TEXTE
105/2024

Abschlussbericht

Maßnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen und assoziierte Kosten für den Nutztierhaltungssektor Deutschlands

Umsetzung der nationalen BVT in der Intensivtierhaltung unter Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen des IRPP BREF 2017

von:

Helmut Döhler, Helena Müller, Susanne Döhler
DöhlerAgrar, Untermerzbach

Uwe Häußermann

Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 105/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3717 53 258 0

FB001297

Abschlussbericht

Maßnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen und assoziierte Kosten für den Nutztierhaltungssektor Deutschlands

Umsetzung der nationalen BVT in der Intensivtierhaltung unter Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen des IRPP BREF 2017

von

Helmut Döhler, Helena Müller, Susanne Döhler
DöhlerAgrar, Untermerzbach

Uwe Häußermann
Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:
DöhlerAgrar
Schlossweg 7
96190 Untermerzbach

Abschlussdatum:
September 2022

Redaktion:
Fachgebiet II 4.3 Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme
Gabriele Borghardt

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Maßnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen und assoziierte Kosten für den Nutztierhaltungssektor Deutschlands

Mit diesem Vorhaben werden die Ammoniakemissionen, die Emissionsminderungsoptionen und die hierfür zu erwartenden Kosten für den deutschen Agrarsektor berechnet. Überprüft wird dabei, inwieweit die Vorgaben zur Emissionsminderung für Ammoniak der NEC-RL (Minderung der Emissionen um 29 % auf 444 kt im Jahr 2030) erreicht werden können und welche Kosten dabei entstehen. Weiterhin wird überprüft, ob in den deutschen Hotspotregionen der Tierhaltung die tolerierbaren Immissionen (Zielwert nach Heldstab et al. 2020) für Ammoniak erreichbar sind. Hierzu wurde ein Kalkulationsmodell entwickelt, mit dem auf regionaler Ebene (Kreis) sowohl die Agrarstrukturdaten, Emissionen, Minderungsoptionen und deren Kosten berechnet werden können. Das Modell ist auf andere weitere Stoffgruppen (z.B. Feinstaub, Methan) erweiterbar. Für die Ermittlung der Emissionsminderungspotenziale werden 5 Szenarien definiert, hinsichtlich ihrer Minderungswirkung analysiert und darauf aufbauend die Erfüllungskosten für die Einhaltung der NEC-Richtlinie und des nationalen Luftreinhalteprogramms ermittelt. Weiterhin erfolgt eine Analyse der Kosteneffizienz für die wichtigsten Tierkategorien und jeweiligen Verfahrensschritten Stall, Lager und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern.

Die Analyse der Szenarien auf nationaler Ebene zeigt, dass das Reduktionsziel der NEC-RL und des Nationalen Luftreinhalteprogramms für Ammoniak mit den geprüften NEC-Szenarien und darin enthaltenden Minderungstechniken knapp erreicht werden kann. Dabei sind die Szenarien NEC 1 und 4 vergleichsweise kostengünstig, welche überwiegend Minderungsmaßnahem bei der Ausbringung von festen und flüssigen Wirtschaftsdüngern und solche bei der Lagerung flüssiger Wirtschaftsdünger beinhalten. Mit der Einhaltung der Minderungsziele der NEC-RL sind bis zum Jahr 2030 Erfüllungskosten in Höhe von 1,33 Mrd. € zu erwarten. Im Jahr 2030 und folgenden Jahren ist mit Erfüllungskosten von 177 Mio. € zu rechnen. Die beste Kosteneffizienz lässt sich mit der Optimierung der Fütterung (ggfs. bis hin zu Kosteneinsparungen) erzielen. Die Maßnahmen bei der Wirtschaftsdüngerausbringung und die Abdeckung von Güllelagern liegen meist im Bereich von weniger als 2 € kg^{-1} NH_3. Stallintegrierte Maßnahmen führen zu sehr hohen Kosten von zum Teil über 10 € kg^{-1} NH_3.

Obwohl die Kalkulationen auf nationaler Ebene zeigen, dass der der Immissionszielwert nach Heldstab et al. (2020) auch ohne den Einsatz kostenaufwändiger, stallintegrierter Maßnahmen erreicht werden kann, wurden auch die Hotspotregionen der Nutztierhaltung vor dem Hintergrund des Schutzes der Ökosysteme und der Biodiversität analysiert. Vor allem in den nordwestdeutschen Regionen mit intensiver Tierhaltung Vechta-Cloppenburg und Münsterland können die schutzgutbezogenen Immissionsrichtwerte nicht erreicht werden. Auch bei der Berechnung von sogenannten Maximalszenarien, welche weitergehende Minderungsoptionen in Rinderställen beinhalten, werden diese Richtwerte am Beispiel Vechta-Cloppenburg noch um das Dreifache überschritten.

Da zukünftig von weitergehenden Minderungsforderungen seitens der EU und der UN ausgegangen werden kann, muss bei gleichbleibenden Viehbeständen mit massiv steigenden Kosten für den Sektor Landwirtschaft gerechnet werden, denn die kostengünstigen Maßnahmen zur Emissionsminderung sind mit den hier berechneten Szenarien weitgehend ausgeschöpft. Weitergehende Emissionsminderungsvereinbarungen werden den Druck auf die Nutztierhaltungshotspots weiter erhöhen. Auf längere Sicht ist diese Problematik nur mit der regionalen Entzerrung der Nutztierbestände in Regionen mit geringen Viehbesätzen zu erreichen. Dies wiederum wird nur mit einem nationalen Aktionsplan erreichbar sein, der ausgehend von einem Tierwohlkonzept, die Re-Etablierung vor- und nachgelagerter Sektoren (Futtermittel-, Schlachtbetriebe) einschließlich eines Spezialberatungskonzeptes beinhaltet.

Abstract: Ammonia mitigation options and associated costs for the livestock sector in Germany

Within the framework of this project, the ammonia emissions, the emission mitigation options and the anticipated costs for the German agricultural sector are calculated. The project assesses, whether the emission mitigation targets for ammonia of the NEC Directive (reduction of emissions by 29 % to 444 kt in 2030) can be achieved and which costs are incurred. Furthermore, it is examined whether the tolerable immission concentrations (benchmark values according to Heldstab et al. 2020) for ammonia can be achieved in the German livestock hotspot regions. For this purpose, a calculation model was developed which enables the quantification both the agricultural structure data, emissions, reduction options and their costs at a (district) regional level.

The model is extensible to other pollutant groups (e.g. particulate matter, methane). In order to determine the emission reduction potentials, 5 scenarios are defined, analysed with regard to their reduction effect and, based on this, the compliance costs for meeting the NEC Directive targets and the National Air Pollution Control Programme are determined. Furthermore, an analysis of the cost efficiency for the most relevant livestock categories and the respective process steps (livestock house, feeding, storage and spreading of manure) is undertaken.

The analysis of scenarios at the national level shows that the reduction target of the NEC Directive and the National Air Pollution Control Programme for ammonia can just be achieved with the examined NEC scenarios and the mitigation technologies included therein. The scenarios NEC 1 and 4 are comparatively cost-effective, which mainly involve reduction measures in the application of solid and liquid manure and ~~in~~ the storage of liquid manure. By meeting the NEC Directive mitigation targets, total compliance costs of € 1.33 billion can be expected by 2030. In 2030 and following years, yearly compliance costs of € 177 million can be expected. The most cost-effective measures are optimised feeding (eventually saving costs), measures for manure spreading and covering of slurry stores are mostly in the range of less than 2 € kg^{-1} NH_3. Stable-integrated measures lead to very high costs, partially more than 10 € kg^{-1} NH_3.

Although the calculations at national level indicate the immission concentration benchmark according to Heldstab et al. (2020) can be achieved, even without the implementation of cost-intensive, housing-integrated measures, the livestock hotspot regions were as well analysed with regard to the protection of ecosystems and biodiversity. Especially in the north-western German regions with intensive livestock farming Vechta-Cloppenburg and Münsterland, the immission benchmarks for natural ressources cannot be achieved. Even by calculating so-called maximum scenarios, which include further mitigation options in cattle houses, these benchmarks are still exceeded by a factor of three in the Vechta-Cloppenburg case.

Since more stringent mitigation targets by the EU and the UN can be anticipated in the future, massive increases in costs for the agricultural sector are to be expected if livestock numbers remain unchanged, since the cost-effective measures for reducing emissions have largely been exhausted with the scenarios calculated here. More far-reaching emission control agreements will further increase the pressure on Germany´s livestock hotspots. In the longer term, this issue can only be tackled with the regional equalisation of livestock numbers into regions with low livestock density. This, in turn, will only be achievable with a national action plan that, based on an animal welfare concept, comprises the re-establishment of upstream and downstream sectors (feed, slaughterhouses) including a specialised advisory strategy.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ... 10
Tabellenverzeichnis ... 12
Abkürzungsverzeichnis ... 15
Verzeichnis verwendeter Formeln und Einheiten ... 16
Zusammenfassung ... 17
Summary ... 24
1 Einleitung und Zielsetzung ... 30
1.1 Bedeutung des Stickstoffs als Düngemittel und potenzielle Umwelteffekte ... 30
1.2 Rechtliche Regelungen zur Minderung von Emissionen ... 30
1.3 Erfüllungskosten ... 32
1.4 Kosten der Emissionsminderung ... 32
1.5 Vorarbeiten ... 33
1.5.1 Ermittlung der Wirkung von Emissionsminderungsstrategien und der damit verbundenen Kosten ... 33
1.5.2 Hotspotregionen der Tierhaltung in Deutschland ... 35
1.6 Ziele des Vorhabens ... 38
2 Methodik ... 40
2.1 Übersicht ... 40
2.2 Landwirtschaftliche Struktur- und Aktivitätsdaten ... 41
2.2.1 Ableitung größenklassenverteilter Strukturdaten ... 41
2.2.2 Ableitung der größenklassenverteilten Häufigkeit der nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftigen Betriebe ... 45
2.3 Emissionen und Emissionsminderungseffekte der Maßnahmen und Szenarien ... 47
2.3.1 Ist-Situation der Ammoniakemissionen ... 47
2.3.2 Verknüpfung der Minderungseffekte mit den Agrarstrukturdaten ... 47
2.3.3 Berechnung der regionalen Immissionskonzentration und Bewertung der Immissionen in den Hotspotregionen ... 48
2.4 Ermittlung der spezifischen Emissionsminderungskosten ... 49
2.4.1 Ausbringung von Wirtschaftsdüngern ... 49
2.4.2 Lagerung von Wirtschaftsdüngern ... 51
2.4.2.1 Güllelagerung ... 51
2.4.2.2 Gärrestlagerung ... 52
2.4.3 Haltung von Nutztieren ... 53

2.4.3.1 Stall ... 53
2.4.3.2 Abluftreinigung ... 57
2.4.3.3 Berechnung der spezifischen Emissionsminderungskosten der Stalltechniken ... 58
2.4.3.4 Weitere Annahmen für spezifische Emissionsminderungstechniken für stallintegrierte Minderungsmaßnahmen in Schweineställen ... 60
2.4.4 Anpassung des Mineraldüngermanagements zur Minderung von Ammoniakemissionen ... 60
2.4.4.1 Ersatz von Harnstoff und AHL durch KAS ... 60
2.4.4.2 Senkung der Mineraldüngerzufuhr ... 60
2.5 Berechnung der Minderungskosten ... 61
2.6 Mögliche Unsicherheiten, Unschärfen und Grenzen der Berechnungsmethodik ... 63
3 Ergebnisse ... 64
3.1 Landwirtschaftliche Struktur- und Aktivitätsdaten ... 64
3.1.1 Größenklassenverteilte Strukturdaten ... 64
3.1.2 Größenklassenverteilte Anteile der nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftigen Betriebe ... 65
3.2 Kosten der Emissionsminderung ... 67
3.2.1 Ausbringung von Wirtschaftsdüngern ... 67
3.2.2 Stallhaltung und Wirtschaftsdüngerlagerung ... 70
3.2.2.1 Milchvieh ... 70
3.2.2.2 Mastbullen ... 73
3.2.2.3 Mastschweine ... 76
3.2.2.4 Zuchtsauen ... 79
3.2.2.5 Legehennen ... 81
3.2.3 Größenklassenabhängige Minderungskosten ... 82
3.2.3.1 Wirtschaftsdüngerlagerung ... 82
3.2.3.2 Stallhaltung ... 86
3.2.4 Kosten der Maßnahmen bei Umsetzung in der deutschen Landwirtschaft ... 86
3.3 Minderungsszenarien und deren Minderungswirkung ... 88
3.3.1 Minderungsszenarien auf nationaler Ebene ... 88
3.3.1.1 NEC-Compliance-Szenarien 1 – 4 ... 88
3.3.1.2 „TA Luft 50“-Szenario ... 98
3.3.2 Minderungsszenarien auf regionaler Ebene in den Hotspots der Nutztierhaltung ... 100
3.3.2.1 Emissionsminderung der Szenarien in den Hotspots ... 100

3.3.2.2 Auswirkung der Minderungsszenarien auf die schutzgutbezogenen Immissionswerte ... 102
3.3.2.3 Absolute und spezifische Minderungskosten der NEC-Szenarien in den Hotspots ... 104
3.3.2.4 Absolute und spezifische Minderungskosten „TA Luft 50“-Szenario in den Hotspot-Regionen ... 104
3.3.2.5 Prüfung weitergehender Minderungsoptionen und Szenarien am Beispiel der Hotspotregion Niedersachsen ... 105
4 Einhaltung der Emissionshöchstgrenzen der NEC-RL und assoziierte Erfüllungskosten ... 108
5 Zusammenfassung und Ausblick ... 110
6 Literaturverzeichnis ... 112
A Anhang ... 116
A.1 Haltung von Nutztieren ... 116
A.2 Anzahl der Betriebe und Herdengrößen in den Hotspotregionen ... 119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Methodik zur Berechnung der Kosten 41
Abbildung 2: Beispiel für die über Regressionsanalysen ermittelte, kumulierte Anzahl der rinderhaltenden Betriebe in Bayern in Abhängigkeit von der Herdengröße 43
Abbildung 3: Beispiel für die über Regressionsanalysen ermittelte, kumulierte Anzahl der Rinder in Bayern in Abhängigkeit von der Herdengröße 43
Abbildung 4: Häufigkeit der Haltungsverfahren für Milchvieh in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Herdengröße in Deutschland 44
Abbildung 5: Spezifischer Investitionsbedarf 2018 für Güllebehälter und deren Abdeckung mittels Zeltdach, Betondecke und Schwimmfolie in Abhängigkeit von der Behältergröße 52
Abbildung 6: Spezifischer Investitionsbedarf von Stallgebäuden mit und ohne NH_3-Minderungstechniken in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl am Beispiel von Mastschweineställen 56
Abbildung 7: Veränderung der Einzelkosten durch Abluftreinigung am Beispiel von Mastschweineställen in Abhängigkeit von der Stallkapazität 56
Abbildung 8: Spezifische NH_3-Minderungskosten für Verfahren der Ausbringung für Schweinegülle in Abhängigkeit von der Jahresleistung 69
Abbildung 9: Spezifischer Investitionsbedarf für Milchviehställe[1] inklusive Güllebehälter mit NH_3-Minderungstechniken in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl[2] 71
Abbildung 10: Änderung der Einzelkosten für Milchviehställe[1] inklusive Güllebehälter mit NH_3-Minderungstechniken gegenüber der Referenz ohne Minderungstechnik in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 72
Abbildung 11: Emissionsminderungskosten für NH_3-Minderungstechniken in Milchviehställen[1] inklusive Güllebehälter in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 73
Abbildung 12: Spezifischer Investitionsbedarf für Mastbullenställe[1] inklusive Güllebehälter mit NH_3-Minderungstechniken in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 74
Abbildung 13: Emissionsminderungskosten für NH_3-Minderungstechniken in Mastbullenställen[1] inklusive Güllebehälter in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 75
Abbildung 14: Spezifischer Investitionsbedarf von Stallgebäuden mit und ohne NH_3-Minderungstechniken in Mastschweineställen inklusive Güllelager mit Vollspaltenboden in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 76
Abbildung 15: Änderung der Einzelkosten durch Implementierung verschiedener Minderungstechniken in Mastschweineställen mit Vollspaltenboden und Güllelager in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 77
Abbildung 16: Emissionsminderungskosten für verschiedene Minderungstechniken in Mastschweineställen mit Vollspaltenboden in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 78
Abbildung 17: Spezifischer Investitionsbedarf von Stallgebäuden mit und ohne NH_3-Minderungstechniken in Zuchtsauenställen mit Vollspaltenboden in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 79

Abbildung 18: Emissionsminderungskosten für der Implementierung verschiedener Minderungstechniken in Zuchtsauenställen mit Vollspaltenboden in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 80
Abbildung 19: Spezifischer Investitionsbedarf von Stallgebäuden mit und ohne NH_3-Minderungstechniken in Legehennenställen in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 81
Abbildung 20: Änderung der Einzelkosten und Emissionsminderungskosten, sich ergebend aus der Installation einer Abluftreinigungsanlage in Legehennenställen (Volierenhaltung) in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl 82
Abbildung 21: Nationale Ammoniakemissionen des Referenzjahrs 2005, der Thünen-Baseline und der Szenarien NEC 1 bis 4 und TA Luft 50, untergliedert nach Quellkategorien: Die rote Linie zeigt den Zielwert der neuen NEC-Richtlinie (EU-RL 2016/2284) für das Jahr 2030 an. 90
Abbildung 22: NH_3-Emissionen des Jahres 2005[1] und der Baseline-Projektion Bl2030 91
Abbildung 23: NH_3-Emissionen in Bl2030 und den NEC-Szenarien 1 – 3[1] differenziert nach Kategorie und Verfahrensabschnitt (Stall – Lager – Ausbringung, Mineraldünger – Weide) 95
Abbildung 24: Verteilung der NH_3-Minderungswirkung (links) und der Minderungskosten (rechts) der NEC-Szenarien 1 – 3[1] differenziert nach Kategorie und Verfahrensabschnitt (Stall - Lager - Ausbringung - Mineraldünger) 96
Abbildung 25: Spezifische Minderungskosten der NEC-Szenarien 1 – 3[1] differenziert nach Kategorie und Verfahrensabschnitt (Lager – Ausbringung) 97
Abbildung 26: NH_3-Emissionen im Bl2030- und dem „TA Luft 50“-Szenario differenziert nach Kategorien und Verfahrensabschnitt (Stall – Lager – Ausbringung – Weide) 99
Abbildung 27: Kumulierte Anzahl der Milchkühe in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) . 119
Abbildung 28: Kumulierte Anzahl der milchviehhaltenden Betriebe in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) 119
Abbildung 29: Kumulierte Anzahl der übrigen Rinder[1] in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) . 120
Abbildung 30: Kumulierte Anzahl der Mastschweine in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) . 120
Abbildung 31: Kumulierte Anzahl der mastschweinehaltenden Betriebe in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) 121
Abbildung 32: Kumulierte Anzahl der Zuchtsauen in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) . 121
Abbildung 33: Kumulierte Anzahl der zuchtsauenhaltenden Betriebe in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) 122
Abbildung 34: Kumulierte Anzahl der Legehennen in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) . 122

Abbildung 35: Kumulierte Anzahl der legehennenhaltenden Betriebe in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert) 123
Abbildung 36: Durchschnittliche Tierbesatzdichte, Gülle- und Festmistanfallmengen auf Kreisebene in den Jahren 2015/17; 2016 resp. 2016/18 (eigene Darstellung ausgewählter Ergebnisse der Strukturdatenanalyse) 124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßnahmen für die NEC-Compliance-Szenarien und deren Kurzbeschreibung ... 34
Tabelle 2: Übersicht der Maßnahmenkombinationen der NEC-Compliance-Szenarien..... 35
Tabelle 3: Landwirtschaftliche Struktur der fünf Hotspotregionen der Tierhaltung im Vergleich zu Deutschland insgesamt im Mittel der Jahre 2016 bis 2018..... 37
Tabelle 4: Übersicht der (Emittenten) Kategorien und deren Einteilung in Größenklassen abhängig von der Tierplatzkapazität in Stück bzw. Leistung in kW[1] 42
Tabelle 5: Tierplatz-Schwellwerte für die unter die 4. BImSchV[1] fallenden Anlagen zur Haltung von Mastschweinen, Zuchtsauen und Legehennen 45
Tabelle 6: Relative NH_3-Emissionsminderung von Ausbringtechniken für Gülle..... 50
Tabelle 7: Feste und variable Kosten für die Ausbringung von Gülle mittels Schleppschlauch abhängig von der Verfahrensleistung 51
Tabelle 8: Kosten für die Ausbringung von Gülle (2019) abhängig von der Verfahrensleistung 51
Tabelle 9: Investitionen (2018) für die Abdeckung von Güllelagerbehältern mittels Betondecke in Abhängigkeit vom Lagervolumen..... 52
Tabelle 10: Investitionen für die Abdeckung von Gärrestbehältern (Bezugsjahr 2018) mittels Betondecke..... 53
Tabelle 11: Annahmen für Arbeitszeitbedarf, Betriebsmittelbedarf und Futterkosten der Referenzstallmodelle..... 54
Tabelle 12: Kennzahlen für Mastschweine und Zuchtsauen..... 54
Tabelle 13: Kennzahlen für Milchvieh und Mastbullen 55
Tabelle 14: Kennzahlen für Legehennen und Broiler..... 55
Tabelle 15: Ausgewählte Ergebnisse der LKR für den Referenzstall ohne Minderungstechnik (1.500 TP) und einen Stall mit Abluftreinigungsanlage (ALR) als NH_3-Minderungsmaßnahme..... 55
Tabelle 16: Kennzahlen für die Kostenberechnung einer stark N- und P-reduzierten Fütterung von Mastschweinen..... 57
Tabelle 17: Kennzahlen für die Kostenberechnung für den Betrieb von Abluftreinigungsanlagen (ALR) zur Minderung von Ammoniakemissionen in Legehennenställen (Voliere)..... 57
Tabelle 18: Kennzahlen für die Kostenberechnung für den Betrieb von Abluftreinigungsanlagen (ALR) zur Minderung von Ammoniakemissionen in Mastschweineställen..... 58

Tabelle 19: Emissionsminderungsmaßnahmen, deren Umsetzungshäufigkeit und Minderungswirkungen zur Herleitung der spezifischen Minderungskosten in den Tierkategorien 59
Tabelle 20: Beispielhafte Berechnung der Emissionsminderungskosten für den Betrieb von Abluftreinigungstechnik in Mastschweineställen 60
Tabelle 21: Exemplarische Darstellung der Minderungskosten auf nationaler Ebene für die Maßnahme 4a bei Milchvieh im Verfahrensschritt „Lager“ für güllebasierte Anbindeställe 62
Tabelle 22: Exemplarische Darstellung der Minderungskosten auf nationaler Ebene für die Maßnahme 4a bei Milchvieh für die Verfahrensschritte Stall-Lager-Ausbringung-Weide 62
Tabelle 23: Anzahl der Haltungen und Gesamtanzahl der Tiere innerhalb der Größenklassen in Deutschland für das Jahr 2016 65
Tabelle 24: Modellierte Anzahl der Tiere in von der 4. BImSchV betroffenen Betrieben auf Bundesebene nach Tierkategorie 65
Tabelle 25: „Grenz-Herdengrößen“ der von der 4. BImSchV betroffenen Betriebe auf Bundesebene nach Tierkategorie 66
Tabelle 26: Relative Anteile der von der 4. BImSchV betroffenen Betriebe innerhalb der Größenklassen auf Bundesebene nach Tierkategorie und deren Zuordnung zu den Minderungsmaßnahmen des Maßnahmenkatalogs 66
Tabelle 27: Spezifische NH_3-Emissionsminderungskosten bei der Ausbringung von Rindergülle (Referenz Breitverteiler)* 68
Tabelle 28: Spezifische NH_3-Emissionsminderungskosten bei der Ausbringung von Schweinegülle (Referenz Breitverteiler)* 68
Tabelle 29: NH_3-Minderungskosten für die Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern und Festmist für Tierhaltung und Biogasanlagen 70
Tabelle 30: Spezifische Minderungskosten für Minderungsmaßnahmen bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern 85
Tabelle 31: Spezifische Minderungskosten der Minderungsmaßnahmen für stallintegrierte Techniken und Maßnahmen 86
Tabelle 32: Kosten der Maßnahmen bei Umsetzung in der deutschen Landwirtschaft 87
Tabelle 33: Nationale NH_3-Emissionen nach Umsetzung der Szenarien gegenüber Bl2030, sowie absolute und spezifische Minderungskosten 89
Tabelle 34: Spezifische Minderungskosten[1] des Szenarios „TA Luft 50“ nach Tierkategorien und Verfahrensschritt 100
Tabelle 35: Gesamtemission, Emissionsminderung ggü. Bl 2030, absolute und spezifische Minderungskosten der Szenarien in den untersuchten Hotspotregionen 101
Tabelle 36: Flächenbezogene Emissionen und Emissionsminderung gegenüber Bl2030 der Szenarien sowie die sich daraus ergebenden Immissionswerte 103
Tabelle 37: Spezifische Minderungskosten der Maßnahmen 1b, 2b, 3c, 3d, 4a und 4b in den südlichen und nordwestlichen Hotspotregionen 104
Tabelle 38: Maximal-Szenarien zur weitergehenden Emissionsminderung 105

Tabelle 39: Gesamtemission, relative Abweichung gegenüber Bl2030 absolute und spezifische Minderungskosten der weiterführenden Szenarien MAX 1 – 3 in der Region Vechta-Cloppenburg..... 106
Tabelle 40: Berechnung der Erfüllungskosten der NEC RL (NEC 1 – Szenario) ohne Berücksichtigung von Inflationseffekten und Anstieg von Einkaufspreisen 109
Tabelle 41: Berechnete Stallmodelle und Minderungstechniken in Geflügelställen..... 116
Tabelle 42: Berechnete Stallmodelle und Minderungstechniken in Rinderställen..... 116
Tabelle 43: Berechnete Stallmodelle und Minderungstechniken in Schweineställen..... 117
Tabelle 44: Annahmen zur Ableitung der nationalen Aktivität und des Umsetzungsgrades der Stalltechniken (MV = Milchvieh; MB = Mastbullen; ZS = Zuchtsauen; MS = Mastschweine; LH = Legehennen)..... 118

Abkürzungsverzeichnis

AHL	Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung
ASE	Agrarstrukturerhebung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz (Erklärung)
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung (Erklärung)
BI2030	Baseline 2030
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BVT	Bestverfügbare Technik
DG	Durchgang
EMMa-L	Emissions-Minderungsmaßnahmen Landwirtschaft
EU	Europäische Union
EU-RL	Richtlinie der Europäischen Union
FKZ	Forschungskennzahl
FM	Frischmasse
FuE	Forschung und Entwicklung
GVE	Großvieheinheit
IE-RL	Industrieemissionsrichtlinie
IEF	Zusammengefasster Emissionsfaktor (engl.: implied emission factor)
KAS	Kalkammonsalpeter
LKR	Leistungskostenrechnung
LZ	Landwirtschaftszählung
NEC	Europäische Richtlinie über Emissionshöchstmengen 2001/81/EG (engl.: National Emission Ceilings)
NLRP	Nationales Luftreinhalteprogramm
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
StraNuP	Strategien zur N- und P-Minderung in Regionen mit Intensivtierhaltung (UBA Umweltforschungsplan-Vorhaben FKZ 3717 53 258 0)
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TAN	Gesamt-Ammoniumstickstoff (engl.: total ammonia nitrogen)
TI	Thünen-Institut (Johann Heinrich von Thünen-Institut – Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig)
UBA	Umweltbundesamt
UN	Vereinte Nationen (engl.: United Nations)
WAM	Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (engl.: with additional measures)
WM	Mit-Maßnahmen-Szenario (engl.: with measures)

Verzeichnis verwendeter Formeln und Einheiten

%	Prozent
€	Euro
µg	Mikrogramm
a	Jahr
Gg	Gigagramm
kg	Kilogramm
kt	Kilotonne
kW	Kilowatt (elektrische Leistung)
m^3	Kubikmeter
N	Stickstoff
NH_3	Ammoniak
NH_3-N	Ammoniak-Stickstoff
NO_x	Stickoxide
P	Phosphor
t	Tonne

Zusammenfassung

Einleitung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund bestehender Minderungsverpflichtungen Deutschlands im Umweltrecht wurde ein Kalkulationsansatz zur ökonomischen und ökologischen Bewertung von Minderungsmaßnahmen von Ammoniakemissionen entwickelt. Die wichtigsten Regelungen sind die neue NEC-Richtlinie (2016/2284/EU) zur Minderung von Luftschadstoffen bis zum Jahr 2030 und die IE-Richtlinie (2010/75/EU) für Industrieanlagen. In beiden Richtlinien kommt der Ammoniakminderung in der Landwirtschaft eine besondere Bedeutung zu. Die emissionsbegrenzenden Regelungen der NEC-Richtlinie werden mit dem ersten nationalen Luftreinhalteprogramm (NLRP) (BMU, 2018) und in Teilen über die Düngeverordnung (DüV 20217/2020) in deutsches Recht umgesetzt, dementsprechend sind die Ammoniakemissionen mit den im NLRP genannten Minderungsoptionen bis zum Zieljahr 2030 um 29 % gegenüber dem Referenzjahr 2005 zu reduzieren. Mit der Umsetzung von Minderungsmaßnahmen des NLRP muss bereits mit dessen Inkrafttreten begonnen werden.

