 ^b	0,83 ^c	0,72 ^c
Deutschland (DE 187)	152,76 ^a	0,57 ^b	0,87 ^c	0,75 ^c
Niederlande (NL 369)	142,30 ^a	0,74 ^b	1,05 ^c	0,91 ^c
Polen (PL 50)	125,66 ^a	0 ^b	0 ^c	0 ^c

^a Werte von Menghi et al. (2015, S. 140, Tabelle 4.38); ^b Werte von Menghi et al. (2015, S. 144, Tabelle 4.41); ^c Eigene Berechnung. Annahme eines Schweineschlachtgewichts von 86,25 kg (KTBL 2016, S. 652); € – Euro

Anhang E Berechnungen für den Ergebnisvergleich mit Karl & Noleppa (2017)

Karl & Noleppa (2017) bestimmen die Kosten durch die Düngeverordnung 2017 auf aggregierter Ebene und rechnen sie auf zwei durchschnittliche Betriebe in Deutschland um. Für den Vergleich der Ergebnisse müssen, die in folgender Tabelle dargelegten Umrechnungen durchgeführt werden.

Betriebstyp	Betriebsgröße [ha]	Besatzdichte [GVE ha ⁻¹]	Anpassungskosten durch DüV 2017 [€ Betrieb ⁻¹]	Schweine [Anzahl Betrieb ⁻¹]	Anpassungskosten [€ Schwein ⁻¹]
Privates Unternehmen	75,70 ^a	1,80 ¹	2.486,00 ^b	851,15 ^c	2,92 ^d
Juristische Person	1.131,20 ^a	1,10 ^a	35.937,00 ^b	7.805,28 ^c	4,60 ^d

^a Werte von Karl & Noleppa (2017, S. 3); ^b Werte von Karl & Noleppa (2017, S. 31f.); ^c Eigene Berechnung. Da Karl & Noleppa (2017) durchschnittliche Betriebe bewerten, haben die Betriebe einen vielfältigen Tierbestand. Um einen Vergleich mit der vorliegenden Studie zu ermöglichen, wird davon ausgegangen, dass alle Tiere Schweine sind. Die Zahl ergibt sich aus der Division der Besatzdichte [GVE ha⁻¹] durch den Viehfaktor für Schweine von 0,16 GVE Schwein⁻¹ (BMEL 2017b, S. 41); ^d eigene Berechnungen; € – Euro; GVE – Großvieheinheiten

10. Konsequenzen für evtl. weitere Forschungsaktivitäten

Aus dem Forschungsprojekt sowie aktuellen politischen Entwicklungen lassen sich weitere mögliche Forschungsaktivitäten ableiten. So können die verwendeten Modelle auf die aktuell diskutierten Vorgaben der DüV 2020 angewendet werden und Erkenntnisse hinsichtlich der Kostenbelastung von landwirtschaftlichen Betrieben und der Emissionsreduktionen bereitstellen.

Der vorgestellte Modellierungsansatz ist grundsätzlich dafür geeignet, unterschiedliche Maßnahmen der Agrar- und Umweltpolitik zu analysieren. Hier könnten beispielsweise Agrarumweltprogramme oder auch innovative Ansätze wie eine Besteuerung von Emissionen untersucht werden. In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurden die Modelle in einem sogenannten ex-post Ansatz auf bereits bestehende Politiken angewendet. Sie sind jedoch auch für ex-ante Untersuchungen geeignet, um die Auswirkungen von möglichen Politiken vor ihrer Einführung zu untersuchen und so den Entscheidungsprozess wissenschaftsbasiert zu unterstützen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde basierend auf der Agrarstrukturerhebung eine Betriebstypologie für NRW entwickelt. Diese Typologie kann mit zukünftigen Agrarstatistiken mit wenig Aufwand aktualisiert werden. Dies würde Einblicke in die Entwicklung von Betriebsstrukturen im Zeitverlauf gewähren. Wie in der Diskussion dargelegt, sind komplexe landwirtschaftliche Strukturen in der entwickelten Typologie jedoch nicht zu erkennen. Durch den Einbezug von Expertenwissen könnte die Typologie dahingehend überprüft und ergänzt werden.