Im Rahmen des Vorhabens soll daher überprüft werden, inwieweit die Vorgaben zur Emissionsminderung für Ammoniak der NEC-RL (Minderung der Emissionen um 29 % auf 444 kt NH_3 im Jahr 2030) erreicht werden können und welche Kosten dabei entstehen. Weiterhin wird überprüft, ob in den deutschen Hotspotregionen der Tierhaltung die tolerierbaren Immissionen (Zielwert nach Heldstab et al. 2020) für Ammoniak erreichbar sind. Hierzu wurde ein Kalkulationsmodell entwickelt, mit dem auf regionaler Ebene (Kreise) sowohl die Agrarstrukturdaten, Emissionen, Minderungsoptionen und deren Kosten berechnet werden können. Das Modell ist auf andere weitere Stoffgruppen (z.B. Feinstaub, Methan) erweiterbar. Für die Ermittlung der Emissionsminderungspotenziale werden fünf Szenarien definiert, hinsichtlich ihrer Minderungswirkung analysiert und darauf aufbauend die Erfüllungskosten für die Einhaltung der NEC-Richtlinie und des nationalen Luftreinhalteprogramms ermittelt. Weiterhin erfolgt eine Analyse der Kosteneffizienz für die wichtigsten Tierkategorien und jeweiligen Verfahrensschritte Stall, Lager und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern.

Der im Rahmen des Vorhabens entwickelte Ansatz ermöglicht eine zeitlich und räumlich aufgelöste Bewertung von Minderungsmaßnahmen und aus Maßnahmenbündeln bestehenden Politikszenarien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die ökonomischen Erfolgsgrößen von Produkt- und Einzelbetriebsebene, differenziert nach Tierkategorien. Des Weiteren ist eine räumlich und zeitlich differenzierte Quantifizierung der Emissionsminderung und der daraus folgenden, regionalen Immissionskonzentration, sowie die Bestimmung der Erfüllungskosten von Maßnahmen und Maßnahmenbündeln (Szenarien) möglich. Im Ergebnis können Maßnahmen nicht nur zeitlich und räumlich aufgelöst, sondern auch nach Betriebsgrößen, Tierkategorien und nach Verfahren priorisiert werden.

Methoden

Verfahrensmodelle zur Ermittlung von Investitionen, Kosten, Minderungskosten und Herleitung weiterer ökonomischer Kenngrößen

Im Rahmen der methodischen Arbeiten wurden aktuelle und konsistente Kostenmodelle für Stallgebäude für die wichtigsten Tierkategorien mit jeweils verschiedener Stallplatzzahl generiert. Aufbauend auf einem skalierungsfähigen Stallmodell für Mastschweine (Döhler, 2021) wurde dieses für Sauen, Rinder (Milchkühe, Mastbullen, übrige Rinder) weiterentwickelt. Als Datengrundlage für die Stallmodelle dient das BMEL/KTBL-Datensystem „BauKost“, das jedoch in weiten Teilen nicht mehr aktuell ist (Sachstand 2017). Die Erhebungen zu Bauinvestitionen und -kosten in “BauKost” reichen in das Jahr 2000 zurück, die jüngsten Erhebungen für die hier

genutzten Datensätze aus “BauKost” datieren auf 2014. Eine Auswertung der insgesamt 250 Datensätze zeigt, dass diese sowohl in der Struktur als auch im Zeitstand nicht konsistent sind. Deshalb wurden umfangreiche und weiterführende Recherchen zur Verifizierung, Erweiterung und Präzisierung dieser Daten durchgeführt, die auch Datensätze der ALB Hessen (2019), der LfL Bayern (Hofmann, 2022) und eigenen Erhebungen beinhalten. Kosten und Preise, die in den Grundlagendaten auf unterschiedliche Jahre datieren, wurden mittels Preisindizes auf das Preisjahr 2018 vereinheitlicht. Kostenmodelle für Stallgebäude wurden bisher nur für konventionelle Tierhaltungssysteme erstellt.

Die erstellten Kostenmodelle umfassen Referenzverfahren für die verschiedenen Tierkategorien von Rindern, Schweinen und Geflügel mit mittleren bis hohen Tierplatzzahlen oberhalb und unterhalb der Genehmigungsschwellen in der 4. BImSchV. Die Struktur der Kostenmodelle und Kennzahlen ist nach Vorgaben der DIN 276 (“Ermittlung und Gliederung von Kosten im Bauwesen”) aufgebaut, die Kalkulation der Kosten erfolgt in Anlehnung an die DIN 18960 (“Nutzungskostenplanung und insbesondere für die Ermittlung und die Gliederung von Nutzungskosten im Hochbau”). Aus den Referenzmodellen wurden Kostenmodelle mit NH_3-Minderungstechniken erstellt, woraus Mehrkosten der NH_3-Minderungstechniken bestimmt werden können. In die Stallmodelle wurden die baulich-technischen Vorrichtungen für die Lagerung von Wirtschaftsdüngern integriert, methodisch analog zu dem von Döhler et al. (2011) beschriebenem Vorgehen. Die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern wird unabhängig von den Stallgebäuden berechnet, hier wird ebenfalls analog zu Döhler et al. (2011) operiert. Im Vorhaben werden nicht nur Minderungsoptionen für die Tierhaltung, sondern auch solche für die mineralische N-Düngung berücksichtigt, letztere werden als kostenneutral angenommen. Die ermittelten Kosten der Emissionsminderung gelten somit sowohl für die Nutztierhaltung als auch für den Pflanzenbau.

Ammoniak-Emissionsmodell

Auf Grundlage des nationalen Inventarberichts (Haenel et al. 2018) und der Minderungspotenzialstudie auf national aggregierter Ebene von Häußermann et al. (2020) werden regional aufgelöste Berechnungsinstrumente entwickelt, die eine detaillierte Darstellung der Stickstoffflüsse entlang der Prozesskette landwirtschaftlicher Verfahren und den dabei auftretenden Ammoniakemissionen in den einzelnen Abschnitten der Prozesskette der Nutztierhaltung (Stall, Fütterung, Lagerung/Ausbringung WSD sowie Weide) ermöglichen. Mit diesem Instrument wurde die Minderungswirkung der Maßnahmen und Szenarien in Bezug auf die NH_3-Emissionen für 2030 als Projektion berechnet und ihr Beitrag zur Emissionsminderung gegenüber dem Referenzjahr 2005 bewertet. Die Auswahl der Maßnahmen erfolgte auf Grundlage der Verfahrensbeschreibung in der einschlägigen Literatur, die sich mit der Minderung von Ammoniakemissionen befasst.

Im Berechnungsmodell werden zum jetzigen Entwicklungsstand nur Minderungsoptionen für die Tierkategorien Milchvieh, Mastbullen, übrige Rinder, Mastschweine, Zuchtsauen und Legehennen abgebildet, für die übrigen Tierkategorien werden also keine Minderungsoptionen kalkuliert. Demnach werden die Minderungspotenziale für die Ammoniakemissionen auf regionaler und nationaler Ebene etwas unterschätzt. Der ökologische Landbau wird wie bei Häußermann et al. (2020) methodisch nicht getrennt betrachtet.

Durch ein Verschneiden mit Ergebnissen aus Emissionsmodellen (Häußermann et al. 2020) können die spezifischen NH_3-Emissionsminderungskosten berechnet werden. Aus den diskreten Ergebnissen der Stallgebäudemodelle werden Funktionen für Investitions- und NH_3-Minderungskosten abgeleitet, auf deren Grundlage und unter Einbeziehung der Agrarstruktur

sowohl regionale als auch nationale Minderungs- und Erfüllungskosten für NH_3-Minderungsmaßnahmen berechnet werden.

Agrarstrukturmodell

Für die Berechnung der kostenoptimierten Techniken und Verfahren zur Nährstoffaufbereitung und NH_3-Emissionsminderung in der Tierhaltung und Biogaserzeugung ist eine detaillierte Kenntnis über die Verteilung über Größenklassen und räumliche Verteilung von Haltungsverfahren, Tierbeständen, Anzahl Haltungen etc. erforderlich. Vom Statistischen Bundesamt werden regelmäßig Strukturdaten zur Tierhaltung aus Ergebnissen der Agrarstrukturerhebungen (ASE)/Landwirtschaftszählungen (LZ) sowohl nach landwirtschaftlich genutzter Fläche als auch nach Tierbeständen der Betriebe bzw. Herden klassiert veröffentlicht (Statistisches Bundesamt, 2011; Statistisches Bundesamt, 2017). Hieraus können Regressionsfunktionen abgeleitet werden, die die Beziehung zwischen Herdengröße und den benötigten Strukturdaten beschreiben, auch weit über die vom Statistischen Bundesamt erhobenen Einzeldaten hinaus. Diese, aus Daten für die Bundesländer abgeleiteten, Regressionsfunktionen und die auf Kreisebene bekannten Tierbestände werden genutzt, um Strukturdaten auf Kreisebene zu berechnen. Hierbei wird mangels weiterer Informationen davon ausgegangen, dass die für die Bundesländer abgeleiteten Regressionsfunktionen näherungsweise auch die relativen herdengrößenabhängigen Verhältnisse der Strukturen in den Kreisen der jeweiligen Bundesländer beschreiben. Die absoluten Werte der größenklassenverteilten Strukturdaten (wie bspw. Anzahl Tiere getrennt nach Haltungssystemen) können aus den auf Kreisebene bekannten Tierbeständen in Relation zu den Tierbeständen im jeweiligen Bundesland abgeleitet werden. Diesen Strukturdaten wurden NH_3-Emissionen sowohl vor als auch nach Umsetzung von Minderungsmaßnahmen zugeordnet.

NEC-Szenarien zur Emissionsminderung

Mit den Kalkulationsmodellen können erstmals Emissionen und Emissionsminderungen sowohl auf nationaler als auch auf Kreisebene berechnet werden. Im Rahmen des Vorhabens „Berechnung der Minderungspotenziale von Maßnahmen im Bereich Landwirtschaft zur Reduktion der nationalen Ammoniakemissionen und Entwicklung von Szenarien zur Einhaltung der Reduktionsverpflichtungen der neuen NEC-Richtlinie (EU) 2284/2016“ (Häußermann et al. 2020) wurde mit Emissionsberechnungen auf nationaler Ebene gezeigt, dass die Ammoniakreduktionsverpflichtungen der NEC-Richtlinie grundsätzlich mit technischen Verfahren gemäß europäischem Stand der Technik eingehalten werden können. Für die Jahre nach 2020 werden zusätzliche Maßnahmen über die gegenwärtige Politik hinaus erforderlich.

Die in diesem Vorhaben berechneten Szenarien (NEC 1, NEC 2, NEC 4) mit mehreren alternativen Maßnahmenkombinationen werden auch im hier durchgeführten Vorhaben eingesetzt, jedoch auf Kreisebene mit anschließender Aggregierung auf nationale Ebene. Die Szenarien 1, 2 und 4 fokussieren auf Einsparung von Mineraldüngerstickstoff und die Optimierung der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (sofortige Einarbeitung nach der Ausbringung, Schlitztechnik, Ansäuerung flüssiger WSD auf Acker und Grünland, Abdeckung von Lagerbehältern für flüssige WSD). Das Szenario 3 beinhaltet zusätzlich auch Maßnahmen bei der Lagerung von Festmist und der Umlagerung von Gülle aus Kellern in separate Behälter. Das Szenario „TA-Luft 50“ umfasst nur anlagenbezogene Maßnahmen (Stall und Wirtschaftsdüngerlagerung für Schweine und Geflügel), die nach nationalem Immissionsschutzrecht (TA Luft) genehmigungsbedürftig sind. Technische Maßnahmen sind hier die Abluftreinigung und die stallintegrierten Techniken zur Gülleansäuerung, sowie die an den Nutztierbedarf angepasste N-reduzierte Fütterung.

Ergebnisse

Kosten der Emissionsminderung für Techniken im Stall, bei der Lagerung und der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern

Angenommen wird, dass die Emissionsminderung von Ammoniak durch die Einsparung von Mineraldüngern und durch den Ersatz von Harnstoff durch Kalkammonsalpeter kostenneutral realisiert werden kann. Als kostenneutral werden auch die Futtermittelanpassungen in der Legehennenhaltung angenommen.

Die spezifischen Minderungskosten für Maßnahmen bei der **Ausbringung von WSD** belaufen sich für Rindergülle zwischen 0,1 und 7,2 € kg^{-1} NH_3, für Schweinegülle zwischen 0,1 und 9,0 € kg^{-1} NH_3. Da die absoluten Kosten der Emissionsminderung gleichbleiben (Ausbringkosten der Minderungstechniken), während die Emissionen aus Schweinegülle bei der Ausbringung allgemein geringer ausfallen und damit der Effekt der Emissionsminderung, sind die Minderungskosten für Schweinegülle zumeist höher als für Rindergülle. Die Minderungskosten für die Einarbeitung innerhalb einer bzw. vier Stunde(n) weist sowohl für Rinder- als auch für Schweinegülle für nahezu alle Verfahrensleistungen Kosten von weniger als 1 € kg^{-1} NH_3 auf. Mit der hier für die NEC-Szenarien getroffenen Annahme einer optimierten Auslastung werden für flüssige Wirtschaftsdünger Kosten von 0,3 bis 2,5 € kg^{-1} NH_3 ermittelt und in die Berechnungen übernommen. Die weniger differenzierten Berechnungen für die Applikation von Festmist ergeben spezifische Minderungskosten in Höhe von 1,58 € kg^{-1} NH_3.

Für die **Lagerung** von Rindergülle liegen die spezifischen NH_3-Minderungskosten für kleine Ställe (40 TP) in einem Bereich von 7,85 (Folie) bis 15,31 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach); für große Ställe mit 400 Plätzen zwischen 3,63 (Zeltdach) und 5,41 € kg^{-1} NH_3 (Beton). Die Abdeckung mittels Folie ist trotz der niedrigeren Minderungswirkung im Vergleich zu Zelt- und Betonabdeckungen bis zu einer Stallgröße von 455 Plätzen die beste Option. Lagerabdeckungen mit Zeltdach weisen die stärkste Kostendegression auf. Ab Stallgrößen von mehr als 455 Plätzen unterschreiten die Minderungskosten von Zeltabdeckungen aufgrund der höheren Minderungswirkung die Minderungskosten der Folienabdeckungen. Die spezifischen Minderungskosten der Umlagerung der Unterflur gelagerten Gülle liegen zwischen 36,70 und 46,29 € kg^{-1} NH_3 (beinhaltet Kosten für die Errichtung des Außenlagers) und übersteigen die der Güllelagerabdeckungen um rund ein Zehnfaches. Ähnliche Daten ergeben sich bei Mastbullenställen und für die übrigen Rinder. Die spezifischen Minderungskosten liegen für die kleinen Stallgrößen (150 TP) zwischen 4,52 (Folie) und 8,82 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach); für große Stallanlagen (600 TP) zwischen 1,00 (Folie) und 2,09 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach).

Grundsätzlich sind die spezifischen Minderungskosten für die Techniken in den **Ställen** höher als für die Güllelagerung. In der Schweinehaltung führt die Verlagerung der Gülle aus dem Güllekeller in Güllebehälter zu hohen spezifischen Minderungskosten. Diese liegen für die untersuchten Stallgrößen zwischen 5,53 und 7,40 € kg^{-1} NH_3. Die spezifischen Minderungskosten für die Abdeckung von Güllelagerbehältern mittels Schwimmfolie sind grundsätzlich am geringsten. Die Minderungskosten für die Lagerabdeckungsmöglichkeiten bewegen sich für kleine Stallgrößen (300 TP) zwischen 2,77 (Folie) und 7,13 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach); für große Ställe (2.000 TP) zwischen 1,54 (Folie) und 2,44 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach). Die Minderungskosten für Abdeckung mit Zeltdach sind für kleine Ställe hoch, allerdings sind die Skaleneffekte dieser Technik im Vergleich zu Abdeckungen mit Schwimmfolie oder Beton relativ groß, sodass die Minderungskosten für Abdeckungen mit Zeltdächern und Beton für große Ställe nahezu gleich hoch sind (2,39 € kg^{-1} NH_3 für Beton-, 2,44 € kg^{-1} NH_3 für Zeltdachabdeckungen). Die Minderungskosten für Abdeckung von Lagerbehältern bei Zuchtsauen sind tendenziell etwas höher.

Die Strukturdaten für die Abdeckung von Rinder- und Schweinefestmist sind für die Berechnung unterschiedlicher Stallgrößen nicht ausreichend, weswegen keine Skaleneffekte abgeleitet werden können. Die spezifischen Minderungskosten für diese Maßnahme betragen 19,47 resp. 2,23 € kg^{-1} NH_3.

Bei Mastschweinen stellt sich trotz des hohen Investitionsbedarfs der Ansäuerungstechnik heraus, dass die spezifischen Minderungskosten der Gülleansäuerung die Minderungskosten der Abluftreinigung aufgrund größerer Skaleneffekte ab einer Stallgröße von 743 Mastschweinen unterschreiten. Die spezifischen Minderungskosten bewegen sich zwischen 5,6 und 14,1 € kg^{-1} NH_3 für die Ansäuerung von Gülle und für die Abluftreinigung zwischen 8,2 und 11,7 € kg^{-1} NH_3. Dies begründet sich vornehmlich durch die höheren Direktkosten für die Abluftreinigung. Für die Installation von Abluftreinigungsanlagen in Legehennenställen errechnen sich Minderungskosten von 13 bis 22 € kg^{-1} NH_3.

Emissionsprojektion auf nationaler Ebene bis zum Jahr 2030 und assoziierte Emissionsminderungskosten

Die nationalen Referenzemissionen des Jahres 2005 betrugen 625 kt NH_3, wie sie mit dem nationalen Inventarbericht 2018 veröffentlicht wurden. Aufgrund der zu erwartenden Agrarstrukturveränderungen, insbesondere des Rückgangs der Nutztierhaltung und der gesetzlichen Bestimmungen zur Düngung, ist nach der Thünen-Baseline (Offermann et al. 2018) mit einem Rückgang der Ammoniakemissionen auf 576 kt NH_3 im Jahr 2030 zu rechnen. Somit sind noch etwa 132 kt NH_3 bis zum Jahr 2030 durch zusätzliche Minderungsmaßnahmen zu erbringen, um die durch die NEC-RL gesteckten Minderungsziele zu erreichen.

Mit der Umsetzung von weitergehenden Techniken bei der Wirtschaftsdüngerausbringung fokussierenden Maßnahmen in den NEC-Szenarien 1, 2 und 4 wird das Erreichen der NEC-Verpflichtungen (444 kt NH_3) hochwahrscheinlich. Diese Szenarien enthalten weitergehende Minderungstechniken für die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (sofortige Einarbeitung von Wirtschaftsdüngern, Gülleschlitzen, Gülleansäuerung und die Abdeckung von Güllelagerbehältern mit Schwimmfolie). Die mit diesen Annahmen errechneten Emissionen liegen im Jahr 2030 bei 463 bis 464 kt NH_3 für die Szenarien 1, 2 und 4, somit noch um etwa um weniger als 20 kt über dem NEC-Ziel. Da jedoch das hier entwickelte Kalkulationsmodell noch nicht alle Tierkategorien in die Minderungsszenarien einschließt und da der Strukturwandel in der Tierhaltung (Viehbestandsabbau) erheblich schneller als prognostiziert von statten geht, ist mit einer Einhaltung der NEC-Ziele mit Umsetzung dieser 3 Szenarien zu rechnen. Die Szenarien 1 und 4 bieten auch die kostengünstigsten Optionen mit 1,30 - 1,34 € kg^{-1} NH_3 bzw. jährlichen Kosten von etwa 100 Mio €. Das NEC 2-Szenario ist bei fast gleicher Emissionsminderung mit erheblich höheren Kosten verbunden (126 Mio €). Mit dem NEC-Szenario 3 und vermehrter Einbeziehung von Minderungsoptionen bei der Lagerung -insbesondere bei Trockenkot/Festmist wird das NEC-Ziel sicher erreicht (433 kt NH_3), jedoch bei 4 bis 5-fach höheren Minderungskosten (5,25 € kg^{-1} NH_3 / 511 Mio € a^{-1}).

Eine weitergehende Fokussierung auf Maßnahmen, die über das Anlagen-Genehmigungsrecht durchsetzbar sind (Implementierung stallintegrierter Techniken wie Fütterung, Ansäuerung von Gülle im Stall, Abluftreinigung im sogenannten TA-Luft Szenario) führt hingegen nur zu geringer Emissionsminderung auf 555 kt bei erheblichen spezifischen Mehrkosten (ca. 5-fach im Vergleich zu NEC-Sz.1). Somit sind sowohl der Agrarsektor als auch die Politik für die Umsetzung der NEC-Ziele auf den umfassenden Einsatz von emissionsmindernden Verfahren bei der WSD-Ausbringung angewiesen. In allen Szenarien machen die Emissionen bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern den höchsten Anteil aus, gefolgt von den Emissionen aus dem Lager und im Stall.

Emissionsprojektion auf regionaler Ebene bis zum Jahr 2030 in den Hotspotregionen der Nutztierhaltung

Werden die Emissionen und Emissionsminderungen auf die Fläche der jeweiligen Hotspotregion bezogen, lässt sich daraus der regionale Immissionswert errechnen. Es zeigt sich, dass die schutzgutbezogenen Immissionshöchstwerte nach Heldstab et al. (2020) in den Hotspotregionen allenfalls in der Region Mittelfranken/Ostwürttemberg erreicht werden können mit Werten von etwas über 3 µg NH_3 m^{-3} Luft. Im Allgäu und Südostbayern liegen die Konzentrationen bereits bei 4 bis 5 µg NH_3 m^{-3} Luft. Dementsprechend liegt bereits eine Überschreitung des Schutzgutrichtwertes um 50 % und mehr vor. Die nordwestdeutschen Regionen weisen kalkulatorische Immissionswerte um 8 oder 9 bzw. 12 oder 13 µg NH_3 m^{-3} Luft auf, sie überschreiten den Zielwert zum Schutz höherer Pflanzen (3 µg NH_3 m^{-3}) nach Heldstab et al. (2020) damit um das 3 bis 4-fache. Die mit den in den Szenarien definierten Minderungstechniken führen demnach nur zu moderaten Minderungen der Immissionswerte, auch durch die Kombination der NEC-Szenarien mit dem TA Luft 50-Szenario ist nur eine geringfügige Minderungsmehrwirkung zu erwarten.

Auch bei der Berechnung von sogenannten „Maximalszenarien“ für die Region Vechta-Cloppenburg zeigte sich, dass eine weitergehende Senkung der Emissionen und Immissionskonzentrationen auf den angestrebten Richtwert nicht möglich ist. Zum einen wurden hierbei alle im Vorhaben definierten Maßnahmen für die Region berechnet, zusätzlich auch technische Optionen für die Emissionsminderung in Rinderställen sowie Maßnahmen zur Wirtschaftsdüngeraufbereitung. Mit den Maximalszenarien werden die NH_3-Emissionen um bis zu 39 auf 61 % gegenüber dem Niveau der Baseline-Projektion reduziert. Die Immissionswerte fallen damit auf ein Niveau von 8,6 bis 10 µg NH_3 m^{-3} Luft, dementsprechend liegen diese noch deutlich über dem von Heldstab et al. (2020) errechneten Zielwert. Die spezifischen Minderungskosten betragen 4,9 bis 9,8 € kg^{-1} NH_3.

Nationale Erfüllungskosten für den deutschen Agrarsektor für die Einhaltung der NEC-Minderungsziele

Zur Berechnung der nationalen Erfüllungskosten für den Agrarsektor werden zunächst die Regelungen des nationalen Luftreinhalteprogramms berücksichtigt, das eine schrittweise Reduktion der NH_3-Emissionen bereits mit dessen Inkrafttreten bis hin zum Zieljahr 2030 vorsieht. Folglich entstehen Kosten bereits mit dem Beginn der Umsetzung des Luftreinhalteprogramms, um eine zusätzliche Minderung von 181 kt NH_3 a^{-1} im Zieljahr 2030 gegenüber dem Basisjahr 2005 zu erreichen. Es wird dabei angenommen, dass ab dem Jahr 2018 – dem Basisjahr des Nationalen Luftreinhalteprogramms – die Emissionen jährlich stetig durch Umsetzung der Maßnahmen zur Erreichung der Reduktionsziele gemindert werden. Zur Berechnung der Erfüllungskosten werden die Emissionen des Bl-Szenarios (mit den Emissionsminderungen, die aufgrund struktureller Veränderungen, Technikentwicklungen und Umsetzung der Düngegesetzgebung zu erwarten sind) als Bezug herangezogen. Dies entspricht einer zu erbringenden weitergehenden Minderung zur Erfüllung der NEC-RL in Höhe von 132 kt NH_3 im Jahr 2030.

Daraus ergibt sich für die Zeitspanne von 12 Jahren eine jährlich zusätzlich zu erbringende Minderung von 11 kt NH_3 a^{-1}, um den Minderungszielwert für 2030 zu erreichen. Absolut werden durch die Minderungsmaßnahmen über 12 Jahre demnach 990 kt NH_3 gemindert. Bei spezifischen Minderungskosten in Höhe von 1,34 € kg^{-1} NH_3 (Minderungskosten für das Szenario NEC 1) ergeben sich bis 2030 absolute Kosten in Höhe von 1,33 Mrd. €, im Zieljahr 2030 selbst und den darauffolgenden Jahren jährliche Kosten von 242,54 Mio. € a^{-1}. Ein Inflationsausgleich ist in dieser Berechnung nicht enthalten, so dass durch entsprechende Preis- und Kostensteigerungen mit erheblich höheren Erfüllungskosten gerechnet werden muss.

Ebenso nicht eingerechnet sind die Mehrkosten, die durch die Befolgung der Dünge-Verordnung entstehen, mit der bereits rund 30 bis 40 kt Ammoniakemissionen reduziert werden.

Perspektiven für die Erweiterung des Kalkulationsmodells

Das hier für NH_3-Minderungsmaßnahmen beschriebene Daten- und Kalkulationssystem kann perspektivisch für die ökonomisch-ökologische Bewertung von Maßnahmen für weitere Stoffströme in der Landwirtschaft (z.B. Klimagase), Umweltziele und Umweltmedien und deren Umsetzungskosten für den Agrarsektor genutzt werden. Darauf aufbauend können räumlich und zeitlich differenzierte Grenzkostenkurven für die Emissionsminderungsmaßnahmen auf nationaler und regionaler Ebene erstellt werden.

Summary

Introduction and objectives

With the background of Germany's existing mitigation obligations set in environmental legislation, a modelling methodology was developed for the economic and ecological assessment of mitigation measures for ammonia emissions. The most important regulations are the new NEC Directive (2016/2284/EU) for the reduction of air pollutants by 2030 and the IE Directive (2010/75/EU) for Industrial Installations. In both directives, ammonia reduction in agriculture is of particular importance. The emission-limiting regulations of the NEC Directive are implemented in German law by the National Air Pollution Control Programme (NAPCP) (BMU, 2018) and in partly by the Fertiliser Ordinance (DüV 20217/2020); accordingly, ammonia emissions are to be reduced by 29 % from the reference year 2005 to the target year 2030 by means of the mitigation options mentioned in the NAPCP. The implementation of the National Air Pollution Control Programme mitigation measures has to start as soon as the programme enters into force.

The project is therefore to examine the extent to which the emission mitigation targets for ammonia in the NEC Directive (reduction of emissions by 29 % to 444 kt NH_3 in 2030) can be achieved and the costs associated with. Furthermore, it is assessed whether the tolerable immissions (benchmark values according to Heldstab et al. 2020) for ammonia can be achieved in the German livestock farming hotspot regions. For this purpose, a calculation model is being developed that allows the calculation of agricultural structure data, emissions, mitigation options and their costs at the regional level (district). The model can be extended to other substance groups (e.g. particulate matter, methane). In order to determine the emission mitigation potential, 5 scenarios are defined, analysed with regard to their mitigation effect and, based on this, the fulfilment costs for compliance with the NEC Directive and the national clean air programme are determined. Furthermore, an analysis of the cost efficiency for the most relevant animal categories and the respective process steps livestock housing, storage and spreading of farm manure is undertaken.

The integrated approach developed within the framework of the project enables a temporally and spatially resolved evaluation of mitigation measures and policy scenarios consisting of bundled measures with regard to their effects on the economic performance indicators at the product and individual farm level, differentiated by animal category. Furthermore, a spatially and temporally differentiated quantification of the emission abatement and the resulting regional immission concentration, as well as the determination of the compliance costs of measures and bundles of measures (scenarios) is possible. As a result, measures can not only be spatially and temporally broken down, but also prioritised according to farm sizes, animal categories and techniques.

Methods

Technology models for the determination of investments, costs, mitigation costs and the deduction of further economical parameters

During the methodical work, current and consistent cost models for livestock buildings were generated for the most relevant animal categories, each with a varying livestock places. Based on a scalable building model for fattening pigs (Döhler, 2021), this was extended for sows, cattle (dairy cows, fattening bulls, other cattle). The BMEL/KTBL data system "BAUKOST" serves as the data basis for the housing models, although it is largely not up to date (status 2017). The surveys on construction investments and costs in "BAUKOST" date back to the year 2000, the most recent surveys for the data sets from "BAUKOST" used here date back to 2014. An

evaluation of the total of 250 data sets indicates they are not consistent in terms of both structure and chronology. For this reason, intensive and in-depth research was carried out to verify, expand and specify these data, which now also include data sets from ALB (Hessen) (2019), LfL (Bavaria) (Hofmann, 2022) and our own surveys. Costs and prices dating to different years in the basic data were standardised to the price year 2018 by applying price indexes. Our cost models for livestock buildings to date are only available for conventional livestock systems.

The cost models created include reference techniques for the various livestock categories of cattle, pigs and poultry with medium to high numbers of animal places above and below the authorisation thresholds in the 4th BImSchV. The structure of the cost models and key data is based on the specifications of DIN 276 ("Ermittlung und Gliederung von Kosten im Bauwesen"), the calculation of costs is based on DIN 18960 ("Nutzungskostenplanung und insbesondere für die Ermittlung und die Gliederung von Nutzungskosten im Hochbau"). From the reference techniques, cost models including NH_3 mitigation techniques were generated, allowing the determination of additional costs of the NH_3 mitigation techniques. The structural-technical devices for the storage of farm manure were integrated into the livestock house models, methodically analogue to the approach described by Döhler et al. (2011). The spreading of manure is calculated independently of the livestock houses; this is also done analogously to Döhler et al (2011). Within the project, not only mitigation options for livestock farming are considered, but also those for mineral N fertilisation; the latter are assumed to be cost-neutral due to the absence of cost allocation schemes. The identified mitigation costs thus apply to both livestock and crop production.

Ammonia Emission model

Basing on the national inventory report (Haenel et al. 2018) and the mitigation potential analysis on a nationally aggregated level by Häußermann et al. (2020), regionally resolved calculation methods are developed that allow a detailed depiction of the nitrogen fluxes along the process chain of agricultural processes and the resulting ammonia emissions in the individual sections of the process chain of livestock farming (housing, feeding, storage/application of manures and pasture). This tool is used to calculate the reduction effect of the measures and scenarios on NH_3 emissions for the year 2030 as a projection and to assess their contribution to emission mitigation compared to the reference year 2005. The choice of measures is based on the technique outlined in the relevant literature dealing with the mitigation of ammonia emissions.

In the calculation model, only abatement options for the animal categories dairy cattle, beef cattle, other cattle, fattening pigs, breeding sows and laying hens are represented at the current stage of development, i.e. for the remaining livestock categories no abatement options are calculated. Accordingly, the reduction potentials for ammonia emissions at regional and national level are somewhat underestimated. Organic farming is not considered methodically separate, in line with Häußermann et al (2020). By blending with results from emission models (Häußermann et al. 2020), the specific NH_3 emission abatement costs can be calculated. Functions for investment and NH_3 abatement costs are derived from the discrete results of the livestock building models, which are used as a basis for calculating both regional abatement costs and national abatement/compliance costs for NH_3 mitigation measures, taking into account the agricultural structure.

Agricultural structure model

Detailed knowledge of the distribution across size classes and spatial distribution of livestock farming methods, animal herds, number of farms, etc. is required for the calculation of cost-optimised techniques and methods for NH_3 emission abatement in livestock farming and biogas

production. The Federal Statistical Office regularly publishes structural data on livestock farming from the so called „LZ and ASE", classified according to both the area used for agriculture and the number of livestock on farms or in herds (Statistisches Bundesamt, 2011; Statistisches Bundesamt, 2017). From this, regression functions can be derived that describe the relationship between herd size and the required structural data, even far beyond the individual data gathered by the Federal Statistical Office. These regression functions, derived from data for the federal states, and the animal populations known at the district level are used to calculate structural data at the district level. In the absence of further information, it is assumed that the regression functions derived for the federal states also approximately describe the relative herd size-dependent ratios of the structures in the districts of the respective federal states. The absolute values of the structural data distributed by size class (e.g. number of animals separated by husbandry systems) can be deduced from the livestock populations known at the district level in relation to the livestock populations in the respective federal state. NH_3 emissions were allocated to these structural data both before and after the implementation of mitigation measures.

NEC emission mitigation scenarios

With the calculation models, emissions and emission abatement can be calculated for the first time at both the national and regional ('district') level. As part of the project "Calculation of the mitigation potential of measures in the agricultural sector to reduce national ammonia emissions and development of scenarios for compliance with the mitigation obligations by the new NEC Directive (EU) 2284/2016" (Häußermann et al. 2020), emission calculations at the national level showed that the ammonia reduction obligations of the NEC Directive can in principle be met using technical approaches in accordance with the European state of the art. For the years after 2020, additional measures beyond the current policy will be required.

The scenarios calculated in this project with several alternative combinations of measures are also applied in the project here, but at the district level with later aggregation to the national level. Scenarios 1, 2 and 4 are focused on saving mineral fertiliser nitrogen and optimising the spreading of livestock manure (immediate incorporation after spreading, slot technology, acidification of liquid manures on arable land and grassland, covering of storage facilities for liquid manures). Scenario 3 further includes measures for the storage of solid manure and the shifting of manure from cellars (under the house) into separate tanks. The scenario "TA-Luft 50" only includes installation-related measures (housing and manure storage for pigs and poultry) that require approval according to national immission control act (TA Luft). Technical measures here are air purification and house-integrated techniques for slurry acidification, as well as feeding adapted to the livestock's needs.

Results

Emission mitigation costs for techniques in livestock housing, storage and spreading of livestock manure

We assume that ammonia emissions can be reduced cost-neutrally by saving on mineral fertilisers and by replacing urea with calcium ammonium nitrate. The feed adaptations in laying hen management are also considered to be cost-neutral.

The specific mitigation costs for measures following the application of **livestock manure** amount to between 0.1 and 7.2 € kg^{-1} NH_3 for cattle slurry and between 0.1 and 9.0 € kg^{-1} NH_3 for pig slurry. Since the absolute costs of emission reduction remain the same (application costs of the abatement techniques), while the emissions from pig slurry are generally lower following application and thus the emission reduction effect, the abatement costs for pig slurry are mostly

higher than for cattle slurry. The abatement costs for incorporation within one or four hour(s) indicates costs of less than 1 € kg^{-1} NH_3 for both cattle and pig slurry. With the assumption of optimised spreading management made here for the NEC scenarios, costs of 0.3 to 2.5 € kg^{-1} NH_3 are determined for liquid manure and adopted in the NEC calculations. Calculations for the application of solid manure, which are less differentiated, result in specific abatement costs of € 1.58 kg^{-1} NH_3.

For the **storage** of cattle slurry, the specific NH3 mitigation costs for small barns (40 TP) range from 7.85 (foil) to 15.31 € kg^{-1} NH_3 (tent roof); for large barns with 400 places between 3.63 (tent roof) and 5.41 € kg^{-1} NH_3 (concrete). Covering with foil is the best option up to a house size of 455 places, despite the lower mitigation effect compared to tent and concrete covers. Storage covers with tent roofs show the strongest degression in costs. From barn sizes of more than 455 places, the abatement costs of tent covers undercut the abatement costs of foil covers due to the higher abatement effect. The specific abatement costs of relocating slurry stored below ground range between 36.70 and 46.29 € kg^{-1} NH_3 (which includes costs for the new construction of the external storage facility) and exceed those of slurry storage covers by about a factor of ten. Similar data are obtained for beef cattle barns and for the other cattle. The specific abatement costs for the small barn sizes (150 TP) are between 4.52 (foil) and 8.82 € kg^{-1} NH_3 (tent roof); for large barns (600 TP) between 1.00 (foil) and 2.09 € kg^{-1} NH_3 (tent).

In pig farming, the transfer from a slurry cellar (below the house) to slurry tanks leads to high specific abatement costs. These costs range between 5.53 and 7.40 € kg^{-1} NH_3 for the barn sizes investigated. The specific abatement costs for covering slurry storage tanks with floating film are generally the lowest. The abatement costs for the storage cover options range for small barn sizes (300 TP) between 2.77 (foil) and 7.13 € kg^{-1} NH_3 (tent); for large barns (2,000 TP) between 1.54 (foil) and 2.44 € kg^{-1} NH_3 (tent). The abatement costs for cover with tents are high for small barns, but the economies of scale of this technique are relatively large compared to covers with floating foil or concrete, so that the abatement costs for covers with tents and concrete are almost the same for large houses (2.39 € kg^{-1} NH_3 for concrete, 2.44 € kg^{-1} NH_3 for tent covers). The abatement costs for covering storage facilities for sows tend to be slightly higher.

The structural data for the covering of cattle and pig solid manure are not sufficient for the calculation of various barn sizes, and therefore no economies of scale can be derived. Specific abatement costs are 19.47 and 2.23 € kg^{-1} NH_3, respectively.

In principle, the specific abatement costs for the techniques in the **livestock buildings** are higher than those for manure storage. In the case of fattening pigs, despite the high investment requirements of the acidification technology, it turns out that the specific abatement costs of manure acidification undercut the abatement costs of air purification due to greater economies of scale above a barn size of 743 fattening pigs. The specific abatement costs range between 5.6 and 14.1 € kg^{-1} NH_3 for the acidification of manure, and between 8.2 and 11.7 € kg^{-1} NH_3 for the exhaust air purification. This is mainly due to the higher direct costs for exhaust air purification. For the installation of exhaust air purification systems in laying hen houses, reduction costs of 13 to 22 € kg^{-1} NH_3 are calculated.

Emission projection at national level up to 2030 and associated emission mitigation costs

The 2005 national reference emissions amounted to 625 kt NH_3 according to the national inventory report published in 2018. Due to the prospective changes in agricultural structure, in particular the decline in livestock farming and the legal requirements for fertilisation, ammonia emissions are expected to decrease to 576 kt NH_3 according to the Thünen Baseline (Offermann et al. 2018). Thus, about 132 kt NH_3 still need to be achieved by 2030 by additional mitigation measures in order to reach the reduction targets set by the NEC-RL. With the implementation of

measures focussing on more advanced techniques in manure application in the NEC scenarios 1, 2 and 4, the achievement of the NEC obligations (444 kt NH_3) is highly probable. These scenarios include more advanced mitigation techniques for manure application (immediate incorporation of manure, slurry slot injection, manure acidification and covering manure storage tanks with floating foil). The emissions calculated with these assumptions are 463 to 464 kt NH_3 for scenarios 1, 2 and 4 in 2030, thus still less than 20 kt above the NEC target. However, since the calculation model developed here does not yet include all livestock categories within the mitigation scenarios and since the structural change in livestock farming (reduction of livestock numbers) is taking place considerably faster than forecast, compliance with the NEC targets can be expected with the implementation of these 3 scenarios. Scenarios 1 and 4 also provide the most cost-effective options with 1.30 - 1.34 € kg^{-1} NH_3 or annual costs of 100 million €. The NEC 2 scenario is associated with significantly higher costs (€ 126 million) at almost the same emission abatement. With the NEC 3 scenario and a greater inclusion of mitigation options for storage - especially for solid manure - the NEC target is safely achieved (433 kt NH_3), however, at 4 to 5 times higher mitigation costs (5.25 € kg^{-1} NH_3 / 511 Mio € a^{-1}).

A further focus on measures that can be enforced through the installation permit law (implementation of barn-integrated techniques such as feeding, acidification of manure in the barn, air purification in the so-called "TA-Luft scenario"), in comparison, leads only to a minor emission abatement to 555 kt, but at considerable higher costs (approx. 5-fold in comparison to NEC scenario 1). Thus, both the agricultural sector and policy-makers are reliant on the comprehensive use of mitigation techniques for manure application in order to achieve the NEC targets. In all scenarios, emissions from manure application account for the highest share, followed by emissions from storage and in the livestock house.

Emission projection at regional level up to 2030 in the hotspot regions of livestock farming

By allocating the emissions and emission abatement to the area of the respective livestock hotspot region, the regional immission level can be obtained. It becomes apparent that the tolerable immission benchmarks for the protected goods according to Heldstab et al. (2020) in the hotspot regions can at best be achieved in the region of Central Franconia/Eastern Württemberg with values of slightly more than 3 µg NH_3 m^{-3} air. In the Allgäu and south-eastern Bavaria, concentrations are 4 to 5 µg NH_3 m^{-3} air. Accordingly, the concentration bechmark is exceeded by 50 % or more. The north-west German regions show immission concentrations of 8 or 9 or 12 or 13 µg NH_3 m^{-3} air, thus exceeding the benchmark according to Heldstab et al. (2020) by a factor of 3 to 4. The abatement techniques defined in the scenarios therefore only lead to moderate reductions in the immission levels; even the combination of the NEC scenarios with the TA Luft 50 scenario is expected to have only a slight increase in the abatement effect.

The calculation of so-called "maximum scenarios" for the Vechta-Cloppenburg region also showed that a further reduction of emissions and ambient air concentrations towards the benchmark is hardly possible: on the one hand, all measures defined in the project were calculated for that region, additionally technical options for emission mitigation in cattle barns as well as measures for processing of livestock manure. With the maximum scenarios, NH_3 emissions are reduced by up to 39 to 61 % compared to the baseline projection level. The immission levels thus fall to a level of 8.6 to 10 µg NH_3 m^{-3} air, which is accordingly still significantly above the benchmark determined by Heldstab et al. (2020). The specific mitigation costs amount to 4.9 to 9.8 € per reduced kilogramme of ammonia.

National compliance costs for the German agricultural sector for meeting the NEC mitigation targets

For the calculation of the national compliance costs for the agricultural sector, the schemes of the National Clean Air Programme are considered at first, which schedules a stepwise reduction of NH_3 emissions starting with its entry into force up to the targeted year 2030. Consequently, costs are already incurred with the start of implementation of the Clean Air Programme in order to achieve an additional reduction of 181 kt NH3 a^{-1} in the target year 2030 compared to the baseline year 2005. It is thereby assumed that from 2018 - the reference year of the National Clean Air Programme - emissions will be steadily reduced each year by implementing the measures to achieve the mitigation targets. To calculate the compliance costs, the emissions of the Bl scenario (the emission reduction to be expected due to structural changes, technology developments and implementation of the fertilising legislation) are used as a reference. This corresponds to a further reduction to be achieved in order to comply with the NEC Directive of 132 kt NH_3 by 2030.

This means an additional annual reduction of 11 kt NH_3 a^{-1} over a period of 12 years in order to achieve the reduction target for 2030. In absolute terms, 990 kt NH_3 are thus reduced by the mitigation measures. With specific abatement costs of 1.34 € kg^{-1} NH_3 (abatement costs for scenario NEC 1), this results in absolute costs of € 1.33 billion by 2030, and annual costs of € 242.54 million a^{-1} in the target year 2030 itself and in the following years. This calculation does not include an adjustment for inflation, so that considerably higher compliance costs must be expected due to corresponding price and cost increases. Also not included are the additional costs arising from compliance with the Fertiliser Ordinance, which already reduces ammonia emissions by around 30 to 40 kt.

Perspectives for the expansion of the calculation model

The data and calculation system described here for NH_3 mitigation measures can be used perspectively for the economic-ecological assessment of measures for other substance flows in agriculture (e.g. greenhouse gases), environmental targets, environmental media and their implementation costs for the agricultural sector. Based on this, spatially and temporally differentiated marginal cost curves can be drawn up for emission reduction measures at national and regional level.

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Bedeutung des Stickstoffs als Düngemittel und potenzielle Umwelteffekte

Die Emissionen von Schadstoffen aus der Landwirtschaft stellen ein Risiko für die Qualität der Luft, des Bodens, des Grundwassers und der marinen Gewässer dar. Diese Risiken sind verbunden mit hohen Nitratgehalten im Trinkwasser, mit der Versauerung und Eutrophierung des Bodens, der Gewässer und Ökosysteme, aber auch mit Emissionen von Treibhausgasen. Die Landwirtschaft ist gefordert, entsprechende Strategien zur Verringerung der negativen Einflüsse zu entwickeln. Eine zentrale Rolle nimmt dabei das Element Stickstoff (N) ein. Stickstoff ist ein essentieller Bestandteil aller Lebewesen und spielt daher auch im landwirtschaftlichen Sektor eine entscheidende Rolle. Zum einen ist er in seiner reaktiven Form einer der wichtigsten Nährstofflieferanten, um hohe Erträge bei gleichbleibender Qualität zu liefern, zum anderen birgt die Anwendung von Stickstoff bei unkontrollierter Nutzung oder Übernutzung Problematiken, da landwirtschaftliche Flächen in direkter Verbindung mit dem Nährstoffhaushalt umliegender, natürlicher Ökosysteme stehen. Besonders umweltrelevante Formen des reaktiven Stickstoffs sind Verbindungen wie Ammoniak und Ammonium, Stickstoffmonoxid sowie -dioxid, Lachgas und Nitrat. Die wichtigsten Quellen für reaktiven Stickstoff sind vor allem die Verbrennung fossiler Energieträger und die Synthese von Ammoniak durch das Haber-Bosch-Verfahren, welches zu großen Teilen zur Herstellung synthetischer N-Dünger für die Landwirtschaft genutzt wird (UBA, 2022).

Bei übermäßiger N-Auswaschung von landwirtschaftlichen Flächen, kommt es zur Eutrophierung von Ökosystemen, Minderung der Biodiversität und Bodenversauerung (SRU, 2015). Nicht zuletzt ist auch die menschliche Gesundheit aufgrund der Begünstigung der Bildung sekundärer Fein- und Feinststäube durch die Anlagerung von Nanopartikeln an NO_x und Ammoniak in der Luft (Wang et al., 2020) und die Qualitätsminderung des Trinkwassers durch Nitrat beeinträchtigt (SRU, 2015). Gemäß UBA (2022) führt die Überlastung von Ökosystemen mit reaktiven N-Verbindungen zu einer vielschichtigen Problematik, denn weltweit wird derzeit etwa viermal mehr Stickstoff in die reaktive Form umgewandelt als für ein langfristiges Überleben verträglich ist.

Die Nutztierhaltung ist innerhalb des Agrarsektors der bedeutendste Emittent und kann sowohl auf betrieblicher oder auch auf regionaler Ebene mit hohen Tierbestandsdichten zu Belastungsschwerpunkten führen. Der anfallende Wirtschaftsdünger führt in mehreren Regionen zu Nährstoffüberschüssen, darüber hinaus kann suboptimales Wirtschaftsdüngermanagement zu ökologischen Belastungen und Gesundheitsrisiken für Mensch und Tier führen.

1.2 Rechtliche Regelungen zur Minderung von Emissionen

Internationale, völkerrechtliche Vereinbarungen sowie EU-Richtlinien und -Verordnungen greifen die Vermeidung dieser Umweltprobleme auf. International haben sich die Staaten der UN mit dem 1997 angenommenen Kyoto-Protokoll erstmalig in einem völkerrechtlichen Vertrag auf eine absolute und rechtlich verbindliche Begrenzung des Treibhausgasausstoßes geeinigt. Das 1999 im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention beschlossene Göteborg-Protokoll zielt auf die Minderung der Zusammenwirkung verschiedener Schadstoffe auf Versauerung, Eutrophierung, Ozon- und Feinstaubbelastung ab. Es enthält zahlreiche Regelungen zu Emissionsminderungsverpflichtungen und Monitoring, dessen übergeordnete Ziele und

Vereinbarungen auf europäischer Ebene in das Umweltaktionsprogramm und auch in die EU-NEC-Richtlinie (EU-RL 2016/2284) übernommen wurden.

Übergeordnetes Ziel der EU ist in erster Linie die Senkung besonders problematischer Schadstoffe wie Schwefeldioxid, Stickoxide oder Ammoniak zum Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt. Es wird eine grenzüberschreitende Luftreinhaltepolitik sowie klima-, umwelt- und ressourcenschonende Wirtschaftsweise zum Schutz, zur Erhaltung und Verbesserung des Naturkapitals unter Berücksichtigung von Umwelt und sozialer Kosten, angestrebt (Europäische Union, 2014).

Im Rahmen der revidierten NEC-Richtlinie haben sich die Mitgliedsstaaten verpflichtet, für bestimmte Luftschadstoffe prozentuale Reduktionsziele in Bezug auf die Emissionen im Referenzjahr 2005 einzuhalten. Für Ammoniak war die zulässige, jährliche Höchstmenge in Deutschland bis zum Inkrafttreten der neuen NEC-Richtlinie auf 550 kt NH_3 begrenzt (EG-RL 2001/81). Mit der neuen NEC-Richtlinie wird diese Höchstmenge durch ab 2020 und 2030 einzuhaltende Minderungsziele von 5 resp. 29 % in Bezug auf die Emissionen im Jahr 2005 abgelöst. Gemäß der Emissionsberichterstattung 2018 (Haenel et al., 2018) entspricht dies einem Niveau von 594 kt NH_3 im Jahr 2020 und 444 kt NH_3 im Jahr 2030. Anzumerken ist, dass die absoluten Werte aufgrund von Änderungen der Referenzemissionen im Jahr 2005 durch Abweichungen in der Berechnungsmethodik bei der jährlichen Fortschreibung des Emissionsinventars geringfügig variabel sind. Vor dem Hintergrund, dass in Deutschland im Jahr 2021 67 % der reaktiven N-Verbindungen und rd. 95 % der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft stammten (UBA, 2021b; UBA 2022; BMU 2019), stellt der landwirtschaftliche Sektor die wichtigste Option zur Verminderung dieser Stickstoffemissionen dar.

Die Mitgliedsstaaten sind durch die neue NEC-Richtlinie angehalten, ein nationales Luftreinhalteprogramm zu verabschieden und durchzuführen, in dem Maßnahmen zur Einhaltung der Minderungsziele für die einschlägigen Sektoren einschließlich der Landwirtschaft festgelegt werden. Im nationalen Luftreinhalteprogramm Deutschlands (BMU, 2019) sind Emissionsprojektionen und Minderungspotenziale der Maßnahmen und „Szenarien“ für die Jahre 2020, 2025 und 2030 definiert. So wird in ein „Mit-Maßnahmen-Szenario“ (WM – With Measures) unterschieden, welches zum einen alle bereits beschlossenen Maßnahmen umfasst, die bis zum 31.07.2016 resp. 01.09.2017 im Bereich Luftreinhaltung beschlossen wurden (BMU, 2019) und in ein ergänzendes „NEC-Compliance-Szenario“ (WAM – With Additional Measures) für den Fall einer prognostizierten Nichteinhaltung der Reduktionsverpflichtungen im WM-Szenario. Dieses berücksichtigt weitere Maßnahmen, die noch nicht rechtsgültig beschlossen wurden sowie Strategien, auf die sich die Bundesregierung im Rahmen der NEC-Richtlinie geeinigt hat. Neben der jährlichen Emissionsberichterstattung sind alle zwei Jahre Emissionsprojektionen für die entsprechenden Schadstoffe zu berichten. In nationalen Luftreinhalteprogrammen stellen die Mitgliedsstaaten ihre vergangenen, gegenwärtigen und zukünftig geplanten Strategien und Maßnahmen zur Zielerreichung der Reduktionsverpflichtungen dar. Diese Programme sind alle vier Jahre zu aktualisieren.

Die Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (IE-RL) ist 2011 in Kraft getreten und ersetzt sieben alte Richtlinien, insbesondere die IPPC-Richtlinie, wodurch die Rechtsvorschriften über Industrieanlagen vereinfacht und klarer gestaltet werden sollen. Die IE-RL hat die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung infolge industrieller Tätigkeiten zum Inhalt. Sie sieht Vorschriften zur Vermeidung und, sofern dies nicht möglich ist, zur Verminderung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden und zur Abfallvermeidung vor, um ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu erreichen. Sie folgt in den Grundzügen der alten IPPC-Richtlinie (2008/1/EG), beinhaltet aber gegenüber dieser einige wesentliche

Änderungen. Diese reichen von einer verbindlicheren Anwendung der BVT-Schlussfolgerungen bis zu strengeren Überwachungs- und Berichtspflichten.