Im Forschungsprojekt wurden einzelbetriebliche Nährstoffvergleiche, die im Zuge von Kontrollen erhoben wurden, deskriptiv ausgewertet und die Unterschiede zu den Nährstoffsalden der modellierten Betriebe herausgestellt. Im Zuge der DüV 2017 wird die Anzahl an Nährstoffvergleichen, die von Kontrollbehörden erfasst werden, deutlich ansteigen. Ihre systematische Auswertung, beispielsweise durch Regressions- oder Clusteranalysen, kann Einblicke in die Treiber von Nährstoffüberschüssen gewähren und wichtige Informationen für einen zielgerichteten Vollzug und über den Erfolg der DüV liefern.

11. Liste der Veröffentlichungen und Präsentationen

Kuhn, T. 2017. The revision of the German Fertiliser Ordinance in 2017, Institute for Food and Resource Economics, Discussion Paper 2017:2, http://www.ilr.uni-bonn.de/agpo/publ/disap/download/disap17_02.pdf (zuletzt geprüft 27.03.19).

Kuhn, T.; Schäfer, D.; Holm-Müller, K.; Britz, W. 2017. Assessing the costs to comply with the revised German implementation of the EU Nitrates Directive: a Meta-modelling approach, Vortrag, 7th EAAE PhD Workshop, 9. November 2017, Castelldefels.

Kuhn, T.; Schäfer, D.; Britz, W. 2017. Assessing the costs to comply with the revised German implementation of the EU Nitrates Directive: a Meta-modelling approach, Posterpräsentation, 15th EAAE Congress, 29. August 2017, Parma.

Kuhn, T., Schäfer, D. 2018. A farm typology for North Rhine-Westphalia to assess agri-environmental policies, Institute for Food and Resource Economics, Discussion Paper 2018:1, http://www.ilr.uni-bonn.de/agpo/publ/disap/download/disap18_01.pdf (zuletzt geprüft 15.02.19).

Kuhn, T., Schäfer, D., Holm-Müller, K., Britz, W. 2019. On-farm compliance costs with the EU-Nitrates Directive - A modelling approach for specialized livestock production in northwest Germany. *Agricultural Systems* 173, 233–243.

Kuhn, T., Enders, A., Gaiser, T., Schäfer, D., Srivastava, A., Britz, W. Coupling crop and bio-economic farm modelling to evaluate the revised fertilization regulations in Germany, *Agricultural Systems*, unter Begutachtung (eingereicht 14.03.19)