Im sogenannten „BVT-Merkblatt“, ein aus dem Informationsaustausch der einzelnen Industriesektoren hervorgehendes Dokument, werden die für die Festlegung der besten verfügbaren Techniken sowie der BVT-Schlussfolgerungen berücksichtigten Techniken beschrieben. Die „BVT-Schlussfolgerungen“ beschreiben die besten verfügbaren Techniken, bewerten deren Eignung, listen die mit den BVT assoziierten Emissionswerte sowie Verbrauchswerte, und die dazu gehörigen Überwachungsmaßnahmen. Im Agrarsektor fallen Intensivtierhaltungsanlagen ab einer Betriebsgröße von 2000 Tierplätzen für Mastschweine, 750 Tierplätzen für Sauen und 40000 Tierplätzen für Geflügel unter die IE-RL. Der IRPP (Intensive Rearing of Poultry and Pigs) BREF und die BVT-Schlussfolgerungen sind mit ihrer Publikation vom 21. Februar 2017 verbindlich in Europa anzuwenden. Sie beinhalten Anforderungen und Vorgaben zum Umgang mit Wirtschaftsdünger, zur Aufbereitung, Behandlung und zur Ausbringung von Wirtschaftsdünger mit dem Ziel, Emissionen von Stickstoff, Phosphor, Geruch, und pathogenen Keimen zu reduzieren.

1.3 Erfüllungskosten

In Deutschland sind die Bundesressorts verpflichtet, die voraussichtlichen Gesetzesfolgen eines Regelungsvorhabens zu ermitteln (§ 43 Absatz 1 Nr. 5 und § 44 Absatz 1 der Gemeinsamen Geschäftsordnung der Bundesministerien (GGO)). Die systematische Aufarbeitung der Auswirkungen von staatlichen Interventionen soll insbesondere eine bessere Zielführung ermöglichen, Belastungen für Adressaten und andere Betroffene gering halten sowie Transparenz schaffen. Als Gesetzesfolgen bzw. Auswirkungen staatlicher Interventionen gelten dabei sowohl die beabsichtigten Wirkungen als auch die unbeabsichtigten Nebenwirkungen (Vettori et al. 2016).

Der Erfüllungsaufwand umfasst den gesamten messbaren Zeitaufwand und die Kosten, die durch die Befolgung einer bundesrechtlichen Vorschrift bei Bürgerinnen und Bürgern, Wirtschaft sowie der öffentlichen Verwaltung entstehen. Dies können Informationspflichten, konkrete Handlungsanweisungen, die Erfüllung von Auflagen oder die Einhaltung von Grenzwerten sein. Bürokratiekosten sind dabei ein Bestandteil des Erfüllungsaufwandes. Dabei handelt es sich um diejenigen Kosten, die durch die Erfüllung von Informationspflichten entstehen, bspw. für die Beschaffung, Archivierung und Übermittlung von Daten oder Statistiken. Der Erfüllungsaufwand eines Gesetzes ist seit dem Jahr 2011 auszuweisen. Die Bürokratiekosten für die Wirtschaft müssen seit 2006 ermittelt werden. Seit 2009 müssen die Kosten für Informationspflichten auch für Bürgerinnen und Bürger ausgewiesen werden (Vettori et al. 2016). Der Erfüllungsaufwand ist demnach nur ein Teil der Gesamtkosten oder des Gesamtnutzens einer Regulierung. Er setzt sich zusammen aus den Kosten, die für die inhaltlichen Pflichten entstehen und dem Bürokratieaufwand.

1.4 Kosten der Emissionsminderung

Mit zunehmenden Erfolgen bei den Bemühungen um die Luftreinhaltung bei SO_x-, NO_x- und Feinstaub rücken die Ammoniakemissionen, und somit aufgrund ihrer Bedeutung als NH_3-Emissionsquelle die Landwirtschaft zunehmend in den Mittelpunkt der Diskussionen. Mehrere Jahrzehnte wurden bekannte Minderungsoptionen nur begrenzt umgesetzt, häufig aufgrund der damit verbundenen Investitionen und Kosten, insbesondere deshalb, weil Nachrüstungen an bestehenden Techniken und Gebäuden besonders hohe Investitionen und Folgekosten

verursachen. Eine begrenzte Anzahl von Publikationen liegt zur Beschreibung der Emissionsminderungskosten auf nationaler und internationaler Ebene aus der Zeit um die Millenniumwende vor (z.B. Amann et al. 1998, Döhler et al. 2002, aid/KTBL (2003)), meist handelte es sich um die Berechnung von Einzelmaßnahmen mit deren Kosten. Systematische Kostenanalysen folgten durch Klimont und Winiwater (2011) und Döhler et al. (2011). Die GAINS-Kostenmodelle durch IIASA (Klimont und Winiwater, 2011) wurde mittlerweile in mehreren Studien für einzelne Nationen eingesetzt. Eine Reihe von Kostenberechnungen für Emissionsminderungsmaßnahmen erfolgte durch ein wissenschaftliches Konsortium durch Reis et al. (2015). Hier werden alle landwirtschaftlichen Produktionsstufen, angefangen bei der Fütterung und Unterbringung der Tiere bis hin zur Lagerung und Ausbringung von Gülle, Festmist und Mineraldünger betrachtet. Darüber hinaus befasst sich das Konsortium mit den Interaktionen zwischen Ammoniakminderung und Treibhausgasemissionen. Beispiele und Fallstudien aus ausgewählten europäischen Ländern, darunter Italien, Schweiz, Russland, Irland und Spanien, zeigen die Kosten der Ammoniakvermeidung und die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen unter verschiedenen Bedingungen. Eine weitergehende Analyse der Minderungskosten für die Einhaltung von NEC-Vorgaben auf nationaler Ebene erfolgte durch Lanigan et al. (2015) für Irland. Hierbei wurden Minderungsvorgaben für Ammoniakemissionen entwickelt und mit den Maßnahmenkosten zu einer nationalen Grenzkostenvermeidungskurve verknüpft.

1.5 Vorarbeiten

1.5.1 Ermittlung der Wirkung von Emissionsminderungsstrategien und der damit verbundenen Kosten

Die hier vorliegende Arbeit zur Ammoniakemissionsberechnung und zur Berechnung von Emissionsminderungskosten baut auf den Ergebnissen eines FuE-Vorhabens (FKZ 3718 51 242 0 „Ergänzende Untersuchungen zur Erstellung von Emissionsszenarien zur Umsetzung der NEC-Richtlinie“, kurz EMMa-L – Emissions-Minderungsmaßnahmen Landwirtschaft) und dem daraus entstandenen Bericht von Häußermann et al. (2020) auf. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein geeigneter Maßnahmenkatalog zur Minderung von Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft erstellt (Tabelle 1) sowie ein Berechnungstool entwickelt, das die Emissionen der Maßnahmen differenziert nach Verfahrensabschnitt (Stall – Lager – Ausbringung – [Weide]) bestimmt und hinsichtlich ihrer Minderungswirkung auf relevante Luftschadstoffe der Quellgruppe Landwirtschaft bewertet. Mithilfe dieses Berechnungstools wurden *ex-post*-Berechnungen der Emissionen für den Zeitraum 1990 bis 2016 erstellt, um Maßnahmen und Szenarien gegenüber dem Referenzjahr 2005 bewerten zu können. Unter Einbeziehung der Fortschreibung landwirtschaftlicher Aktivitätsdaten im Jahr 2016 (Haenel et al., 2018) und ausgehend von der Thünen-Baseline 2017 – 2027 (Offermann et al., 2018) wurden Emissionsprognosen für die Jahre 2020, 2025 und 2030 erstellt, die die bis zum 31. Dezember 2016 in der Klimaschutz- bzw. bis zum 1. September 2017 rechtskräftig beschlossenen Maßnahmen der Luftreinhaltepolitik berücksichtigen (Thünen-Baseline-Szenario oder Bl-Szenario). Das Thünen-Baseline-Szenario entspricht dabei den landwirtschaftlichen Maßnahmen im WM-Szenario der NEC-Richtlinie und schreibt die Emissionen auf Grundlage der aktuellen Entwicklung der Quellgruppe Landwirtschaft und bereits rechtsverbindlich beschlossenen Maßnahmen der Klima- und Luftreinhaltepolitik (Stand 2017) für die Jahre 2020, 2025 und 2030 fort, wobei für die vorliegende Untersuchung vor allem Bl2030 von Relevanz ist. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben ist das nationale Luftreinhalteprogramm alle vier Jahre zu aktualisieren, dementsprechend ist im Jahr 2023 mit einem aktualisierten Programm zu rechnen.

Tabelle 1: Maßnahmen für die NEC-Compliance-Szenarien und deren Kurzbeschreibung

MNr.	Maßnahmenbeschreibung
Wirtschaftsdüngerausbringung	
1b	Verkürzung der Einarbeitungszeit auf < 1 h für flüssige Wirtschaftsdünger (Gülle, Gärreste, Jauche) sowie Festmist (Rinder, Schweine und Geflügel) auf unbestelltem Ackerland; einschl. Verbot von Breitverteilern für Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger auf Ackerland; außerdem Umsetzung der Einarbeitungspflicht auf unbestelltem Ackerland auch auf Festmist von Pferden und Schafen
2b	Ausbringung von flüssigem Wirtschaftsdünger auf bewachsenem Ackerland mit Schlitzverfahren oder alternativ Schleppschlauch mit Ansäuerung
3b	Ausbringung von flüssigem Wirtschaftsdünger auf Grünland mit Schlitzverfahren oder alternativ Schleppschlauch mit Ansäuerung
3c	Ansäuerung von 50 % der Rinder- und 50 % der Schweinegülle
3d	Ansäuerung von 50 % der Gärreste
Wirtschaftsdüngerlagerung	
4a	Verpflichtende Abdeckung (mindestens mit Folie) von offenen Lagern flüssiger Wirtschaftsdünger
4b	Ergänzend zu 4a) 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle werden im Außenlager gelagert und (mindestens mit Folie) abgedeckt
4c	Abdeckung von Rinder- und Schweinefestmist
4h	Verpflichtende Abdeckung (mindestens mit Folie) von offenen Lagern flüssiger Wirtschaftsdünger in BImSchV-G+V-Anlagen[1], 50 % Umsetzung
Maßnahmen im Stall	
Xg	Weitere unspezifische Maßnahmen mit 40 % Emissionsminderung in Schweineställen von BImSchV-V-Anlagen[1], 50 % Umsetzung
Abluftreinigung	
5g	Abluftreinigung in nach BImSchV-G-Anlagen[1], Schweine und Geflügel ohne Puten, 50 % Umsetzung
Fütterung	
6g	Reduzierung der NH_3-Emissionen im Stall um 20 % in BImschV-G+V-Anlagen[1] (ohne Rinder) durch stark und sehr stark N-reduzierte Fütterung, 50 % Umsetzung
Synthetische N-Dünger	
MD1b	Ersatz von Harnstoff und AHL durch KAS
MD2a	Senkung der N-Überschüsse durch 20 kg N/ha LF geringere Mineraldüngerzufuhr

[1] BImSchV-G-Anlagen: Genehmigungsverfahren gemäß § 10 BImSchG (mit Öffentlichkeitsbeteiligung) (obere BImSchV-Grenze nach 4. BImSchV, 2. Mai 2013, neugefasst durch Bekanntmachung vom 31.5.2017, BGBl. I 1440); BImSchV-V-Anlagen: Vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG (mit Öffentlichkeitsbeteiligung) (untere BImSchV-Grenze nach 4. BImSchV, 2. Mai 2013, neugefasst durch Bekanntmachung vom 31.5.2017, BGBl. I 1440)

Des Weiteren wurden vier ergänzende NEC-Compliance-Szenarien entwickelt, welche den Anforderungen der NEC-Richtlinie entsprechen und aus den definierten Einzelmaßnahmen zusammengesetzt sind, außerdem ein vom nationalen Luftreinhalteprogramm unabhängiges „TA Luft"-Szenario („TA Luft 50", entspricht einem Umsetzungsgrad der technischen Anforderungen der TA Luft von 50 %) (Tabelle 2). Dieses Szenario enthält Maßnahmen zur Emissionsminderung, welche im Referentenentwurf der TA Luft vom 16. Juli 2018 aufgeführt sind (BMU, 2018).

Häußermann et al. (2020) bewerten neben der Minderungswirkung der Einzelmaßnahmen des Maßnahmenkatalogs auch die Minderungswirkungen der Szenarien in Bezug auf die Emissionen der Thünen-Baseline-Szenarien für 2020, 2025 und 2030 sowie die des Referenzjahres 2005 der neuen NEC-Richtlinie. Demnach ergibt sich für das Jahr 2030 eine Reduktionsverpflichtung von 181 kt NH_3 (Häußermann et al., 2020), welche nicht allein durch das WM-Szenario 2030 erreicht werden kann. Folglich sind zusätzliche Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen erforderlich, die mit den Szenarien (NEC 1 – 4 und „TA Luft 50") abgebildet werden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Reduktionsverpflichtungen für das Zieljahr 2030 mit den Szenarien teilweise nur bedingt erreicht werden können. Je nachdem ob Klein- und

Kleinstbetriebe bei der Umsetzung der Maßnahmen eingeschlossen werden, erreichen die Szenarien die Reduktionsverpflichtungen nicht in vollem Umfang.

Tabelle 2: Übersicht der Maßnahmenkombinationen der NEC-Compliance-Szenarien

MNr.	Kurzbeschreibung	NEC 1	NEC 2	NEC 3	NEC 4	TA Luft 50
1b	Einarbeitung flüssiger WSD < 1 h	X	X	X	X	
2b	Schlitzverfahren bei flüssigen WSD auf bewachsenem Ackerland oder Ansäuerung		X	X		
3b	Schlitzverfahren bei flüssigen WSD auf Grünland oder Ansäuerung			X		
3c	Ansäuerung 50 % Gülle	X	X		X	
3d	Ansäuerung 50 % Gärreste	X			X	
4a/h	Abdeckung flüssiger WSD mit Folie	X	X		X	X
4b	Unterflur gelagerte Gülle in Außenbehältern			X		
4c	Abdeckung von Festmist/Einhausung			X		
Xg	Unterschiedliche Stallbautechniken in Schweineställen					X
5g	Abluftreinigung und Schweine- und Geflügelställen (Neubauten)					X
6g	Angepasste Fütterung					X
MD1b	Ersatz von Harnstoff durch KAS	X	X	X	X	
MD2a	Absenkung N-Düngung um 20 kg N ha^{-1} LF				X	

Die Berechnung der Emissionsminderungskosten baut auf die Ergebnisse eines UBA-Vorhabens und auf ein DBU-Vorhaben auf. Im Rahmen des UBA Vorhabens „Systematische Kosten-Nutzen-Analyse von Minderungsmaßnahmen für Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft für nationale Kostenabschätzungen“ FKZ 312 01 287 (Döhler et al. 2011) wurde ein Ansatz zur Berechnung von Emissionsminderungskosten bei der Ausbringung und Lagerung von Gülle sowie für die Berechnung der Minderungskosten bei der angepassten Fütterung von Mastschweinen entwickelt. Darüber hinaus entstand im Rahmen des DBU-Vorhabens „Konzeptentwicklung für einen zukunftsfähigen und gesellschaftlich konsensfähigen Mastschweinestall unter Einbeziehung der Ansprüche an Tierwohl, Tiergesundheit, Klimaschutz, Umweltschutz und Arbeitsplatzqualität“ AZ 91017/12 (Döhler et al 2020) ein skalier- und zeitreihenfähiges Kalkulationsmodell für die Berechnung der Kosten diverser Mastschweinehaltungssysteme, welches die modulartige Einknüpfung von Techniken ermöglicht und eine Leistungskostenrechnung einschließlich weiterer wirtschaftlicher Erfolgsgrößen (z.B. Mehrkosten) zulässt.

1.5.2 Hotspotregionen der Tierhaltung in Deutschland

Für eine eingehendere Analyse zum Nährstoffexportbedarf aus Gebieten mit hohem P-Überhang wurden fünf Regionen mit jeweils mehreren benachbarten Kreisen definiert, die sich durch eine, im Vergleich zu benachbarten Regionen, höhere Konzentration der Tierhaltung auszeichnen. Diese Regionen kennzeichnet eine in sich verhältnismäßig einheitliche Agrarstruktur. Sie unterscheiden sich darin aber erheblich untereinander und gegenüber Gebieten, die außerhalb dieser Hotspotregionen liegen, sind von diesen Gebieten aber nicht scharf abgrenzbar. Die Festlegung auf diese fünf Regionen erfolgte daher nicht nach rein objektiven Maßstäben. Die fünf Regionen sind:

- Münsterland (1) mit den Kreisen Borken, Coesfeld, Steinfurt und Warendorf,

- Vechta-Cloppenburg (2) mit den Kreisen Cloppenburg, Emsland, Grafschaft Bentheim und Vechta,
- Ostwürttemberg/Mittelfranken (3) mit den Kreisen Hohenlohekreis, Schwäbisch Hall und Ansbach,
- Allgäu (4) mit den Kreisen Ravensburg, Lindau (Bodensee), Ostallgäu, Unterallgäu und Oberallgäu und
- Südostbayern (5) mit den Kreisen Altötting, Ebersberg, Erding, Mühldorf a. Inn, Rosenheim und Traunstein.

Jeweils ohne die kreisfreien Städte, die innerhalb dieser Gebiete liegen.

Diese fünf Regionen umfassen zusammen 1,5 Mio. ha LF (9,3 % der LF Deutschlands insgesamt) und haben einen Viehbestand von 2,8 Mio. GVE (22,2 % der GVE Deutschlands). Sie haben somit eine Viehbesatzdichte, die mit 1,8 GVE/ha LF doppelt so hoch ist als im deutschen Durchschnitt (0,77 GVE/ha LF). In diesen fünf Regionen stehen 2,3 Mio. Rinder (19 %), 9,6 Mio. Schweine (35 %) und 16,5 Mio. Legehennen (31,3 %). Sie sind jedoch untereinander sehr heterogen: Während in den beiden süddeutschen Regionen Allgäu und Südostbayern die Rinder- und Milchviehhaltung dominiert und der Anteil von Dauergrünland (mit 72 % der LF im Allgäu und 42 % in Südostbayern) weit über dem deutschen Durchschnitt (28 % der LF) liegt, hat die Schweine- und Legehennenhaltung mit Anteilen von jeweils 0,3 bis 1,2 % an den deutschen Beständen eine untergeordnete Bedeutung. Die beiden nordwestdeutschen Regionen Münsterland und Vechta-Cloppenburg sind v. a. für die Schweinehaltung mit einem Anteil von 15 bzw. 17 % von herausragender Bedeutung und haben mit 4 bzw. 5 % der Rinder eine überdurchschnittliche Konzentration der Rinderhaltung (hier v. a. in der Rindermast, nicht jedoch in der Milchviehhaltung, die mit 2,1 bzw. 2,3 % genau dem Anteil dieser Regionen an der LF entsprechen) zudem haben sie mit 86 bzw. 85 % einen überdurchschnittlichen (71 % für Deutschland) Anteil Ackerland. Die Region Vechta-Cloppenburg zeichnet sich zudem durch eine sehr hohe Konzentration der Legehennenhaltung (25 % des deutschen Bestandes) und durch eine überdurchschnittliche Konzentration von Biogasanlagen (5,7 % der installierten Leistung von Vor-Ort-Verstromungsanlagen) aus. Die Region Ostwürttemberg/Mittelfranken beheimatet zwar viele Betriebe zur Ferkelaufzucht, ist jedoch insgesamt durch eine im Vergleich zu den vier anderen Regionen geringere Konzentration der Viehhaltung (Viehbestandsdichte von 1,0 GVE/ha LF) gekennzeichnet. In den fünf Hotspotregionen befindet sich zudem 15 % der installierten Leistung aller landwirtschaftlichen Biogasanlagen zur Vorortverstromung (d. h. ohne Biomethanaufbereitung und Bioabfallvergärung) (s. Tabelle 3).

Tabelle 3: Landwirtschaftliche Struktur der fünf Hotspotregionen der Tierhaltung im Vergleich zu Deutschland insgesamt im Mittel der Jahre 2016 bis 2018

Region	LF insgesamt 1000 ha (% von DE gesamt)	Ackerland 1000 ha (%)	Dauer-grünland 1000 ha (%)	Getreide 1000 ha (%)	Vieh-bestand 1000 GVE (%)	Rinder 1000 Stück (%)	Darunter Milchvieh 1000 Stück (%)	Schweine 1000 Stück (%)	Darunter Mast-schweine 1000 Stück (%)	Lege-hennen 1000 Stück (%)	Vieh-besatz-dichte GVE/ha LF	Inst. Leistung Biogas MW
Deutschland	16.664	11.755,3	4.708	6.250,0	12.824	12.236	4.167	27.334	12.105	52.571	0,77	4.274
Münsterland	342 (2,1)	294 (2,5)	46 (1,0)	185 (3,0)	725 (5,7)	481 (3,9)	87 (2,1)	4.022 (14,7)	1.824 (15,1)	1.796 (3,4)	2,1	149 (3,4)
Vechta-Cloppenburg	382 (2,3)	323 (2,7)	43 (0,9)	143 (2,3)	1.050 (8,2)	594 (4,9)	94 (2,3)	4.617 (16,9)	2.015 (16,6)	12.975 (24,7)	2,8	245 (5,7)
Ostwürttem-berg/Mittel-franken	226 (1,4)	155 (1,3)	70 (1,5)	88 (1,4)	222 (1,7)	200 (1,6)	66 (1,6)	725 (2,7)	226 (1,9)	521 (1,0)	1,0	76 (1,8)
Allgäu	312 (1,9)	91 (0,8)	226 (4,8)	25 (0,4)	436 (3,4)	525 (4,3)	259 (6,2)	84 (0,3)	42 (0,3)	586 (1,1)	1,4	75 (1,8)
Südost-bayern	287 (1,7)	164 (1,4)	121 (2,6)	74 (1,2)	409 (3,2)	513 (4,2)	197 (4,7)	184 (0,7)	94 (0,8)	628 (1,2)	1,4	96 (2,2)
Summe der Hotspot-regionen	1.549 (9,3)	1.027 (8,7)	506 (10,7)	515 (8,2)	2.842 (22,2)	2.213 (18,9)	703 (16,9)	9.632 (35,2)	4.201 (34,7)	16.504 (31,4)	1,8	638 (15,0)

1.6 Ziele des Vorhabens

Aufbauend auf die Arbeiten des Vorhabens EMMa-L wurden mit dem hier vorliegenden Bericht Berechnungen zur Ammoniakemissionsminderung und deren Kosten nicht nur auf nationaler, sondern auf regionaler Ebene durchgeführt. Dementsprechend war es zunächst Ziel des Vorhabens, eine Kalkulationsmethode zu entwickeln,

mit der regional aufgelöst auf Kreisebene

- die Ammoniakemissionen und die Emissions-Minderungskosten aus einem konsistenten Datensatz,
- Emissions- und Kostenzeitreihen,
- die Wirkung von Emissions-Minderungsmaßnahmen,
- Prognosen / Projektionen
- sowie Effekte der Minderungsmaßnahmen auf die regionale Ammoniak-Immissionskonzentration

kalkuliert werden können.

Bei den Berechnungen werden der IRPP BREF und die darin identifizierten BVT für die Intensivtierhaltung in den Szenarien entsprechend berücksichtigt.

Zusammenfassend beschreibt der vorliegende Bericht daher im Wesentlichen die Auswirkungen von Maßnahmen und Szenarien auf die Ammoniak-Emissionsmengen im Hinblick auf die Minderungsziele für Ammoniak im Jahr 2030 und der dem landwirtschaftlichen Sektor, insbesondere der Nutztierhaltung, entstehenden Kosten für die inhaltliche Einhaltung der NEC-RL, nicht aber der Bürokratieaufwand. Weitere Parameter, wie der Umweltnutzen (z.B. Verbesserung der Umweltwirkung, Erhalt von Ökosystemen) und die weitergehenden gesamtwirtschaftlichen Kosten (z. B. Auswirkungen auf Wertschöpfung oder Wettbewerbsfähigkeit) werden ebenfalls nicht betrachtet. Weiterhin umfasst der Bericht Maßnahmen und Szenarien, die im nationalen Luftreinhalteprogramm nicht oder in abweichender Form berücksichtigt werden.

Die Maßnahmen und Szenarien wurden -wie im Vorhaben EMMa-L- im Hinblick auf ihr Minderungspotenzial sowie unter Berücksichtigung ihrer vermuteten Kosteneffizienz, der technischen Umsetzbarkeit und Zuverlässigkeit ausgewählt. Im Gegensatz zum Vorhaben EMMa-L werden nicht nur spezifische Minderungskosten aufgrund von Literaturanalysen ermittelt, sondern auf Verfahrensebene, regional aufgelöst mit einem Bottom-up-Ansatz berechnet. Somit ist es möglich, die Mehrkosten, die für die Emissionsminderung aufgewendet werden müssen auf regionaler Ebene über differenzierte verfahrensabhängige Kostenanalysen unter Berücksichtigung der regionalen Agrarstruktur zu ermitteln und abschließend auf die nationale Ebene zu aggregieren. Somit sind mit der Methodik auch regionale Emissions-, Immissions- und Kostenanalysen für Ammoniak möglich, die beispielhaft für die Hotspotregionen der deutschen Tierhaltung (Münsterland, Vechta-Cloppenburg, Ostwürttemberg/Mittelfranken, Allgäu und Südostbayern (Häußermann et al. (2019)) durchgeführt wurden (s. Kapitel 1.5.2). Abschließend werden die Kosten auf nationaler Ebene in einer Zeitreihe bis 2030 addiert, um die dem Sektor entstehenden Erfüllungskosten zur Einhaltung der gesetzlichen Emissionsminderungsvorgaben zu ermitteln.

Die Bewertung der Maßnahmen und Szenarien im vorliegenden Bericht erfolgt methodisch kohärent mit den im ersten nationalen Luftreinhalteprogramm dargestellten Maßnahmen und Szenarien (BMU 2019/Häußermann et al. 2020). Die in dem Bericht zugrundeliegenden Emissionsberechnungen sind kohärent zum landwirtschaftlichen Teil des Nationalen Emissionsinventars, Stand Submission 2018 für 2016 (Haenel et al. 2018). Die Ergebnisse im Bericht sind damit methodisch kohärent mit den weiteren Berichtspflichten aus EU-Recht und internationalen Verträgen des Umweltbundesamtes zu umweltrelevanten Stickstoffverbindungen.

2 Methodik

2.1 Übersicht

Unter Nutzung der in Häußermann et al. (2020) beschriebenen Methode zur Bestimmung von Ammoniakemissionen bei der Umsetzung von Minderungsmaßnahmen und Szenarien und der entwickelten NEC-Szenarien (s. Kapitel 1.1) werden die absoluten Ammoniakemissionen und -minderungswirkungen berechnet, die sich bei der Umsetzung der Szenarien in der bestehenden Agrarstruktur sowohl auf Hotspot- als auch auf Bundesebene in den Verfahrensabschnitten ergeben.

In einem zweiten Schritt werden die sich daraus ableitenden Emissionsdifferenzen zwischen dem WM-Szenario der NEC-Richtlinie (entspricht den Emissionsprognosen des Thünen-Baseline-Szenarios des Jahres 2030; Offermann et al., 2018) und den definierten Szenarien bestimmt. Da die Agrarstruktur der Untersuchungsregionen differenziert nach Betriebsgrößenklassen und Haltungssystemen abgeleitet wurde (s. Kapitel 1.1), kann die Minderungswirkung sowohl auf Ebene der (Tier)Kategorien, der Stallhaltungssysteme und der Verfahrensschritte als auch der einzelnen Betriebsgrößenklassen innerhalb der Kategorien abgeleitet werden.

Die Klassierung der Minderungswirkung nach Größenklasse ist insofern von Bedeutung, als bei der Kalkulation von Verfahrenskosten für verschiedene Minderungsmaßnahmen betriebsgrößenklassenabhängige, degressive Ammoniak-Minderungskosten berechnet wurden (s. Kapitel 0). Die spezifischen Minderungskosten, angegeben in Euro je Kilogramm gemindertem Ammoniak, wurden für unterschiedliche Verfahren zur Emissionsminderung bei Wirtschaftsdüngerlagerung, -ausbringung und Stallhaltungssystemen berechnet und den Maßnahmen des Katalogs zugeordnet.

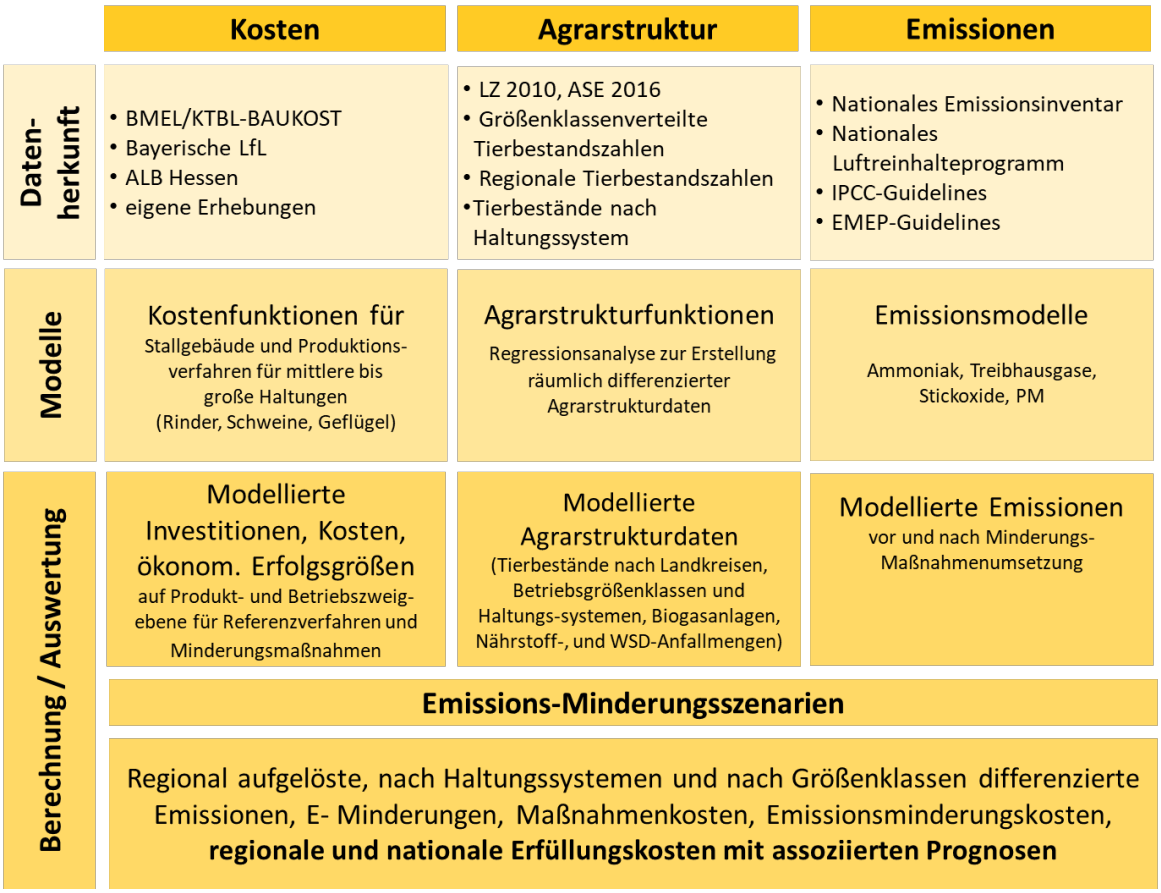
Im letzten Schritt wird die durch die Umsetzung der Einzelmaßnahmen erwartete Minderungswirkung mit den jeweiligen spezifischen Minderungskosten verschnitten und zu den Gesamtkosten der jeweiligen Szenarien aufaddiert (s. Kapitel 2.5).

Zur Berechnung der für die Einhaltung der NEC-Richtlinie entstehenden Erfüllungskosten bzw. der Kosten zur Minderung der Ammoniakemissionen auf Hotspotebene sind die folgenden Datensätze grundlegend erforderlich:

- Regional aufgelöste Tierbestände und Haltungen der jeweiligen Regionen, differenziert nach Größenklassen.
- Ist-Situation der Ammoniakemissionen resp. Emissionsprojektionen des Thünen-Baseline-Szenarios (Häußermann et al., 2020) sowie Ammoniakemissionen bei Umsetzung der Minderungsmaßnahmen und -szenarien auf die gegebene landwirtschaftliche Struktur, ebenfalls differenziert nach Größenklassen.
- Verfahrensmehrkosten zur Minderung von Ammoniakemissionen bei Wirtschaftsdüngerlagerung, -ausbringung und Stallhaltung (spezifische Minderungskosten).

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Methodik. Die folgende Methodenbeschreibung erläutert, in welcher Weise die Datensätze gewonnen und miteinander verschnitten werden, um im letzten Schritt die erwarteten Kosten der definierten Szenarien zur Minderung der Emissionen auf die berechneten Niveaus abschätzen zu können.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Methodik zur Berechnung der Kosten



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

2.2 Landwirtschaftliche Struktur- und Aktivitätsdaten

2.2.1 Ableitung größenklassenverteilter Strukturdaten

Für die Berechnung der Ammoniakemissionen differenziert nach (Tier)Kategorien, Größenklassen und Haltungssystemen sowie die Bewertung der Verfahrenskosten ist eine detaillierte Kenntnis zur aktuellen Struktur der Rinder-, Schweine-, Geflügelhaltung und Biogaserzeugung und deren Größenklassenverteilung sowohl in den fünf Hotspotregionen als auch auf nationaler Ebene erforderlich. Die Mineraldüngung hat dagegen keinen unmittelbaren Anlagenbezug und wurde daher nicht in die Größenkategorisierung aufgenommen.

Zunächst wurde eine Einteilung der landwirtschaftlichen Betriebe und Anlagen anhand ihrer Tierplatzkapazitäten bzw. ihrer Leistung in Größenklassen vorgenommen (Tabelle 4), um skalenabhängige Emissionen und Kosten abbilden zu können (s. Kapitel2.4). Folgende (Tier)Kategorien und deren bestehende Haltungsverfahren wurden berücksichtigt:

- Milchvieh (Anbindestall und Laufstall jeweils für gülle- und strohbasierte Systeme),
- übrige Rinder (Anbindestall und Laufstall jeweils für gülle- und strohbasierte Systeme),
- Zuchtsauen (Teil- und Vollspaltenboden sowie planbefestigte Systeme),
- Mastschweine (Teil- und Vollspaltenboden sowie planbefestigte Systeme),
- Legehennen (Volieren-, Boden- und Freilandhaltung),

- Energiepflanzenvergärung (Biogasanlagen und Biomethananlagen [ohne Bioabfallvergärung] sowie Biogasanlagen mit Bioabfallvergärung),
- N-Mineraldünger.

Tabelle 4: Übersicht der (Emittenten) Kategorien und deren Einteilung in Größenklassen abhängig von der Tierplatzkapazität in Stück bzw. Leistung in kW[1]

Kategorie	Größenklasse				
	1	2	3	4	5
Milchvieh	1 – 9	10 – 49	50 – 99	100 – 199	> 199
Übrige Rinder	1 – 9	10 – 49	50 – 99	100 – 199	> 199
Zuchtsauen	1 – 99	100 – 249	250 – 499	> 500	-
Mastschweine	1 – 499	500 – 999	1.000 – 1.999	> 1.999	-
Legehennen	1 – 99	100 – 14.999	15.000 – 39.999	> 39.999	-
Biogasanlagen	1 – 250	250 – 500	500 – 750	750 – 1.000	> 1.000

[1] Betrifft die Kategorie „Biogasanlagen“.

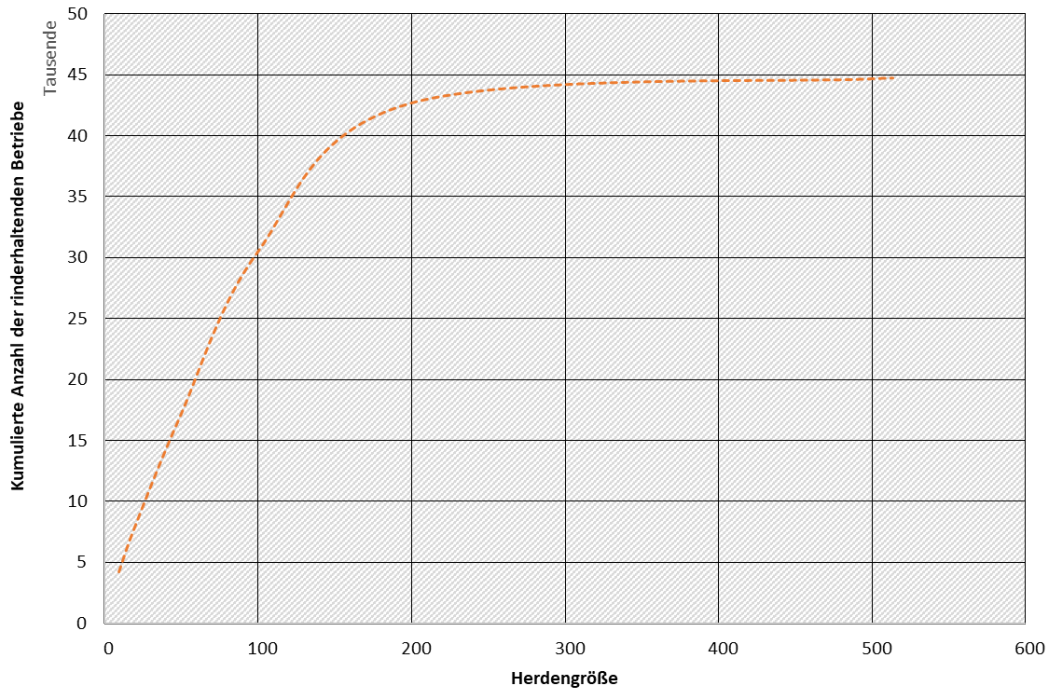
Andere Tierkategorien wie Ferkel, Broiler, Pferde, Ziegen etc. werden bei der Emissionsermittlung zwar mit abgebildet, jedoch werden keine Minderungsmaßnahmen und dementsprechend auch keine Minderungskosten berechnet.

Zur Herleitung der Daten über die Häufigkeitsverteilung der Haltungsverfahren, Größenklassenverteilung und Weidehaltung sowie der Anzahl der Tiere innerhalb der Haltungssysteme und deren Größenklassen wurden Regressionsfunktionen basierend auf Datensammlungen des Statistischen Bundesamts zur landwirtschaftlichen Struktur für alle Kreise (resp. 299 in Häußermann et al. (2019) definierten Kreisregionen) für das Jahr 2016 erstellt. Die Ergebnisse der betroffenen Kreise wurden für die fünf Untersuchungsgebiete und Deutschland insgesamt aggregiert. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Regressionsfunktionen wird im Folgenden beschrieben:

Das Statistische Bundesamt veröffentlicht im Rahmen der Landwirtschaftszählung (LZ) und der Agrarstrukturerhebung (ASE) periodisch Daten zur landwirtschaftlichen Struktur auf Ebene des Bundes und der Länder. Die Datensätze enthalten u.a. Informationen zu Tierbestandszahlen, zur Anzahl der tierhaltenden Betriebe klassiert nach Tierart, Daten zu tierhaltenden Betrieben und Haltungsplätzen, gegliedert nach genutzter landwirtschaftlicher Fläche, GVE und Betriebsgrößenklasse (Statistisches Bundesamt, 2017a) sowie Daten zum Tierbestand und zur Anzahl von tierhaltenden Betrieben nach Stallverfahren und nach Größenklasse innerhalb der jeweiligen Stallverfahren (Statistisches Bundesamt, 2011).

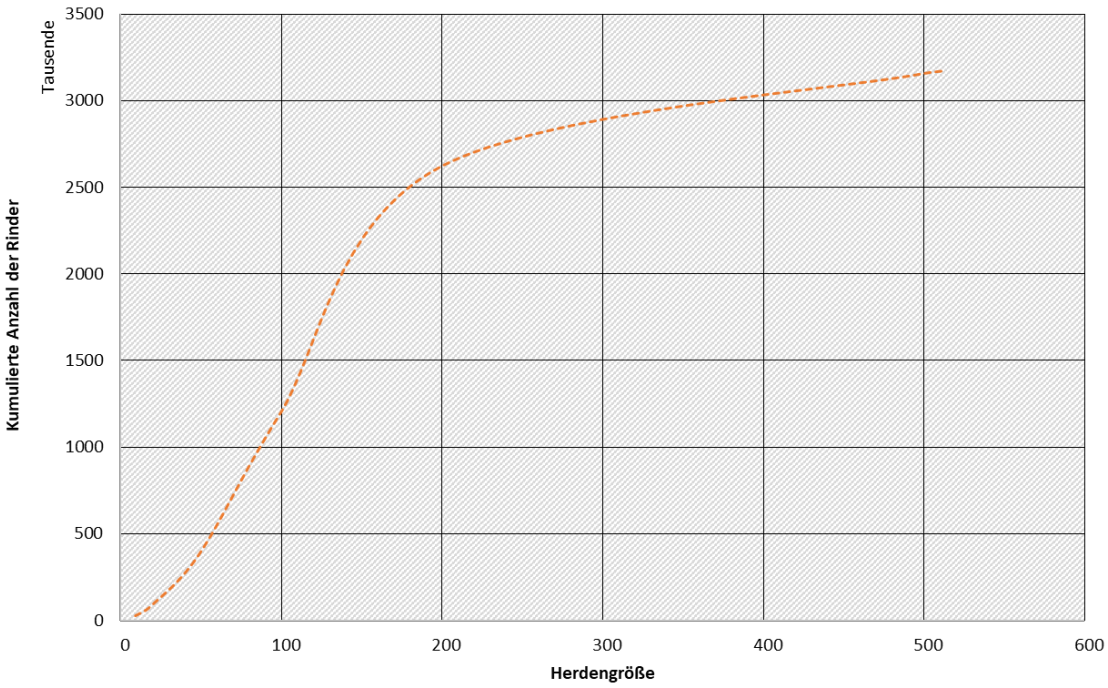
Zunächst werden herdengrößenabhängige Strukturdaten für die jeweiligen Bundesländer hergeleitet. Durch die vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Daten liegt die Anzahl der Betriebe und Tiere innerhalb der jeweiligen Bestandsgrößenklassen für die Tierkategorien vor. Anhand der durchschnittlichen Herdengröße und der jeweiligen zugeordneten Anzahl der Betriebe und des Tierbestands innerhalb dieser Größenklasse lassen sich Regressionsfunktionen ableiten, die die Anzahl der Betriebe und der Tiere in Abhängigkeit von der Herdengröße in den Bundesländern anzeigen können. Abbildung 2 und Abbildung 3 stellen beispielhaft auf Grundlage der Daten des Statistischen Bundesamts hergeleitete Regressionsfunktionen der herdengrößenabhängigen Verhältnisse exemplarisch für Rinder und rinderhaltende Betriebe in Bayern dar. Mangels weiterer Informationen wird davon ausgegangen, dass die für die Bundesländer abgeleiteten Funktionen auch die relativen, herdengrößenklassenabhängigen Verhältnisse der Strukturen in den Kreisen der jeweiligen Bundesländer beschreiben.

Abbildung 2: Beispiel für die über Regressionsanalysen ermittelte, kumulierte Anzahl der rinderhaltenden Betriebe in Bayern in Abhängigkeit von der Herdengröße



Quelle: Modifizierte Ergebnisse der ASE 2016; eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 3: Beispiel für die über Regressionsanalysen ermittelte, kumulierte Anzahl der Rinder in Bayern in Abhängigkeit von der Herdengröße



Quelle: Modifizierte Ergebnisse der ASE 2016; eigene Darstellung, DöhlerAgrar

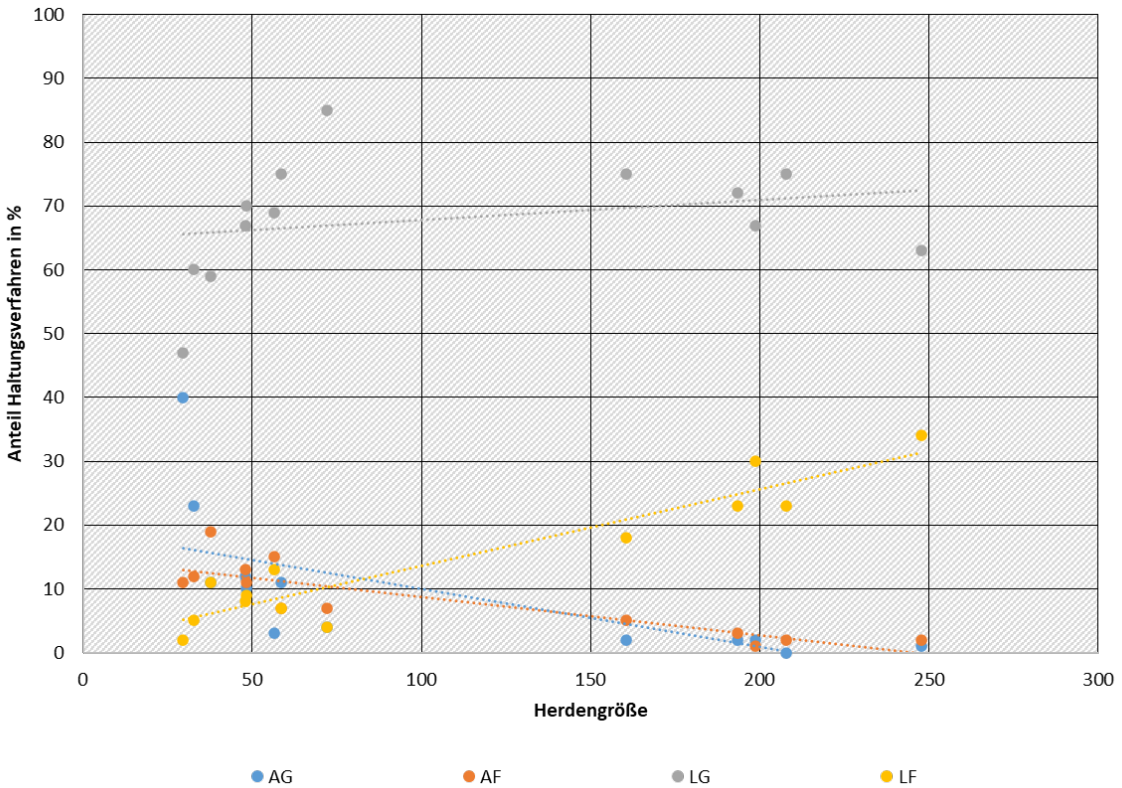
Für die Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der Haltungsverfahren in Abhängigkeit von der Herdengröße kann nur auf Strukturdaten, die auf Bundesebene aggregiert vorliegen zurückgegriffen werden. Basierend auf der durchschnittlichen Herdengröße und der den

Herdengrößen zugeordneten Daten zur Anzahl der Tiere in den jeweiligen Haltungsverfahren wird eine Regressionsfunktion bestimmt, die die Anteile des Haltungsverfahrens abhängig von der Herdengröße zeigt (Abbildung 4). Diese Regressionsfunktionen werden -mangels regional aufgelöster Informationen zur Verteilung der Stallverfahren- für alle Gebietsgliederungen eingesetzt.

In Ermangelung größenklassenverteilter Daten zur Anzahl der Haltungen auf Kreisebene wird auf eine kalkulatorische Näherung zurückgegriffen, mit der zunächst die Anzahl der Haltungen in den Kreisen anhand des Anteils der Tiere im jeweiligen Kreis an der Anzahl der Tiere im jeweiligen Bundesland bestimmt wird. Die Bestandsdaten wurden im Rahmen der N-Flächenbilanzierung (Häußermann et al., 2019) aus Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamts zur Agrarstruktur zusammengestellt. Auf Kreisebene ergibt sich dann die größenklassenverteilte Anzahl der Tiere bzw. der Haltungen aus den Regressionsgleichungen des jeweiligen Bundeslandes, die die herdengrößenabhängige Verteilung der tierhaltenden Betriebe abbildet (Abbildung 2 und Abbildung 3) und der Anzahl der Haltungen im Kreis. Durch Korrekturfaktoren wird sichergestellt, dass die Summe der größen- und verfahrensverteilten Tier- und Haltungszahlen über die Kreise der Anzahl für Deutschland entspricht.

Mit diesen Funktionen und den durchschnittlichen Herdengrößen der Größenklasse in den Kreisen als Eingangsgröße können für jede Größenklasse und kreisgenau die Anteile der Haltungsverfahren berechnet werden.

Abbildung 4: Häufigkeit der Haltungsverfahren für Milchvieh in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Herdengröße in Deutschland



AG = güllebasierter Anbindestall, AF = festmistbasierter Anbindestall, LG = güllebasierter Laufstall, LF = festmistbasierter Laufstall

Quelle: abgeleitet aus Ergebnissen der LZ 2010; eigene Darstellung, DöhlerAgrar

2.2.2 Ableitung der größenklassenverteilten Häufigkeit der nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftigen Betriebe

Das Szenario „TA Luft 50“ beinhaltet Maßnahmen für Tierhaltungen (4h, Xg, 5g, 6g), die nach 4. BImSchV (2. Mai 2013; neugefasst durch Bek. v. 31.05.2017) unter die genehmigungsbedürftigen Betriebe fallen. Genehmigungsbedürftig sind die Betriebe dann, wenn sie aufgrund ihrer Beschaffenheit oder Art des Betriebs in besonderem Maße dazu geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen oder Gefährdungen der Allgemeinheit zu verursachen. Je nach Größe oder Leistung – in diesem Fall ist die Tierplatzkapazität ausschlaggebend (Tabelle 5) – müssen die Anlagen Genehmigungsverfahren für BImSchV-G-Anlagen gem. § 10 BImSchG oder BImSchV-V-Anlagen gem. § 19 BImSchG (vereinfachtes Verfahren) durchlaufen. Die Kategorisierung erfolgt anhand der Größe oder Leistung nach Maßgabe der 4. BImSchV. Die Gesamtheit der landwirtschaftlichen Betriebe ist folglich nur anteilig von der TA Luft betroffen, dementsprechend werden die betreffenden Maßnahmen nur auf einen Teil der Nutztierhaltungen berechnet. Diese Anteile wurden separat von der untersuchten Tierkategoriegesamtheit betrachtet.

Unter die Regelung der 4. BImSchV fallende Gärrestlager in Biogasanlagen sind in der Beschreibung der Maßnahmen, welche im Rahmen der TA Luft umgesetzt werden, nicht mitinbegriffen (Tabelle 1). Daher werden die Häufigkeiten in den Größenklassen nur für die untersuchten Tierkategorien bestimmt. Wirtschaftsdüngerlager in Biogasanlagen werden bei den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Tabelle 5: Tierplatz-Schwellwerte für die unter die 4. BImSchV[1] fallenden Anlagen zur Haltung von Mastschweinen, Zuchtsauen und Legehennen

Tierart	2/3 der unteren Grenze	Untere Grenze	Obere Grenze
Mastschweine	1.000	1.500	2.000
Zuchtsauen	370	560	750
Legehennen	10.000	15.000	40.000

[1] 2. Mai 2013; neugefasst durch Bek. v. 31.05.2017

- **Obere und untere BImSchV-Abgrenzungen:** Betriebe mit Tierplatzahlen oberhalb der BImSchV-Grenze müssen ein Genehmigungsverfahren gem. § 10 BImSchG, solche mit unterhalb liegenden Tierplatzzahlen müssen ein Genehmigungsverfahren gem. § 19 BImSchG durchlaufen.

- **Unter die 4. BImSchV fallende absolute Tierzahl auf Bundesebene:** Die Anzahl der Betriebe, die nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftig sind, sowie die Anzahl der Tiere, die in genehmigungsbedürftigen Betrieben gehalten werden, werden nicht vom Statistischen Bundesamt veröffentlicht. Aus diesem Grund wurden bereits für das Projekt EMMa-L (Häußermann et al., 2020) benutzerdefinierte Abfragen an das Forschungsdatenzentrum der statistischen Ämter des Bundes und der Länder gerichtet, um daraus die Tierzahlen innerhalb der Abgrenzungen aus den Daten der ASE 2016 für das Jahr 2015 auf Bundesebene zu ermitteln. Durch die Abfragen liegt die Anzahl der Tiere, die in Deutschland in genehmigungsbedürftigen Betrieben gehalten werden, getrennt nach Tierkategorien vor. Diese im Rahmen von EMMa-L generierten Daten wurden für die Ableitung der größenklassenverteilten Anteile der genehmigungsbedürftigen Betriebe für die vorliegende Untersuchung verwendet.

- **Anteil der Tiere am Gesamtbestand und Anzahl der Tiere in den Bundesländern in den unter die 4. BImSchV fallenden Betrieben**: Anhand der absoluten Anzahl der Tiere innerhalb der Abgrenzungen werden die relativen Anteile (für die verschiedenen Tierkategorien) auf *Bundesebene* abgeleitet. Anhand dieser Anteile und der Anzahl der

Tiere nach Kategorie in den jeweiligen Bundesländern (Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Bayern, Baden-Württemberg), in denen die Hotspotregionen liegen, wird die Anzahl der Tiere innerhalb der Abgrenzungen der 4. BImSchV nach Tierkategorie auf *Länderebene* bestimmt. Dabei wird der Wert für das jeweilige Bundesland für die Untersuchungsgebiete übernommen.

- **Annäherung der durchschnittlichen „Grenz-Herdengrößen" der unter die 4. BImSchV fallenden Betriebe**: Für die Ermittlung der größenklassenverteilten Agrarstruktur wurden Regressionsfunktionen für die o.g. Bundesländer sowie für Deutschland abgeleitet, die anhand der Herdengröße als Eingangsgröße die Gesamtanzahl der Tiere ausgibt, die in kleineren oder gleich großen Herden im jeweiligen Gebiet gehalten werden (s. auch exemplarisch Abbildung 3 und Kapitel 2.2 zur genaueren Erläuterung der Ableitung der größenklassenverteilten Strukturdaten). Anhand der Regressionsfunktion, die die kumulierte Anzahl der Tiere in Abhängigkeit von der Herdengröße auf Bundesebene anzeigt, wird mit den zuvor ermittelten Tierzahlen innerhalb der Abgrenzungen auf Bundesebene die Eingangsgröße „Herdengröße" berechnet, welche den durchschnittlichen „Grenz-Herdengrößen" der Abgrenzungen der 4. BImSchV entspricht (was bspw. kontextual bedeutet, dass ein Betrieb ab einer Herdengröße von 344 Zuchtsauen unter die nach 4. BImSchV nach § 10 BImSchG genehmigungsbedürftigen Betriebe fällt). Zu beachten ist allerdings, dass es sich bei diesen „Grenz-Herdengrößen", die durch die ermittelten Regressionsfunktionen festgelegt werden, um Näherungen handelt, die von den tatsächlichen BImSchV-Grenzen abweichen.

- **Ableitung der absoluten Tierplatzzahlen innerhalb der unterschiedlichen Abgrenzungen auf Bundes- und Länderebene:** Mit der „Grenz-Herdengröße" als Eingangsgröße und der bundesländerspezifischen Regressionsfunktionen zur Bestimmung der kumulierten Anzahl der Tiere, welche im jeweiligen Gebiet (Bundesebene o. entsprechendes Bundesland) in den Herdengrößenklassen gehalten werden, wird die Anzahl der Tiere berechnet, die auf Bundes- bzw. Länderebene innerhalb dieser Abgrenzungen fallen. Das bedeutet beispielsweise, dass mit einer „Grenz-Herdengröße" von 344 Zuchtsauen je Betrieb 842.320 Zuchtsauen auf Bundesebene in Betrieben gehalten werden, die die obere BImSchV-Grenze überschreiten. In Nordrhein-Westfalen werden 151.192 Zuchtsauen in Betrieben gehalten, die die obere BImSchV-Grenze überschreiten.