12. Kurzfassung

Die Düngeverordnung (DüV) implementiert die EU-Nitratrichtlinie in Deutschland und ist die zentrale Regulierung, um den Verlust von reaktivem Stickstoff und Phosphor aus der Landwirtschaft zu verringern. Sie wurde im Juni 2017 novelliert, nachdem verschiedene Umweltziele nicht erreicht wurden. Die überarbeitete DüV beinhaltet deutlich strengere Maßnahmen, wie zum Beispiel eine stärker limitierte Nährstoffausbringung oder die verpflichtende Nutzung von emissionsarmer Technik zur Wirtschaftsdüngerausbringung. Das Ziel dieses Projektes ist die Analyse von ökonomischen und ökologischen Effekten der Novelle auf Betriebsebene in Nordrhein-Westfalen. Das Projekt ist Teil eines übergeordneten Clusterprojektes, das die DüV über die Skalen Feld, Betrieb und Region hinweg untersucht. In diesem Projektteil wird das bio-ökonomische Modell FarmDyn sowohl auf die gesamte Population von Schweinemast- und Milchviehbetrieben in Nordrhein-Westfalen als auch, in Kombination mit dem Pflanzenwachstumsmodell SIMPLACE, auf typische Betriebe angewendet. Die Betriebstypologie wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes basierend auf der Agrarstrukturerhebung entwickelt. Die betrieblichen Anpassungskosten an die DüV 2017 sind stark heterogen und reichen von 0 bis 2,66 Euro pro Schwein für Schweinemastbetriebe und von 0 bis 0,83 Cent pro kg Milch für Milchviehbetriebe. 47% der Schweinemast- und 38% der Milchviehbetriebe haben keinerlei Anpassungskosten. Schweinemastbetriebe mit hohem Tierbesatz sind hohen Kosten ausgesetzt, um den geringeren zulässigen Phosphatüberschuss unter der DüV 2017 einzuhalten. Für Milchviehbetriebe hingegen entstehen vor allem Kosten durch die verpflichtende Nutzung von emissionsarmer Ausbringungstechnik. Typische intensive Schweinemastbetriebe mit hohem Tierbesatz reduzieren ihre Nitrat- und Ammoniakverluste deutlich, insbesondere durch den Export von Wirtschaftsdünger, die Verschiebung der Wirtschaftsdüngerausbringung in das Frühjahr und die Nutzung von emissionsarmer Ausbringungstechnik. Extensivere Schweinemastbetriebe, die einen hohen Anteil des Schweinebestandes abbilden, verringern ihre Emissionen nur geringfügig. Gleiches gilt für typische Milchviehbetriebe. Typische Ackerbaubetriebe, die unter der DüV 2017 Wirtschaftsdünger importieren, sparen Kosten durch die Reduktion des Mineraldüngereinsatzes. Sie zeigen allerdings höhere Nitrat- und Ammoniakverluste, was die Gefahr von räumlichen Verlagerungseffekten aufgrund von Wirtschaftsdüngertransporten verdeutlicht. Der heterogene Effekt der DüV 2017 verdeutlicht die Notwendigkeit einer zielgerichteten Ausgestaltung von Vollzugsmechanismen und unterstützenden Maßnahmen für betroffene Betriebe. Darüber hinaus sollten Entscheidungsträger sensible Gebiete vor den negativen Auswirkungen von Wirtschaftsdüngerimporten schützen.

13. Executive Summary

The Fertilization Ordinance (FO), implementing the EU Nitrates Directive in Germany, is the core regulation to limit the loss of reactive nitrogen and phosphorus from agriculture. It was revised in June 2017 after environmental targets have been missed. The revised FO contains considerably tighter measures such as stricter nutrient application thresholds and the mandatory use of low-emission manure application techniques. The aim of this project is to assess the economic and environmental impact of the revision at farm-level, focusing on North Rhine-Westphalia. Thereby, the project is part of a three-part cluster project which assesses the FO across the scales field, farm and region. In this subproject, the bio-economic model FarmDyn is applied to the pig fattening and dairy farm population of North Rhine-Westphalia and, in combination with the crop modelling framework SIMPLACE, to dominant farm types selected from a generated typology. The latter is developed within this research project. On-farm compliance costs with the FO 2017 are highly heterogeneous and range from 0 to 2.66 Euro per pig for pig fattening farms and from 0 to 0.83 cent per kg milk for dairy farms. 47% of pig fattening and 38% of dairy farms do not face any costs. High compliance costs are found for pig fattening farms with high stocking densities, which need to fulfill the stricter phosphate surplus restrictions of the FO 2017. In contrast, dairy farms almost solely face costs for the compulsory use of low-emission manure application techniques. Intensive pig fattening farm types with a high stocking density reduce nitrate and ammonia losses considerably, which is mainly due to the export of excess manure, the shift of manure application from autumn to spring, and the use of low-emission manure application techniques. Less intensive pig fattening farm types, representing a high share of the pig stock, realize only little emission reduction. The same holds for typical dairy farms. Arable farm types, starting to import manure under the FO 2017, can save variable costs by replacing chemical fertilizer. As a consequence, nitrate and ammonia losses increase, which illustrates the danger of regional pollution swapping due to manure imports. The heterogeneous impact of the FO 2017 makes it necessary to precisely target enforcement mechanisms as well as supporting measures at the affected farms. Furthermore, policymakers need to protect sensitive areas from the negative effect of manure imports.