- **Bestimmung der Anteile der unter die 4. BImSchV fallenden Tierplätze innerhalb der definierten Größenklassen**: Durch die Ableitung der größenklassenverteilten Strukturdaten (s. Kapitel 2.2) sind die absoluten Tierplatzzahlen innerhalb der definierten Größenklassen bekannt. Anhand dieser und der Anzahl der betroffenen Tiere (s. vorheriger Schritt) kann der Anteil der betroffenen Tierplätze in der jeweiligen Größenklasse berechnet werden. Beispielsweise werden auf Bundesebene 408.698 Zuchtsauen in Betrieben mit mehr als 499 Haltungsplätzen (Größenklasse 4) gehalten. Das bedeutet hinsichtlich des o.g. Beispiels, dass alle diese Zuchtsauen in Betrieben gehalten werden, die unter die Regelungen der 4. BImSchV fallen. In Größenklasse 3 (249 – 499 Haltungsplätze) werden 722.863 Zuchtsauen gehalten, was einem Anteil von 84,7 % der Sauen der Größenklasse entspricht, die in entsprechend betroffenen Betrieben gehalten werden. Die Sauen und Betriebe der Größenklassen 1 und 2 (1 – 99 bzw. 99 – 249) sind nicht von der 4. BImSchV betroffen.

2.3 Emissionen und Emissionsminderungseffekte der Maßnahmen und Szenarien

2.3.1 Ist-Situation der Ammoniakemissionen

Als Ausgangspunkt für die Berechnung der Ammoniakemissionen wird die Ist-Situation der NH_3-Emissionen des Jahres 2016 zugrunde gelegt. Diese wurde im Rahmen der nationalen Emissionsberichterstattung (Haenel et al. 2018) und den Untersuchungen von Häußermann et al. (2020) sowohl auf Bundesebene als auch auf Ebene der Länder ermittelt.

Um die Emissionen konvergent mit der Minderungswirkung der Nutztierhaltungssysteme und den größenklassenverteilten Minderungskosten zu verknüpfen, ist die Kenntnis der NH_3-Emissionen nach verschiedenen Haltungssystemen *und* Herdengrößenklassen erforderlich. Mithilfe der Methodik nach Häußermann et al. (2020) wurden daher getrennt für die Haltungssysteme länderspezifische, zusammengefasste NH_3-Emissionsfaktoren bestimmt. Mithilfe derer und den zuvor berechneten Tierbeständen der Haltungssysteme und Größenklassen können für die prozessstufenspezifischen Emissionen aus dem Stall, der Wirtschaftsdüngerlagerung und -ausbringung sowie dem Weidegang (bei rinderhaltenden Betrieben) abgebildet werden. Auf Grundlage der LZ 2010 (Statistisches Bundesamt, 2011) werden bei der Berechnung der Emissionen unterschiedliche Anteile der Weidezeiten innerhalb der Größenklassen berücksichtigt. Die Anteile der vergorenen Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen können nicht nach Anlagen-Größenklassen differenziert werden, da nicht bekannt ist, wie groß die Biogasanlagen sind, die den Wirtschaftsdünger aus den einzelnen Anlagen-Größenklassen verwerten.

2.3.2 Verknüpfung der Minderungseffekte mit den Agrarstrukturdaten

Mithilfe des EMMa-L-Berechnungstools werden absolute Emissionen einer Tierbestandsgröße getrennt nach (Tier)Kategorie, Haltungssystem und Verfahrensabschnitt (Stall – Lager – Ausbringung – [Weide]) bestimmt. Hinsichtlich der vergorenen Wirtschaftsdünger und der Anwendung von Mineraldüngern werden die Emissionen in den Verfahrensabschnitten Lager und Ausbringung resp. bei der Mineraldüngeranwendung allgemein bestimmt.

Die Emissionen des angenommenen Bestands werden zueinander in Relation gesetzt, sodass relative Minderungspotenziale der Maßnahmen/Szenarien vorliegen. Die Emissionen des Thünen-Baseline-Szenarios Bl2030 werden in Relation zu den Emissionen 2016 berechnet, die der Maßnahmen/Szenarien in Relation zu Bl2030. Die Berechnungen der Minderungspotenziale wurden sowohl für die Bundesländer (wobei länderspezifische zusammengefasste NH_3-Emissionsfaktoren berücksichtigt werden) als auch auf Bundesebene durchgeführt und sind methodisch identisch.

Die Methodik verknüpft die Minderungspotenziale mit den jeweiligen Agrarstrukturdaten. Minderungspotenziale können für jede Kategorie (für die Tierkategorien zusätzlich getrennt nach Haltungssystemen) und jeden Verfahrensabschnitt (Stall – Lager- Ausbringung – Weide) berechnet und mit den Emissionen des Basisjahres bzw. mit denen des Thünen-Baseline-Szenarios 2030 (Bl2030) in Beziehung gesetzt werden. Dabei werden die Minderungspotenziale über die Größenklassen hinweg und innerhalb eines bestimmten Haltungssystems und Bundeslandes als konstant angenommen.

Bei der Berechnung der Minderungswirkung der Maßnahmen, welche im Rahmen der TA Luft umgesetzt werden (4h, Xg, 5g, 6g), wird lediglich der jeweilige Anteil der von der 4. BImSchV betroffenen Betriebe in den Größenklassen berücksichtigt (s. Kapitel 2.2.2). Folglich liegen

absolute Emissionswerte und die daraus resultierende, absolute Minderungswirkung der Maßnahmen/Szenarien getrennt über die einzelnen Verfahrensschritte innerhalb der Stallverfahren größenklassenverteilt vor. Durch Aggregierung der Emissionen der einzelnen Kategorien ergibt sich die Summe der Ammoniakemissionen bei Umsetzung der Maßnahmen/Szenarien.

Die Anteile der Betriebe, für die die Maßnahmen im Rahmen des „TA Luft 50"-Szenarios berechnet werden, sind für die Tierkategorien und deren Größenklassen nicht identisch, weswegen eine näherungsweise Berechnung der Anteile durchgeführt wird. Hintergrund für die unterschiedlich hohen Anteile der betroffenen Betriebe in den Größenklassen sind die festgelegten Genehmigungsschwellwerte der 4. BImSchV der BImSchV-G bzw. -V-Anlagen in Verbindung mit den speziellen Definitionen der Minderungsmaßnahmen des Katalogs (s. Tabelle 5). Beispielsweise werden die Maßnahmen 4h und 6g in der Tierkategorie „Mastschweine" auf Bundesebene in jeweils 72,4 % der Betriebe der Größenklasse 4 umgesetzt, da wie beschrieben BImSchV-G- *und* -V-Anlagen mitinbegriffen sind. Maßnahme Xg wird in 19,2 % und 5g auf 53,3 % dieser Betriebe umgesetzt, da jeweils *nur* BImSchV-V- resp. BImSchV-G-Anlagen betroffen sind (Tabelle 1). Der Mittelwert dieser vier Werte wird gebildet und somit lautet die Annahme, dass das Szenario „TA Luft 50" in 54,3 % der Mastschweinebetriebe der jeweiligen Größenklasse umgesetzt wird (s. auch Kapitel 3.1.2 und Tabelle 26.)

2.3.3 Berechnung der regionalen Immissionskonzentration und Bewertung der Immissionen in den Hotspotregionen

Bisher wurden weder seitens des Bundes noch der Länder rechtlich bindende regionale Emissionshöchstwerte festgelegt bzw. wurden die nationalen Emissionsobergrenzen nicht auf die Regionen Deutschlands heruntergebrochen. Für die Beurteilung der Regionalszenarien wird daher der sog. integrierte Stickstoffindikator aus Schutzgutbetrachtungen des UBA-Vorhabens DESTINO (Heldstab et al., 2020) herangezogen, der sich an anerkanntem Wissen hinsichtlich ökologischer Belastungsgrenzen orientiert. Demnach gilt eine NH_3-Immissionskonzentration von 3 µg NH_3 m^{-3} Luft als kritische Grenze für stickstoffsensible höhere Pflanzen (Gefäßpflanzen).

Methodisch kann dieses Critical Level über maximal zulässige NH_3-Emissionen aus einer linearen Regression zwischen Ammoniakimmissionskonzentration (µg NH_3-N pro Kubikmeter Luft) und Ammoniakemissionen in kt NH_3-N pro Jahr und definierter Gitterzelle im Areal hergeleitet werden: Pro Gitterzelle darf die jährliche NH_3-N-Emission maximal 0,12 kt NH_3-N betragen, was auf Bundesebene aggregiert einem jährlichen Emissionsgrenzwert von 441 kt NH_3-N entspricht. Basierend auf den Berechnungen nach Heldstab et al. (2020) wird für die fünf Hotspotregionen aus den regionalen Emissionen eine schutzgutbezogene Bewertung der ermittelten Immissionskonzentration vorgenommen. Als Orientierung für die Bewertung wird der DESTINO-Zielwert in Höhe von 3 µg NH_3 m^{-3} Luft herangezogen. Anhand des nationalen Zielwerts von 441 kt NH_3-N und der nationalen Fläche wird ein flächenbezogener Richtwert R_3 in Höhe von 12,34 kg NH_3-N ha^{-1} abgeleitet, der dem Critical Level entspricht (Formel 1):

Formel 1

$$R_3 = (Z \times 10^6) \div Q$$

mit:

R_3 = Flächenbezogener Richtwert zur Einhaltung des DESTINO-Zielwerts von 3 µg NH_3 m^{-3} Luft in kg NH_3-N ha^{-1} a^{-1}

Z = Nationaler Emissionszielwert 441 kt NH_3-N a^{-1}

Q = Nationale Fläche 35.732.714 ha

Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Immissionen und Emissionen kann von den regionalen Emissionen auf die jeweilige Immissionskonzentration geschlossen werden. Beispielsweise entsprechen Immissionswerte von 6 und 9 µg NH_3 m^{-3} Luft einem flächenbezogenen Emissionswert von R_6 = 24,68 und R_9 = 37,02 kg NH_3-N (Formel 2):

Formel 2

$$I(g) = 0{,}2431g + 8e\text{-}15$$

mit:

I = Immissionswert in µg NH_3 m^{-3} Luft

g = flächenbezogener Emissionswert

2.4 Ermittlung der spezifischen Emissionsminderungskosten

Zur Ermittlung der Minderungskosten werden Mehrkosten gegenüber eines Referenzverfahrens ermittelt, die bei Umsetzung verschiedener Minderungstechniken in den Verfahrensschritten Stall, Wirtschaftsdüngerlagerung und -ausbringung sowie beim Mineraldüngermanagement entstehen. Den Kosten der Maßnahmen, die in der Regel einer Größendegression unterliegen, werden NH_3-Emissionsminderungspotenziale zugeordnet, sodass sich daraus die spezifischen Emissionsminderungskosten ergeben (die Mehrkosten, die bei der Emissionsminderung von einem Kilogramm Ammoniak entstehen).

Für die Berechnung der Verfahrenskosten und der Emissionsminderungskosten wird auf die Methodik und die Ergebnisse von Döhler et al. (2011) zurückgegriffen. Hierbei wurden NH_3-Minderungskosten für verschiedene Minderungstechniken ermittelt und bewertet (s. Kapitel 2.4.1). Dieser Ansatz wurde erweitert um die von Döhler (2020) beschriebene Methodik für Nutztierställe mit Skalierfunktionen zur Ermittlung von Verfahrenskosten und weiteren ökonomischen Erfolgsgrößen. Das Modell deckt aktuell übliche Stallkapazitäten der Rinder- Schweine- und Legehennenhaltung ab und kann modulartig mit diversen Minderungstechniken versehen werden. Daraus können Mehrkosten für verschiedene Verfahrenskombinationen errechnet werden, einschließlich der Berücksichtigung von Gutschriften (z.B. für eingesparte Arbeitsgänge oder Betriebsmittel).

2.4.1 Ausbringung von Wirtschaftsdüngern

Methodisch analog zu Döhler et al. (2011) wurden verschiedene Verfahren definiert, die die in der Praxis eingesetzten Ausbringverfahren von Gülle mit jährlichen Verfahrensleistungen von 1.000 bis 100.000 m^3 a^{-1} abbilden. Ermittelt wurden jeweils die Mehrkosten der verschiedenen Minderungsverfahren und Verfahrensleistungen gegenüber der Ausbringung mit Breitverteilern (Referenzverfahren). Die Mehrkosten, angegeben in € m^{-3}, werden mit den durch das jeweilig angewendete Verfahren erzielten Stickstoffeinsparungen in

kg NH_3 m^{-3} in Relation gesetzt. Daraus ergeben sich spezifische Minderungskosten der Verfahren, angegeben in Euro pro gemindertem Kilogramm Ammoniak, welche in einem weiteren Schritt den jeweiligen Maßnahmen des Maßnahmenkatalogs von Häußermann et al. (2020; s. dazu auch Tabelle 1) zugeordnet werden.

Da sich die ermittelten Mehrkosten der Verfahren und folglich auch die spezifischen Minderungskosten aus Döhler et al. (2011) auf die Breitverteilungstechniken beziehen, werden die spezifischen Minderungskosten für die differenziertere Berechnung der Mehrkosten auf den Verfahrensmix des jeweiligen Untersuchungsgebiets (Deutschland oder das jeweilige Bundesland) angepasst. Dazu wurden zunächst die Häufigkeiten der Ausbringverfahren, und die damit verbundenen, spezifischen Minderungskosten gegenüber der Ausbringung mit Breitverteiler ermittelt. Die Daten zur Bestimmung der Verfahrensanteile des jeweiligen Gebiets stammen ursprünglich aus der ASE 2016 und wurden im Rahmen des Vorhabens EMMa-L (Häußermann et al., 2020) beim Statistischen Bundesamt abgefragt. Die relative Minderungswirkung der Verfahren wurde im Rahmen von Döhler et al. (2011) durch die Auswertung von Fachliteratur ermittelt (Tabelle 6). Basierend auf diesen Untersuchungen wurden Investitionen und daraus resultierende Festkosten sowie variable Kosten für verschiedene Verfahrensleistungen zusammengestellt (Tabelle 7; veranschaulichend für die Ausbringung mit Schleppschlauch). Anhand dieser wurden die leistungsabhängigen Ausbringkosten für die Verfahren bestimmt (Tabelle 8). Für die Berechnung der aktuellen Minderungskosten werden die Ergebnisse aus 2011 durch Anpassungen der Kostenstrukturen und Investitionen auf das Kostenniveau von 2019/2020 aktualisiert. Die Aktualisierung erfolgt durch Auswertung von Erhebungen bei mehreren Herstellern für Applikationstechnik.

Im Rahmen der Berechnungen wurden Kostenspannen hinsichtlich der Ausbringungs- und Minderungskosten ermittelt. Den spezifischen NH_3-Minderungskosten, welche abschließend für die Berechnung der regionalen und nationalen Mehrkosten sowie der Erfüllungskosten (Kapitel 4) werden, wird eine Verfahrensleistung von 30.000 m^3 a^{-1} zugrunde gelegt. Damit wird angenommen, dass in der landwirtschaftlichen Praxis ein Verfahren mit hoher, jedoch nicht höchstmöglicher Auslastung eingesetzt wird, das geringe Kosten verursacht.

Tabelle 6: Relative NH_3-Emissionsminderung von Ausbringtechniken für Gülle

Variante	Rindergülle	Schweinegülle
	Minderung [%]	
Breitverteiler (Referenz)	-	-
Schleppschlauch	20	30
Schleppschuh	40	50
Schlitz (Scheiben)	60	60
Grubber	90	90
Einarbeitung innerhalb 1h	90	90
Einarbeitung innerhalb 4h	50	70
Verdünnung 1:1	50	50
Ansäuerung, 2 l m^{-3}	58	58
Ansäuerung, 5 l m^{-3}	93	93

Quelle: aus Döhler et al., 2011, verändert

Tabelle 7: Feste und variable Kosten für die Ausbringung von Gülle mittels Schleppschlauch abhängig von der Verfahrensleistung

Jährliche Verfahrensleistung [m^3 a^{-1}]				
1.000	**3.000**	**10.000**	**30.000**	**100.000**
Feste Kosten [€ a^{-1}]				
5.713	5.713	9.295	30.600	102.132
Variable Kosten [€ a^{-1}]				
4.203	8.075	31.075	95.425	222.336

Quelle: basierend auf Döhler et al., 2011, aktualisiert

Tabelle 8: Kosten für die Ausbringung von Gülle (2019) abhängig von der Verfahrensleistung

Variante	Jährliche Verfahrensleistung [m^3 a^{-1}]				
	1.000	**3.000**	**10.000**	**30.000**	**100.000**
	Ausbringkosten [€ m^{-3}]				
Breitwürfig (Referenz)	7,73	3,81	3,65	4,07	3,17
Schleppschlauch	9,92	4,60	4,04	4,20	3,24
Schleppschuh	10,75	5,23	4,80	5,11	-
Schlitz (Scheiben)	12,34	6,03	5,35	5,92	3,68
Grubber	11,81	6,20	5,08	5,89	3,27
Einarbeitung innerh. 1h	8,45	4,53	4,38	4,80	3,90
Einarbeitung innerh. 4h	8,16	4,24	4,09	4,51	3,61
Verdünnung 1:1	13,19	7,28	7,78	7,39	5,45
Schl.schl., Ansäuerung, 2 l m-3	-	-	-	5,84	-
Schl.schl., Ansäuerung, 5 l m-3	-	-	-	6,40	-

Quelle: basierend auf Döhler et al., 2011, aktualisiert

2.4.2 Lagerung von Wirtschaftsdüngern

2.4.2.1 Güllelagerung

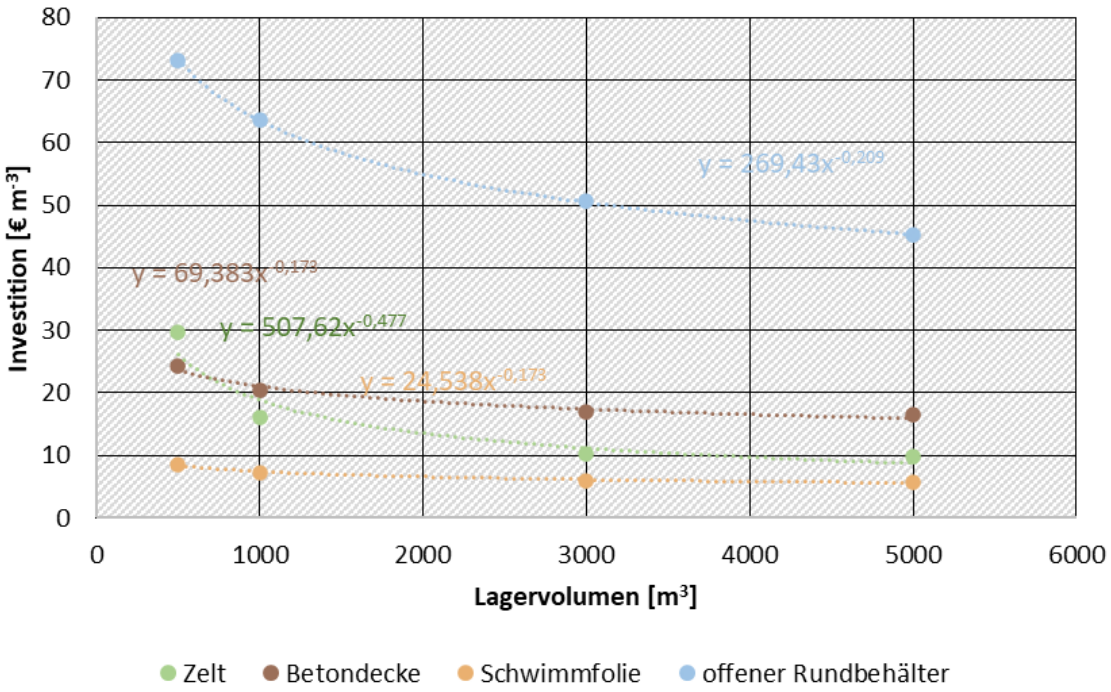
Basierend auf der Methodik von Döhler et al. (2011) wurden die Kosten für Abdeckungen von Wirtschaftsdüngerlagerbehältern für Gülle ermittelt, die Investitionsdaten wurden mithilfe von eigens durchgeführten Erhebungen und Daten der ALB Hessen (2018 und 2019) aktualisiert. Dabei wurden Abdeckungen für Rundbehälter (Schwimmfolie, Zeltdach, Betondecke) und Erdbecken mit Lagerkapazitäten von 500, 1.000, 3.000 und 5.000 m^3 (Rundbehälter) sowie für 7.500 m^3 (Erdbecken/nur Schwimmfolie) berücksichtigt. Ausgehend von den skalenabhängigen Investitionen der Lagerbehälter wurden volumenabhängige Degressionskurven für die Techniken abgeleitet (Tabelle 9 und Abbildung 5, s. auch Kapitel 2.4.2.1). Mithilfe der sich ergebenden Funktionen können Investitionen von Techniken zur Abdeckung von Wirtschaftsdüngerlagerbehältern für verschiedene Lagervolumina kalkuliert werden, die in das Kalkulationsmodell zur Berechnung der Kosten und Mehrkosten von Haltungsverfahren integriert werden (s. Kapitel 2.4.3).

Tabelle 9: Investitionen (2018) für die Abdeckung von Güllelagerbehältern mittels Betondecke in Abhängigkeit vom Lagervolumen

Variante	Lagervolumen	Investition	
	m³	€	€ m⁻³
Betondecke	500	12.184	24,37
	1.000	20.402	20,40
	3.000	50.748	16,92
	5.000	82.129	16,43

Quelle: basierend auf Döhler et al., 2011; aktualisiert

Abbildung 5: Spezifischer Investitionsbedarf 2018 für Güllebehälter und deren Abdeckung mittels Zeltdach, Betondecke und Schwimmfolie in Abhängigkeit von der Behältergröße



Quelle: basierend auf Döhler et al. 2011; eigene Darstellung, DöhlerAgrar

2.4.2.2 Gärrestlagerung

Für die Berechnung des Investitionsbedarfs und der darauf aufbauenden Ableitung der Minderungskosten für die Abdeckung von Gärrestbehältern in Biogasanlagen wurde eine 500 kW_{el}-Anlage mit einem Substratinput von 9.216 t und einem Gärrestlager von 4.545 m^3 (Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas, KTBL) zugrunde gelegt, welcher mittels Betondecke abgedeckt wird. Für die Anlagen der Größenklassen 4 und 5 wird angenommen, dass die Gärreste in 2 bzw. 3 Behältern gelagert werden.

Anhand dieser Annahmen und den durchschnittlichen installierten Leistungen der Anlagen der fünf definierten Größenklassen, welche mittels des Anlagendatensatzes nach Häußermann et al. (2019) bestimmt wurden, wurde das für die Leistung erforderliche Behältervolumen berechnet. Mittels der für die Lagerabdeckungen abgeleiteten Degressionskurven für den Investitionsbedarfs wird sowohl der spezifische (€/m^3) als auch der absolute Investitionsbedarf für die Lagerbehälter bestimmt (Tabelle 10; Abbildung 5; s. auch Kapitel 2.4.2.1)

Tabelle 10: Investitionen für die Abdeckung von Gärrestbehältern (Bezugsjahr 2018) mittels Betondecke

Größen-klasse	Leistung kW	Durchschn. inst. Leistung kW_{el}	Behältervolumen insgesamt m^3	Behältergröße m^3	Investition €
1	0 – 250	141	1.283	1.283	25.807
2	250 – 500	332	3.021	3.021	52.407
3	500 – 750	572	5.196	5.196	82.052
4	750 – 1.000	830	7.548	3.774[1]	125.983
5	> 1.000	1.527	13.882	4.627[1]	223.669

Quelle: basierend auf Döhler et al., 2011; aktualisiert

2.4.3 Haltung von Nutztieren

2.4.3.1 Stall

Zur Berechnung der Investitionen, der Kosten und Mehrkosten der Nutztierhaltungsverfahren, wurde ein Kalkulationsmodell mit mehreren Funktionen für Stallgebäude verschiedener Tierkategorien analog zum methodischen Vorgehen von Döhler (2020) erstellt, welches durch Skalierungsfunktionen verschiedene Stallgrößen mit unterschiedlichen Tierkapazitäten abbilden kann. Die Stallmodelle können modular mit verschiedenen Minderungstechniken im Stall und bei der Wirtschaftsdüngerlagerung versehen werden. Außerdem können mit dem Berechnungsverfahren Leistungs-Kostenrechnungen (LKR) zur Ermittlung von Wirtschaftlichkeitsparametern (Kosten, Erträge, einzelkostenfreie Leistung) der Haltungssysteme durchgeführt werden.

Als Datengrundlage für die Ermittlung des Investitionsbedarfs für Minderungstechniken bei der Haltung von Nutztieren dienen die Datensätze des BMEL/KTBL-Systems „BAUKOST“, dessen jüngste Erhebungen zum Zeitpunkt der Modellerstellung in 2018 auf 2014 datierten und bis zum Jahr 2000 zurückreichen. Die Daten wurden daher im Rahmen weiterführender Recherchen zur Erweiterung und Präzisierung mithilfe weiterer Quellen wie ALB Hessen, LfL Bayern und umfangreicher individueller Erhebungen durch Abfragen bei Herstellern und Landwirten aktualisiert. Kosten und Preise, die auf unterschiedliche Jahre datieren, wurden anhand von Baupreisindizes auf das Jahr 2018 angepasst, zudem werden zusätzlich Baunebenkosten berücksichtigt.

Die Methode zur Berechnung der Kosten für die Minderungstechniken beinhaltet Betriebsmittel, Arbeit und für Gebäudekosten mit entsprechenden baulichen Konstruktionen oder Anlagenkomponenten, dabei werden die folgend genannten Tierkategorien berücksichtigt:

- Milchvieh,
- Mastbullen (werden der Kategorie „Übrige Rinder“ zugrunde gelegt),
- Mastschweine,
- Zuchtsauen,
- Legehennen.

Minderungstechniken für die übrigen Tierkategorien (Ferkel, Broiler, Truthühner, Enten, Pferde, Ziegen) werden nicht berücksichtigt. Im ersten Schritt werden Referenzställe mit mittleren bis hohen Tierplatzzahlen ober- und unterhalb der Genehmigungsgrenzen der 4. BImSchV definiert, die die Stallgrößen der Herdengrößenklassen der jeweiligen Tierkategorie

in der Agrarstruktur abbilden können. Aus den Referenzmodellen werden Kostenmodelle mit NH_3-Minderungstechniken erstellt, woraus Mehrkosten der NH_3-Minderungstechniken bestimmt werden können (Tabelle 11).

Der Betriebsmittel- und Arbeitszeitbedarf ist je nach Stallkapazität und eingesetzter Technik modifizierbar. Bei höheren Tierplatzzahlen sinkt der spezifische Arbeitszeitbedarf pro Tier, allerdings werden je nach Technik zusätzliche Arbeiten für Überwachung und Wartung von Anlagen angenommen. Anhand des tierplatzspezifischen Bedarfs und der Preise für Betriebsmittel und Arbeitszeitbedarf berechnen sich die Kosten für Betriebsmittel und Arbeitszeitbedarf je Tierplatz, die in die Leistungskostenrechnungen miteinfließen.

Die wichtigsten Kennzahlen, die den Leistungskostenrechnungen zugrunde liegen und die Ergebnisse maßgeblich determinieren, sind in Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt. Tabelle 15 zeigt exemplarisch an einem Mastschweinestall mit 1.500 Tierplätzen ausgewählte Ergebnisse der Kostenstruktur, die mit dem Kalkulationsmodell (LKR) berechnet werden können und für weitergehende Rechenoperationen zur Verfügung stehen.

Tabelle 11: Annahmen für Arbeitszeitbedarf, Betriebsmittelbedarf und Futterkosten der Referenzstallmodelle

Tierkategorie und Kapazität [TP]	Arbeit	Betriebsmittel			Futter
		Strom	Gas	Wasser	
	Akh TP^{-1} a^{-1}	kWh TP^{-1} a^{-1}		m^3 TP^{-1} a^{-1}	€ TP^{-1} a^{-1}
Milchvieh					
40 - 600	42,05 - 25,54	500		3,7	1.162,8
Mastbullen					
150 - 600	4,25 – 2,82	20		0,96	365,8
Mastschweine					
300 – 2.000	1,02 – 0,73	24	25		152,8
Zuchtsauen					
250 – 1.200	0,097	96	212	0,5	352,4
Legehennen					
5.000 – 80.000	0,183 – 0,159	1,5	0,4		8,9

Quelle: KTBL DS Betriebsplanung 2018, geändert

Tabelle 12: Kennzahlen für Mastschweine und Zuchtsauen

Mastschweine	€ $Tier^{-1}$ DG^{-1}	Zuchtsauen	€ $Tier^{-1}$ DG^{-1}
Leistungen			
Verkaufspreis Mastschwein	140,53	Verkaufspreis Ferkel	298,86
		Altsau	41,70
Direktkosten			
Bestandsergänzung		Bestandsergänzung	
Ferkel	53,70	Jungsau	64,29
		Jungeber	0,73
Futter	53,68[1]	Futter	147,87

[1] Für die N-/P-reduzierten Fütterung werden Futterkosten in Höhe von 50,31 € pro Mastschwein angenommen (Döhler et al., 2011).

Quelle: nach KTBL DS BP, ergänzt und indiziert

Tabelle 13: Kennzahlen für Milchvieh und Mastbullen

Milchvieh	€ Tier^{-1} DG^{-1}	Mastbullen[1]	€ Tier^{-1} DG^{-1}
Leistungen			
Verkaufspreis Milch	8.506,80	Verkaufspreis Mastbulle	1.117,60
Schlachtkuh	952,90		
Kälber	170,20		
Direktkosten			
Bestandsergänzung		Bestandsergänzung	
Aufzuchtfärsen	1.490,00	Bullenkalb	236,00
Futter	4.630,58	Futter	435,60

[1] Kenndaten für Mastbullen wurden über Analogien für die Berechnung der spezifischen NH_3-Minderungsskosten auf „übriges Rindvieh“ übertragen

Quelle: nach KTBL DS BP, ergänzt und indiziert

Tabelle 14: Kennzahlen für Legehennen und Broiler

Legehennen	€ Tier^{-1} DG^{-1}	Broiler	€ Tier^{-1} DG^{-1}
Leistungen			
Verkaufspreis Eier	18,5	Verkaufspreis Masthuhn	1,96
Schlachthenne	0,4		
Direktkosten			
Bestandsergänzung		Bestandsergänzung	
Junghenne	4,51	Küken	0,35
Futter	9,85	Futter	1,28

Quelle: nach KTBL DS BP, ergänzt und indiziert

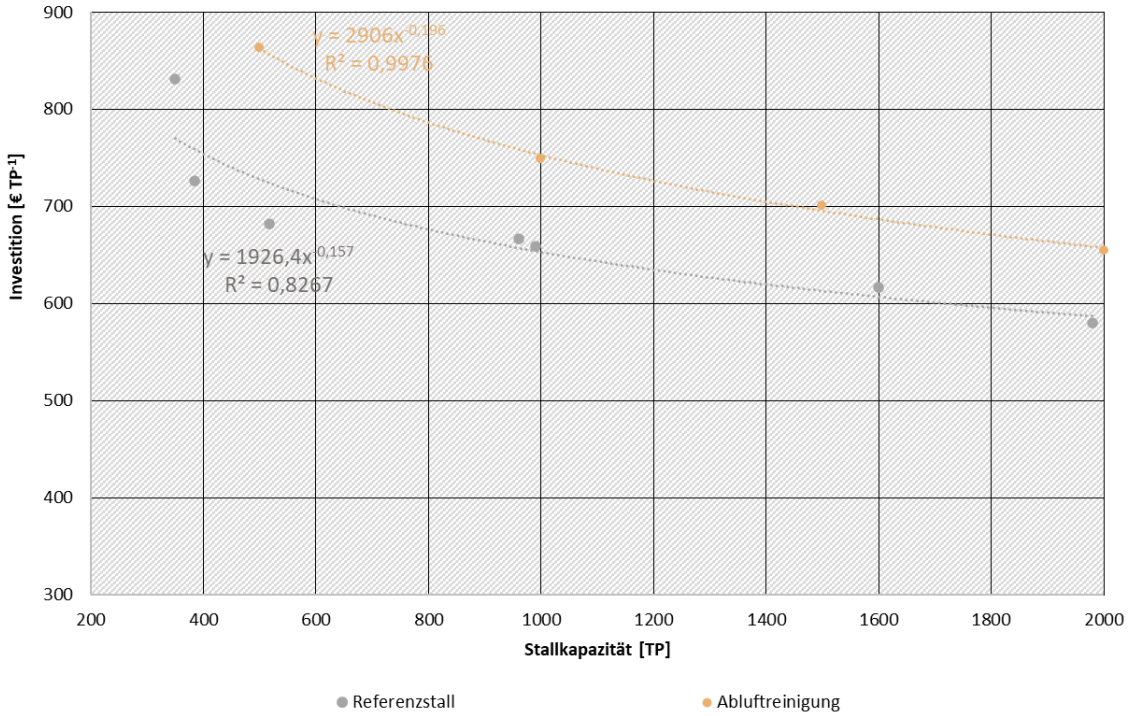
Tabelle 15: Ausgewählte Ergebnisse der LKR für den Referenzstall ohne Minderungstechnik (1.500 TP) und einen Stall mit Abluftreinigungsanlage (ALR) als NH_3-Minderungsmaßnahme

Stallmodell	Deckungs-beitrag	Direkt- & arbeits-erledigungs-kostenfreie Leistung	Einzelkosten-freie Leistung	Einzelkosten	ΔEinzelkosten (=Mehrkosten ggü. Referenz)
	€ TP^{-1} a^{-1}			€ kg^{-1} SG	
Referenz	66	51	2	1,5215	-
ALR	54	40	-21	1,6084	0,0870

Zur Berechnung der Investitionen und den daraus resultierenden Gebäudekosten werden Stalltypen für verschiedene Stallmodelle und Tierkapazitäten definiert. Den Stalltypen werden Kostengruppen und deren tierplatzspezifische Investitionen zugeordnet, sodass sich, abhängig von der Tierplatzkapazität und der Ausstattung der Ställe der (tierplatzspezifische) Investitionsbedarf und die daraus resultierenden jährlichen (tierplatzspezifischen) Gebäudekosten ableiten lassen.

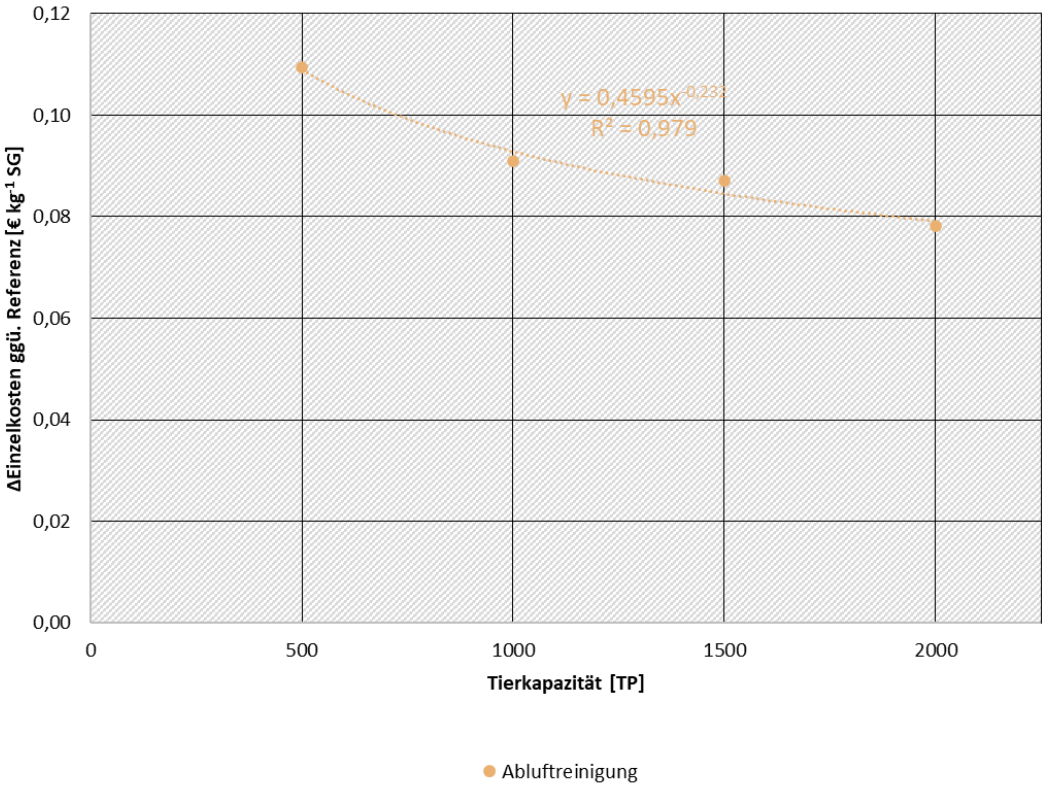
Die Gesamtkosten je Tierplatz und Jahr ergeben sich aus der Summe der Gebäude-, Arbeitserledigungs- und Direktkosten je Tierplatz des jeweiligen Stallmodells. Die Maßnahmenkosten – die Mehrkosten – je Tierplatz und Jahr werden aus der Differenz zwischen den Gesamtkosten des Modells mit Minderungstechnik und des Referenzmodells ermittelt und anhand der Beschreibung der Maßnahmen des Maßnahmenkatalogs dem jeweiligen Modell zugeordnet. Die Berechnung der Kostenstrukturen ermöglicht die Ableitung von technik- und kapazitätsabhängigen Kostenkurven. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen exemplarisch für Mastschweineställe die Optionen für die Auswertung mit dem Kalkulationsmodell.

Abbildung 6: Spezifischer Investitionsbedarf von Stallgebäuden mit und ohne NH_3-Minderungstechniken in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl am Beispiel von Mastschweineställen



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 7: Veränderung der Einzelkosten durch Abluftreinigung am Beispiel von Mastschweineställen in Abhängigkeit von der Stallkapazität



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

2.4.3.1.1 N- und P-reduzierte Fütterung

Die Tabelle 16 zeigt die Annahmen zur Berechnung der Maßnahmenkosten für die Umstellung auf N- und P-reduzierte Fütterung in Mastschweineställen. Durch Veränderung der Rationsbestandteile (Döhler et al. 2011) kann eine Einsparung von Kosten erzielt werden (s. auch Tabelle 12). Die Ableitung der ökonomischen Wirkung einer angepassten Fütterung von Milchvieh und Legehennen erfolgt durch die Auswertung anerkannter Expertenanalysen. Demnach geben Vos et al. (2022) für die Jahre 2005 und 2014 jeweils Futterrationen für Milchvieh an (DLG 2005; DLG 2014). Die Umstellung auf die Ration 2014 führt zu einer Reduktion der N-Ausscheidungen um rd. 3 % (eigene Berechnungen, basierend auf Vos et al., 2022). Darauf beruhend wird angenommen, dass die auf DLG (2014) basierende Futterration bereits einer stickstoffreduzierten Fütterung und somit dem aktuellen Stand des Wissens und der Praxis entspricht. Diese Ration wird ab dem Jahr 2014 für alle Milchkühe als standardgemäß angenommen. Folglich hat eine Verfahrensumstellung auf stickstoffreduzierte Fütterung bereits stattgefunden und es kann Kostenneutralität angenommen werden. Weiter ist aufgrund von Erhebungen der DLG und anderer Facheinrichtungen davon auszugehen, dass die angepasste Fütterung bei Legehennen und anderem in größeren Beständen gehaltenem Geflügel weitgehend umgesetzt wurde und dies in der Regel zu moderaten Kosteneinsparungen führt. Demnach wird für beide Kategorien (Milchvieh und Legehennen) von kostenneutraler Umsetzung ausgegangen.

Tabelle 16: Kennzahlen für die Kostenberechnung einer stark N- und P-reduzierten Fütterung von Mastschweinen

Kennzahlen	Einheit	Mastschweine [TP]	
		1.500	2.000
Mehrinvestition[1]	€ TP^{-1}	111,80	99,43
Futterkosten	€ DG^{-1}	50,31	

[1] Bei der N- und P-reduzierten Fütterung entstehen Mehrinvestitionen durch die Installation nutzungsspezifischer Anlagen der Mehrphasenfütterungstechnik (Futterbehälter, Förder- und Verteilanlagen, Tränken) sowie den Einbau eines Hochsilos.

Quelle: eigene Erhebungen bei Herstellern

Bei der methodischen Abbildung von N- und P-reduzierter Fütterung für Mastschweine werden die Rationsanteile verändert, sodass Futterkosten eingespart werden können. Für die Fütterung der Referenzställe entstehen Futterkosten in Höhe von 53,68 € TP^{-1} DG^{-1} (s. Tabelle 12).

2.4.3.2 Abluftreinigung

Tabelle 17 und Tabelle 18 zeigen die Annahmen zur Berechnung der Maßnahmenkosten für die Installation und den Betrieb einer Abluftreinigungsanlage in Legehennen- und Mastschweineställen stallgrößenbasierend auf individuellen Herstellerabfragen. Für Legehennenställe waren weder bei in- noch ausländischen Herstellern Informationen über Verbräuche und Investitionsbedarf zu erhalten. Daher wurde der Investitionsbedarf über Analogieschlüsse aus Daten für Broiler (Kosch, 2013) abgeleitet.

Tabelle 17: Kennzahlen für die Kostenberechnung für den Betrieb von Abluftreinigungsanlagen (ALR) zur Minderung von Ammoniakemissionen in Legehennenställen (Voliere)

Kennzahlen	Einheit	Legehennen [TP]			
		15.000	25.000	40.000	80.000
Mehrinvestition ALR	€ TP^{-1}	3,62	2,98	2,34	2,03
Arbeitszeitbedarf	Akh 100 TP^{-1} a^{-1}	2,00	1,80	1,00	0,70
Strom	kWh TP^{-1} a^{-1}	0,1908	0,15685	0,1033	0,1033
Schwefelsäure	kg TP^{-1} a^{-1}	0,147	0,147	0,147	0,147

Quelle: eigene Annahmen und Berechnungen

Tabelle 18: Kennzahlen für die Kostenberechnung für den Betrieb von Abluftreinigungsanlagen (ALR) zur Minderung von Ammoniakemissionen in Mastschweineställen

Kennzahlen	Einheit	Mastschweine [TP]			
		500	1.000	1.500	2.000
Mehrinvestition ALR	€ TP^{-1}	116,40	82,20	76,00	59,50
Arbeitszeitbedarf	Akh 100 TP^{-1} a^{-1}	0,96	0,77	0,73	0,73
Strom	kWh TP^{-1} a^{-1}	50,2	50,2	50,2	50,2
Schwefelsäure	kg TP^{-1} a^{-1}	7,00	7,00	7,00	7,00
Wasser	m^3 TP^{-1} a^{-1}	1,50	1,50	1,50	1,50

Quelle: nach Döhler et al, 2011, KTBL 2014, eigene Annahmen und Berechnungen

2.4.3.3 Berechnung der spezifischen Emissionsminderungskosten der Stalltechniken

Zur Berechnung der spezifischen NH_3-Minderungskosten der Techniken werden die Maßnahmenkosten mit der Minderungswirkung der Technik in Relation gesetzt. Zunächst werden die Stallmodelle mit den entsprechenden Minderungstechniken im Lager oder im Stall den Maßnahmen des Maßnahmenkatalogs (Tabelle 1) zugeordnet. Die jährlichen Umsetzungskosten ergeben sich durch die Maßnahmenkosten (Mehrkosten) pro Tierplatz und Jahr multipliziert mit der Anzahl der Tiere, auf die die Maßnahme umgesetzt werden kann (Formel 3), die sich von der Aktivität und der Häufigkeitsverteilung der Stall-, Lager- und Ausbringverfahren auf nationaler Ebene ableitet. Die Daten der Häufigkeitsverteilungen wurden aus Häußermann et al. (2020) entnommen und wurden ursprünglich vom Statistischen Bundesamt (2011; 2017b) im Rahmen der Agrarstrukturerhebung 2016 und Landwirtschaftszählung 2010 erhoben. Außerdem wurde die Methodik an die Vorgaben der DüV (2017) für das Zieljahr 2030 angepasst.

Hinsichtlich der Maßnahmen und deren Umsetzungsanteilen wurden im Rahmen der Untersuchung Annahmen getroffen (Tabelle 19; Anhang 1 Tabelle 44), mithilfe derer und der Ergebnisse aus Häußermann et al. (2020) die NH_3-Minderungswirkung der Maßnahmen berechnet werden. Die spezifischen Minderungskosten einer Stalltechnik/Maßnahme berechnen sich anhand des Verhältnisses der Umsetzungskosten zu deren Minderungswirkung (Formel 4).

Tabelle 20 veranschaulicht die im Folgenden beschriebene Methodik exemplarisch für die Implementierung von Abluftreinigungsanlagen in Mastschweineställen verschiedener Stallgrößen. Deutlich wird, dass sich durch die degressiven Maßnahmenkosten der Minderungstechniken auch degressive Umsetzungskosten bei konstanter Minderungswirkung sowie Größe des Bestands ergeben. Folglich können Kostenfunktionen abgeleitet werden, die die spezifischen und skalenabhängigen Minderungskosten der Techniken anzeigen. Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine Kostenkurve für die Installation einer Abluftreinigungsanlage in Mastschweineställen, anhand derer die spezifischen Minderungskosten der durchschnittlichen Größenklassen der (Tier)Kategorien bestimmt werden können.

Anhang 1 (Tabelle 41, Tabelle 42, Tabelle 43) zeigt eine Übersicht über die Stallmodelle und -techniken, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ausgewertet wurden.

Tabelle 19: Emissionsminderungsmaßnahmen, deren Umsetzungshäufigkeit und Minderungswirkungen zur Herleitung der spezifischen Minderungskosten in den Tierkategorien

MNr. / Tierkategorie	Umsetzungshäufigkeit[1] %	Bestandszahlen Deutschland[2] Stück	Anz. Tiere mit Maßnahme Stück	Referenzemissionen[3] Gg NH_3-N	Maßnahmeemissionen[3] Gg NH_3-N	Maßnahmewirkung kg NH_3
4a, Bl2030, MV	27	4.192.436	1.134.473	116,41	114,68	2.104.146
4b, Bl2030, MV	11	4.192.436	473.496	114,68	114,37	375.922
4c, Bl2030, MV	17	4.192.436	718.361	116,41	115,19	1.484.760
4a, Bl2030, MB	21	1.837.251	394.090	24,49	24,23	316.834
4a, Bl2030, ZS	36	1.773.246	640.496	17,51	16,92	719.657
4a, Bl2030, MS	39	14.758.029	5.826.470	65,90	63,14	3.356.312
4b, Bl2030, MS	13	14.758.029	1.855.629	63,14	62,19	1.155.754
4c, Bl2030, MS	4	14.758.029	590.321	65,90	65,29	748.559
5g, Bl2030, MS	18	14.758.029	2.621.229	12,38	6,40	7.255.849
6g, Bl2030, MS	20	14.758.029	2.896.646	65,90	62,62	3.979.878
5g, Bl2030, LH	55	48.284.444	26.573.863	8,80	7,74	1.290.865

MV = Milchvieh; MB = Mastbullen; ZS = Zuchtsauen; MS = Mastschweine; LH = Legehennen

[1] Ableitung der Umsetzungshäufigkeit s. Anhang 1 Tabelle 44

[2] Bestandsgrößen aus Thünen-Baseline-Szenario 2030 (Häußermann et al., basierend auf Haenel et al., 2018 und Offermann et al., 2018)

[3] Baseline-Emissionen 2030 und Emissionen bei Umsetzung der Maßnahmen in der entsprechenden Kategorie (Häußermann et al., 2020)

Formel 3

$$UK = T \times K \div B_D$$

mit:

UK = Umsetzungskosten der Maßnahme in € a^{-1}

T = Anzahl der Tiere, auf die die Maßnahme umgesetzt wird in Stück

K = Maßnahmenkosten in € TP^{-1} a^{-1}

B_D = durchschnittlicher Tierbestand in Stück

Formel 4

$$SK = UK \div W$$

mit:

SK = Spezifische Minderungskosten in € kg^{-1} NH_3

UK = Umsetzungskosten der Maßnahme in € a^{-1}

W = NH_3-Minderungswirkung der Maßnahme in kg NH_3

Tabelle 20: Beispielhafte Berechnung der Emissionsminderungskosten für den Betrieb von Abluftreinigungstechnik in Mastschweineställen

	Einheit	Stallkapazität			
		500	1.000	1.500	2.000
Maßnahmenkosten	€ TP^{-1} a^{-1}	28,65	23,65	22,78	20,43
Tierbestand	Stück	14.758.0291			
Umsetzung der Maßnahme in … des Tierbestands	%	18			
Minderungswirkung	kg NH_3	7.255.849			
Minderungskosten[2]	Mio. € a^{-1}	84,3	70,1	67,0	60,1
Spez. Minderungskosten	€ kg^{-1} NH_3	11,62	9,67	9,24	8,29

[1] Mastschweinebestand des Thünen-Baseline-Szenarios 2030 (Häußermann et al., 2020; basierend auf Haenel et al., 2018 und Offermann et al., 2018)

[2]bei einem durchschnittlichen Tierbestand von 0,89 Tieren pro Tierplatz

2.4.3.4 Weitere Annahmen für spezifische Emissionsminderungstechniken für stallintegrierte Minderungsmaßnahmen in Schweineställen

Die in der Tabelle 1 genannten „weiteren unspezifischen Maßnahmen mit 40 % Emissionsminderung in Schweineställen“ (Xg) betreffen Nachrüstungen bestehender Schweineställe, die sowohl in der TA Luft als auch im BREF (2017) genannt werden. Sie haben nur einen geringen Einfluss auf die gesamten Emissionen in Deutschland, da es sich um Maßnahmen handelt, die im Rahmen der TA Luft (s. auch Tabelle 1) nur in Schweineställen der Größenklasse 4 umgesetzt werden (s. auch Kapitel 3.1.2 und Tabelle 26). Die spezifischen Minderungskosten für stallintegrierte Minderungstechniken betragen etwa 10 € kg^{-1} NH_3 (Santonja, 2017; Döhler et al., 2019), sie werden aufgrund des begrenzten Beitrags zum Gesamtergebnis nicht systematisch berechnet, sondern mit pauschalen Minderungskosten in Höhe von 10 € kg^{-1} NH_3 angenommen.

2.4.4 Anpassung des Mineraldüngermanagements zur Minderung von Ammoniakemissionen

Für die Maßnahmen beim Mineraldüngermanagement MD1b (Ersatz von Harnstoff und Ammonium-Harnstoff-Lösung (AHL) durch Kalkammonsalpeter (KAS) und MD2a (Senkung der Mineraldüngerzufuhr um 20 kg N ha^{-1} LF) wurden die im folgenden beschriebenen Annahmen getroffen.

2.4.4.1 Ersatz von Harnstoff und AHL durch KAS

Zwar ist KAS deutlich hochpreisiger als AHL (markt.agrarheute.com, 2022), dagegen wird aufgrund vermuteter höherer Ammoniakverluste von AHL und Harnstoff ein erhöhter Ertrag für KAS-Düngung geltend gemacht (Haenel et al., 2018). Da höhere Emissionen von AHL und Harnstoff auch in den internationalen Richtlinien für die Emissionsberichterstattung aufgenommen wurden, wird hier mit entsprechenden Koeffizienten gerechnet. Allerdings wird von Döhler (2015) auf die große Temperatur- bzw. Bodenabhängigkeit der Emissionen bei praxisüblichen Ausbringterminen verwiesen, demzufolge in mehreren Messkampagnen zwar etwas höhere Emissionen für Harnstoff gemessen wurden, diese jedoch trotzdem niedrig sind (um 5 %) und somit auch keine oder geringe Ertragswirkungen feststellbar sind. Aufgrund der noch andauernden Fachdiskussion wird angenommen, dass die Minderungsmaßnahme kostenneutral ist.

2.4.4.2 Senkung der Mineraldüngerzufuhr

Die Hauptwirkung dieser Maßnahme besteht darin, dass durch die Zufuhrminderung von Stickstoff in den Boden die Gefahr der Nitratauswaschung gemindert wird, womit eine

potenzielle Belastung von Grundwasser und Oberflächengewässern vermieden wird. Die Maßnahme ist also hinsichtlich der NH_3-Minderung nur von untergeordneter Bedeutung. Die Einsparungen für den Düngemitteleinkauf können allenfalls teilweise einer Emissionsminderung zugesprochen werden. Zudem ist nicht zwingend von einer Kosteneinsparung durch die Reduzierung der Mineraldüngerzufuhr auszugehen, da eine Senkung des Mineraldüngereinsatzes zwar eine Düngungsoptimierung und Düngereinsparung bedeuten kann, die jedoch über zusätzliche Aufwendungen wie Techniken zur Nährstoffbedarfsbestimmung (Bodenanalysen, Sensortechniken) erfordert. Mit einer Senkung der Düngemenge reduziert ein Betrieb einerseits Ausgaben, andererseits existiert das Risiko möglicher Ertragseinbußen.

Daher wird die Reduzierung der Düngermenge ebenfalls als kostenneutral angenommen. Darüber hinaus wird die Minderungswirkung dieser Maßnahme von Häußermann et al. (2020) mit einem zusammengefassten Emissionsfaktor („implied emission factor" IEF) von 0,048 kg NH_3-N kg^{-1} N (2016) und 0,0010 kg NH_3-N kg^{-1} N (Bl2020 und Bl2030) mit nur 3,6 kt NH_3 pro Jahr 2030 innerhalb des Szenarios NEC 4 als vergleichsweise gering eingeschätzt.

2.5 Berechnung der Minderungskosten

Klein- und Kleinstbetriebe sind aus agrarpolitischen Gründen und Gründen der Verhältnismäßigkeit von der Umsetzung der Minderungsmaßnahmen ausgenommen worden (Punkt 22 der Beweggründe der Richtlinie) und daher bei der Berechnung der Minderungskosten nicht berücksichtigt. Lt. Häußermann et al. (2020) verringern sich die Minderungseffekte der Einzelmaßnahmen durch deren Ausnahme i.d.R. um weniger als 5 %, sodass nur geringfügige Abweichungen bei den Ergebnissen zu erwarten sind. Bei der vorliegenden Berechnung werden die Maßnahmen/Maßnahmenkombinationen flächendeckend für den gesamten Tierbestand bzw. die Ställe der Größenklassen (von der 4. BImSchV betroffene Betriebe) des jeweiligen Haltungsverfahrens berücksichtigt. Die Minderungskosten eines Szenarios berechnen sich durch Addition der Minderungskosten der dem Szenario zugeordneten Einzelmaßnahmen (Tabelle 2).

Ausgangpunkt für die Berechnung der Minderungskosten der Einzelmaßnahmen ist, dass die absoluten Emissionen und die daraus resultierende Minderungswirkung der Maßnahme größenklassenspezifisch innerhalb der Verfahrensschritte (Stall – Lager – Ausbringung – Weide) der jeweiligen Haltungssysteme der jeweiligen Tierkategorien bzw. innerhalb der Betriebstypen der untersuchten Biogasanlagen vorliegen. Durch Multiplikation der der Größenklasse, dem Verfahrensschritt und dem Haltungssystem zugeordneten Minderungswirkung mit den entsprechenden spezifischen Minderungskosten ergeben sich zunächst die Kosten, die bei der Umsetzung der Einzelmaßnahme auf eine bestimmte Größenklasse im jeweiligen Verfahrensschritt in einer bestimmten (Tier)Kategorie eines Haltungs-/Betriebsverfahrens entstehen (Formel 5). Dabei werden Auswirkungen einer Maßnahme auf die nachgelagerten Verfahrensschritte mitberücksichtigt (bspw. indem die Abdeckung von Wirtschaftsdüngern im Lager zunächst eine Erhöhung des Emissionspotenzials bei der Ausbringung nach sich zieht). Durch Addieren der Kosten der Größenklassen im jeweiligen Verfahrensschritt, im Haltungssystem, in der Tierkategorie usw. ergeben sich die Minderungskosten der Einzelmaßnahme auf nationaler Ebene.

Die Kosten werden differenziert nach Haltungsverfahren, Tierkategorie oder größenklassenspezifisch abgebildet. Außerdem können die Emissionen und Kosten den Verfahrensschritten (Stall – Lager – Ausbringung – Weide) zugeordnet werden und somit auch die Effizienz/Wirkung der Szenarien innerhalb dieser Schritte bestimmt werden.

Tabelle 21 und Tabelle 22 zeigen zur Erläuterung der Berechnungsmethodik auszugsweise den Kalkulationsweg der nationalen Minderungskosten der Maßnahme 4a für Milchvieh. Außerdem werden unterschiedliche Auswertungsmöglichkeiten der Emissions- und Kostenberechnungen, die mit dem Kalkulationsmodell durchführbar sind, aufgezeigt. Deutlich wird die Unterteilung innerhalb der Verfahrensschritte in Größenklassen und die Zuordnung der spezifischen Minderungskosten zur jeweiligen Größenklasse und zum Verfahrensschritt sowie deren Skaleneffekt. In der Tabelle 22 werden die Minderungswirkung sowie deren Kosten für die Verfahrenskette (Stall – Lager – Ausbringung – Weide) und die Tierkategorie „Milchvieh“ unter der jeweiligen Größenklasse zusammengefasst und die spezifischen Minderungskosten über die gesamte Verfahrenskette bzw. Tierkategorie bestimmt.

Formel 5

$$EMK = SK \times W \times A \times 10^3$$

mit:

EMK = Emissionsminderungskosten in €

SK = Spezifische Minderungskosten in € kg^{-1} NH_3

W = NH_3-N-Minderungswirkung der Maßnahme in t NH_3-N

A **= 1,21 (Umrechnungsfaktor Ammonium-Stickstoff – Ammoniak; 17/14)**

Tabelle 21: Exemplarische Darstellung der Minderungskosten auf nationaler Ebene für die Maßnahme 4a bei Milchvieh im Verfahrensschritt „Lager“ für güllebasierte Anbindeställe

	Einheit	Größenklasse					Σ
		1	2	3	4	5	
Minderungswirkung	t NH_3-N	7,46	78,59	135,40	131,97	0,06	353,48
Spezifische Minderungskosten	€ kg^{-1} NH_3	7,85	7,85	5,68	4,89	4,20	
Minderungskosten	Mio. €	0,04	0,42	0,54	0,47	0,00	1,48

Tabelle 22: Exemplarische Darstellung der Minderungskosten auf nationaler Ebene für die Maßnahme 4a bei Milchvieh für die Verfahrensschritte Stall-Lager-Ausbringung-Weide

	Einheit	Größenklasse					Σ
		1	2	3	4	5	
Minderungswirkung	t NH_3-N	17,5	208,2	428,1	633,9	356,8	1.644
Spezifische Minderungskosten	€ kg^{-1} NH_3	11,57	11,57	8,38	7,21	6,44	
Minderungskosten	Mio. €	0,17	1,98	2,95	3,76	1,89	10,76

2.6 Mögliche Unsicherheiten, Unschärfen und Grenzen der Berechnungsmethodik

Bei der kalkulatorischen Ermittlung der größenklassenverteilten Tierbestände, die unter BImSchV fallen, werden konstante Anteile über den Zeitraum von 2016 bis 2030 zugrunde gelegt. Da im Zuge des Strukturwandels mit einer Zunahme viehstärkerer Tierhaltungen zu rechnen ist, wird der Anteil der unter die BImSchV fallenden Betriebe für das Jahr 2030 wahrscheinlich unterschätzt. Weitere Unsicherheiten bestehen aufgrund unsicherer oder fehlender Daten zum aktuellen Umsetzungsgrad von Techniken, die nicht aus der Agrarstatistik hervorgehen, und mangels alternativer Datenquellen nicht genau eingeschätzt werden können (bspw. Umsetzungsgrad stickstoffreduzierter Fütterung, Abluftreinigung und sonstiger stallintegrierter Maßnahmen). Unzureichende Kenntnis über die regionale Verteilung bestimmter Techniken führen insbesondere bei regionaler Differenzierung zu hohen Unsicherheiten der Ergebnisse. Als Beispiel sei genannt die nicht genau quantifizierbare Verbreitung von Abluftfiltern in den nordwestdeutschen Tierhaltungsregionen.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass das Modell zur Emissions-, Minderungs- und Erfüllungskostenberechnung bisher nur Ammoniakminderungsmaßnahmen vollumfänglich beschreibt. Zwar erlaubt die Modellstruktur eine Erweiterung auf weitere Emissionskomponenten (Partikel, N-Klimagase, C-Klimagase etc.), Auswirkungen auf andere Stoffgruppen und Medien werden hier nicht dargestellt. Ammoniakemissionsminderungsmaßnahmen wirken nicht nur auf Ammoniakemissionen in die Atmosphäre sondern auf andere umweltrelevante Stoffe und Austragspfade, bspw. Führt eine Senkung der Mineraldüngerzufuhr, Verminderung der N-Ausscheidungen durch eine Verfahrensumstellung auf stickstoffreduzierte Fütterung oder unmittelbare Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern zu geringeren hydrosphärischen Stickstoffüberschüssen, was jedoch bei der Minderungs- und Erfüllungskostenberechnung nur für Ammoniak unberücksichtigt bleibt. Für eine umfassendere Bewertung der Minderungsmaßnahmen, müsste hierfür eine Kostenallokation vorgenommen werden (s. auch Kapitel 2.4.4.2). Auch wenn Maßnahmen oder Techniken zu produktionstechnischen Kosteneinsparungen führen (z.B. Einsparung von Arbeitsgängen bei der Feldbestellung durch Einarbeitung von Gülle) wäre eine entsprechende Kostenallokation vorzunehmen, die mangels geeigneter Allokationsregeln jedoch noch nicht vorgenommen werden kann.

3 Ergebnisse

3.1 Landwirtschaftliche Struktur- und Aktivitätsdaten

3.1.1 Größenklassenverteilte Strukturdaten

Die errechneten Regressionsfunktionen, mit denen die größenklassenverteilten Strukturdaten der Tierkategorien in den für die Hotspotregionen relevanten Bundesländern abgeleitet wurden finden sich in Anhang 2 zeigt. Bayern zeigt demnach sowohl den größten Bestand als auch die höchste Betriebsanzahl für Milchvieh (und Rindvieh; der Bestand übriger Rinder setzt sich aus Kälbern, Jungrindern, männlichen Rindern und anderen Kühen der ASE 2016 zusammen, daher wurde für diese Kategorie lediglich die kumulierte, größenklassenverteilte Bestandsgröße abgeleitet). Die Regressionsfunktionen für Niedersachsen lassen erkennen, dass trotz der vergleichsweise geringen Zahl an milchviehhaltenden Betrieben relativ viele Milchkühe gehalten werden (Anhang 2 Abbildung 27, Abbildung 28, Abbildung 29).

Die Mastschweine sind in den nordwestdeutschen Kreisen in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen konzentriert. Dabei verteilen sich die Tierzahlen auf verhältnismäßig große Bestände pro Betrieb. Bayern zeigt umgekehrt eine deutlich größere Anzahl an Betrieben, auf welche sich eine kleinere Anzahl an Mastschweinen verteilt. Baden-Württemberg weist sowohl eine geringere Betriebsanzahl als auch einen geringeren Bestand auf. Ein ähnliches Bild ergibt sich dort für die Zuchtsauenbestände und -haltungen (Anhang 2 Abbildung 30, Abbildung 31, Abbildung 32, Abbildung 33).

Niedersachsen weist die mit Abstand größte Anzahl an Legehennenplätzen auf, die anderen drei Bundesländer bewegen sich dahingehend auf einem ähnlich niedrigen Niveau. Auffallend ist hier die relativ kleine Anzahl an Betrieben (Anhang 2 Abbildung 34, Abbildung 35). Der Unterschied zwischen NRW, Niedersachsen und dem Süden ist bei Legehennen und Legehennen haltenden Betrieben noch deutlicher ausgeprägt als bei Mastschweinen: Während v.a. in Niedersachsen große Betriebe vorherrschend sind, verteilen sich in Bayern und Baden-Württemberg vergleichsweise wenige Legehennen auf eine höhere Betriebsanzahl.

Im Allgemeinen werden aus den Daten die strukturellen Unterschiede zwischen den Bundesländern im Nordwesten und im Süden Deutschlands deutlich: Bayern ist gekennzeichnet durch eine deutlich höhere Anzahl an kleineren landwirtschaftlichen Betrieben – ausgenommen Milchvieh – (für Baden-Württemberg gilt diese Aussage allerdings nur für Legehennen), sodass dessen Bestandsgrößen insgesamt kleiner sind. Die nordwestlichen Länder dagegen zeigen insgesamt eine kleinere Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe, allerdings einen vergleichsweise großen Bestand. Nach Ableitung der Regressionsfunktionen für alle Bundesländer und Bestimmung der Tier- und Betriebszahlen auf Kreisebene ergeben sich für Deutschland gesamt die in Tabelle 23 zusammengefassten Werte.

Tabelle 23: Anzahl der Haltungen und Gesamtanzahl der Tiere innerhalb der Größenklassen in Deutschland für das Jahr 2016

	Größenklasse				
	1	2	3	4	5
Milchvieh					
Unterteilung [Stück]	1 – 9	10 – 49	50 – 99	100 – 199	> 199
Haltungen	9.685	21.861	20.263	14.556	2.689
Tiere	54.920	554.253	1.087.821	1.468.746	1.026.375
Übrige Rinder					
Unterteilung [Stück]	1 – 9	10 – 49	50 – 99	100 – 199	> 199
Haltungen	5.804	10.602	9.617	13.145	12.744
Tiere	500.830	2.136.637	2.462.932	2.531.162	371.063
Zuchtsauen					
Unterteilung [Stück]	1 – 99	100 – 249	250 – 499	> 500	-
Haltungen	6.734	2.778	1.686	709	-
Tiere	232.046	562.659	722.863	408.698	-
Mastschweine					
Unterteilung [Stück]	1 – 499	500 – 999	1000 – 1999	> 1999	-
Haltungen	26.352	4.560	5.262	1.238	-
Tiere	1.124.481	2.157.157	4.428.940	4.393.160	-
Legehennen					
Unterteilung [Stück]	1 – 99	100 – 14.999	15.000 – 39.999	> 39.999	-
Haltungen	39.431	4.523	509	323	-
Tiere	737.603	12.307.275	22.603.476	16.336.058	-

[1] Die Ableitung der größenklassenverteilten Strukturdaten anhand der Regressionsfunktionen (s. auch Kapitel 2.2.1) wurde nur für die untersuchten Tierkategorien durchgeführt.

3.1.2 Größenklassenverteilte Anteile der nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftigen Betriebe

Die Tabelle 24 und Tabelle 25 zeigen ausgewählte Ergebnisse der Berechnung der Anteile der nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftigen Betriebe innerhalb der festgelegten Größenklassen auf nationaler Ebene und deren Zuordnung zu den betroffenen Maßnahmen (Tabelle 26).

Tabelle 24: Modellierte Anzahl der Tiere in von der 4. BImSchV betroffenen Betrieben auf Bundesebene nach Tierkategorie

Tierkategorie	G-Anlagen	V-Anlagen	G- und V-Anlagen	2/3 d. unteren Grenze[1]
	Tiere			
Milchvieh	-	-	402.620[2]	-
Übrige Rinder	-	-	457.025[2]	-
Zuchtsauen	842.320	178.647	1.020.790	1.315.265
Mastschweine	2.342.083	842.472	3.182.680	5.256.805
Legehennen	31.951.941	12.903.300	44.835.178	48.226.797

[1] Der Maßnahmenkatalog (Tabelle 1) definiert Minderungsmaßnahmen, die bereits bei niedrigen Tierplatzzahlen (2/3 der unteren BImSchV-Grenze) umgesetzt werden.

[2] Unter die Regelung der 4. BImSchV fallende Wirtschaftsdüngerlagerbehälter in Rinderhaltungen.

Tabelle 24 zeigt den nationalen Gesamtbestand der Tiere, differenziert nach den betrachteten Tierkategorien, in den jeweiligen Betriebsgrößen (G- und V-Anlagen sowie 2/3 der unteren BImSchV-Grenze) zusammen (s. auch Tabelle 5 für zugrunde gelegte Betriebsgrößengrenzen). Zum besseren Verständnis werden die Ergebnisse der Tabelle 24 exemplarisch anhand der Mastschweine erläutert: Den Ergebnissen aus dem Regressionsansatz nach Kapitel 3.1.2 zufolge, mithilfe dessen die Tierbestände in bestimmten Betriebsgrößenklassen näherungsweise berechnet werden können, werden in Deutschland

2.342.083 Mastschweine in Anlagen gehalten, welche ein Genehmigungsverfahren gem. § 10 BImSchG für BImSchV-G-Anlagen durchlaufen mussten. Das entspricht einer Betriebsgröße mit mehr als 2.000 gehaltener Mastschweine (s. auch Tabelle 5 und Kapitel 2.2.2).

Tabelle 25: „Grenz-Herdengrößen" der von der 4. BImSchV betroffenen Betriebe auf Bundesebene nach Tierkategorie

Durchschnittliche Herdengröße, ab welcher ein Betrieb auf Bundesebene in die jeweilige Kategorie fällt. Die Grenz-Herdengrößen werden anhand der Eingangsgröße „Tieranzahl" in den jeweiligen Kategorien (Tabelle 24) und der Regressionsfunktionen zur Ableitung der Tieranzahl in Abhängigkeit von der Herdengröße (Anhang 1) abgeleitet.

Tierkategorie	G-Anlagen	V-Anlagen	G- und V-Anlagen	2/3 d. unteren Grenze[1]
	Tierplätze			
Milchvieh	-	-	397[2]	-
Übrige Rinder	-	-	147[2]	-
Zuchtsauen	344	622	293	249
Mastschweine	2.638	3.871	2.128	2.638
Legehennen	24.286	64.367	12.562	7.248

[1] Der Maßnahmenkatalog (Tabelle 1) definiert Minderungsmaßnahmen, die bereits bei niedrigen Tierplatzzahlen (2/3 der unteren BImSchV-Grenze) umgesetzt werden.

[2] Unter die Regelung der 4. BImSchV fallende Wirtschaftsdüngerlagerbehälter in Rinderhaltungen.

Da die gewählten Betriebsgrößenklassen (s. Tabelle 4) nicht mit den Abgrenzungen der 4. BImSchV übereinstimmen, müssen mithilfe der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Regressionsfunktionen und den durchschnittlichen Tierbeständen der BImSchV-Betriebe aus Tabelle 25 die Anteile der unter 4. BImSchV fallenden Tierbestände in den jeweiligen Größenklassen berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden in Tabelle 26 dargestellt. Zudem enthält die Tabelle die entsprechenden, in BImSchV-Betrieben umgesetzten Maßnahmen (s. Tabelle 1 für die Zuordnung). Nach Tabelle 26 sind bspw. in der Kategorie „Zuchtsauen" 84,7 % der Betriebe in Größenklasse 3 und alle Betriebe in Größenklasse 4 (Zuchtsauen wurden in vier Größenklassen unterteilt, s. Tabelle 23) von der 4. BImSchV betroffen und zwar entweder als V- oder G-Anlage für die die Maßnahmen 4h und 6g umgesetzt werden. 60 % der Zuchtsauen in Größenklasse 3 und alle Zuchtsauen in der Größenklasse 4 sind in G-Anlagen, für die die Maßnahme 5g umgesetzt werden

Tabelle 26: Relative Anteile der von der 4. BImSchV betroffenen Betriebe innerhalb der Größenklassen auf Bundesebene nach Tierkategorie und deren Zuordnung zu den Minderungsmaßnahmen des Maßnahmenkatalogs

Tierkategorie	Relativer Anteil der betroffenen Betriebe [%] Größenklasse				MNr.
	2	3	4	5	
Milchvieh[1]	-	-	-	39,2	4h[2]
Übrige Rinder[1]	-	-	3,4	100,0	4h[2]
Zuchtsauen	-	84,7	100,0	-	4h; 6g[2]
	-	60,0	100,0	-	5g[3]
	-	-	43,7	-	Xg[4]
Mastschweine	-	-	72,4	-	4h; 6g[2]
	-	-	53,3	-	5g[3]
	-	-	19,2	-	Xg[4]
Legehennen	47,9	100,0	100,0	-	4h; 6g[2]
	-	69,1	100,0	-	5g[3]
	-	-	79,0	-	Xg[4]

[1] Unter die Regelung der 4. BImSchV fallende Wirtschaftsdüngerlagerbehälter in Rinderhaltungen.

[2] Anteile der Betriebe in BImSchV-G-Anlagen.

3.2 Kosten der Emissionsminderung

3.2.1 Ausbringung von Wirtschaftsdüngern

Sowohl die Ausbringungskosten selbst als auch die Kosten der Emissionsminderung hängen signifikant von der Auslastung der Gülleapplikationstechnik und der Emissionsminderungstechnik ab und sinken mit zunehmender Verfahrensleistung (vgl. Döhler et al., 2011; Tabelle 27 und Tabelle 28, Abbildung 8:). Die spezifischen Minderungskosten belaufen sich für Rindergülle zwischen 0,1 und 7,2 € kg^{-1} NH_3, für Schweinegülle zwischen 0,1 und 9,0 € kg^{-1} NH_3 (Tabelle 27 und Tabelle 28). Da die absoluten Kosten der Emissionsminderung gleichbleiben (Ausbringkosten der Minderungstechniken), während die Emissionen aus Schweinegülle bei der Ausbringung allgemein geringer ausfallen (Döhler et al., 2011; Döhler, 1990) und damit der Effekt der Emissionsminderung, sind die Minderungskosten für Schweinegülle zumeist höher als für Rindergülle. Die Minderungskosten für die Einarbeitung innerhalb einer resp. vier Stunde(n) weist sowohl für Rinder- als auch für Schweinegülle für nahezu alle untersuchten Verfahrensleistungen (bis auf 10.000 m^3 a^{-1}) Kosten von weniger als 1 € kg^{-1} NH_3 auf. Sehr kosteneffizient – auch für Einzelbetriebe mit geringerer Güllemenge und Leistung – ist die Einarbeitung mit einem separaten Traktor mit Einarbeitungsgerät (Grubber, Scheibenegge). Je nach Allokation der Kosten zu Bodenbearbeitung und Emissionsminderung fallen Kosten von unter 1 – 2 € kg^{-1} NH_3 an. Verdünnung von Rindergülle mit Wasser ist zwar eine wirksame, aber sehr kostenintensive Technik, da höhere Volumina transportiert und ausgebracht werden müssen, und wird daher nicht weiter bei der Berechnung der Erfüllungskosten betrachtet.

Tabelle 29 zeigt die spezifischen Minderungskosten, die zur Berechnung der Maßnahmenkosten für die Wirtschaftsdüngerausbringung für die jeweiligen Tierkategorien und Biogasanlagen herangezogen wurden. Zu erkennen ist, dass die spezifischen Minderungskosten für die Ausbringung von Rindergülle verglichen mit den Ergebnissen aus Döhler et al. (2011) höher sind als für Schweinegülle (Tabelle 27und Tabelle 28). Die Unterschiede resultieren aus der Anpassung der spezifischen Minderungskosten in der jeweiligen Region an den vorherrschenden Verfahrensmix (s. dazu Kapitel 2.4.1).

Niedrigere spezifische Minderungskosten für die Ausbringung von Schweinegülle (Schleppschlauch und Einarbeitung innerhalb von 4 h) gehen aus der höheren Minderungswirkung der Verfahren für Schweinegülle hervor (s. auch Tabelle 6).

Für die Ermittlung der Minderungskosten auf regionaler und nationaler Ebene werden ökonomisch orientierte Entscheidungen angenommen. Das bedeutet, dass kleinere Betriebe nicht mit kostenintensiver Eigenmechanisierung, sondern gut ausgelastete und damit kostengünstige Technik einsetzen (überbetriebliche Nutzung in einer Betriebsgemeinschaft oder Lohnunternehmer), sodass die Kosten für die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern möglichst geringgehalten werden. Demnach wird für Maßnahmen bei der Wirtschaftsdüngerausbringung über alle Größenklassen hinweg mit denselben spezifischen Minderungskosten gerechnet.

Tabelle 27: Spezifische NH_3-Emissionsminderungskosten bei der Ausbringung von Rindergülle (Referenz Breitverteiler)*

Variante	Jährliche Verfahrensleistung [m^3 a^{-1}]				
	1.000	3.000	10.000	30.000	100.000
	Minderungskosten [€ m^{-3}]				
Schleppschlauch	7,2	2,6	1,3	0,4	0,2
Schleppschuh	5,0	2,3	1,9	1,7	-
Schlitz (Scheiben)	5,1	2,4	1,9	2,0	0,6
Grubber	3,0	1,8	1,0	1,3	0,1
Einarbeitung innerh. 1h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Einarbeitung innerh. 4h	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Verdünnung 1:1	7,2	4,6	5,4	4,4	3,0
Schl.schl., Ansäuerung 2 l m^{-3}	-	-	-	2,2	-
Schl.schl., Ansäuerung 5 l m^{-3}	-	-	-	1,7	-

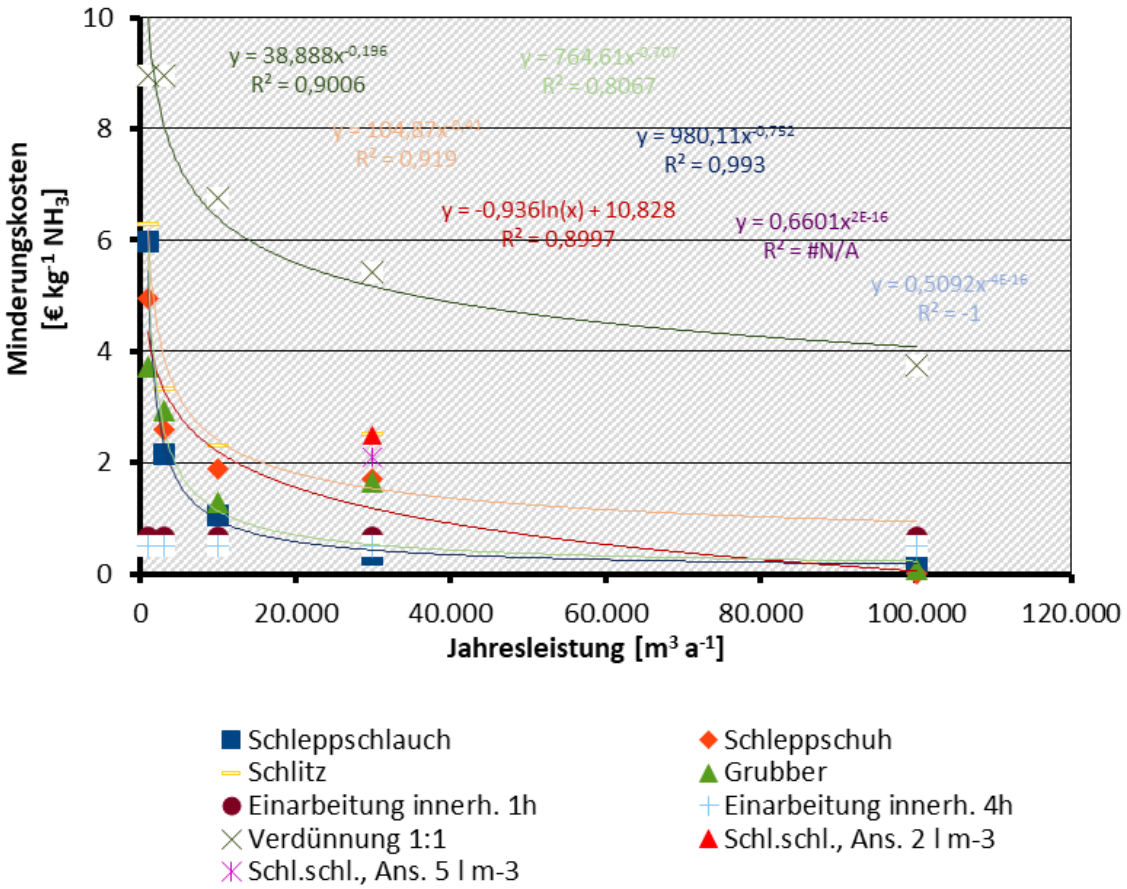
*Basierend auf Döhler et al., 2011; Tabelle 18 und aktualisiert mittels individueller Abfragen (Landwirte, Zunhammer, Kotte, Vogelsang, Datenbasis 2019)

Tabelle 28: Spezifische NH_3-Emissionsminderungskosten bei der Ausbringung von Schweinegülle (Referenz Breitverteiler)*

Variante	Jährliche Verfahrensleistung [m^3 a^{-1}]				
	1.000	3.000	10.000	30.000	100.000
	Minderungskosten [€ m^{-3}]				
Schleppschlauch	6,0	2,2	1,0	0,3	0,2
Schleppschuh	5,0	2,3	1,9	1,7	-
Schlitz (Scheiben)	6,3	3,0	2,3	2,5	0,7
Grubber	3,7	2,2	1,3	1,7	0,1
Einarbeitung innerh. 1h	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Einarbeitung innerh. 4h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Verdünnung 1:1	9,0	5,7	6,8	5,4	3,7
Schl.schl., Ansäuerung 2 l m^{-3}	-	-	-	2,5	-
Schl.schl., Ansäuerung 5 l m^{-3}	-	-	-	2,1	-

*Basierend auf Döhler et al., 2011; Tabelle 19 und aktualisiert mittels individueller Abfragen (Landwirte Zunhammer, Kotte, Vogelsang, Datenbasis 2019)

Abbildung 8: Spezifische NH_3-Minderungskosten für Verfahren der Ausbringung für Schweinegülle in Abhängigkeit von der Jahresleistung



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Für die Maßnahmen bei der Wirtschaftsdüngerausbringung (1b, 2b, 3b c d) sind die spezifischen Minderungskosten (Tabelle 29) generell niedriger als 3 € kg^{-1} NH_3. Die Verkürzung der Einarbeitungszeit von flüssigen Wirtschaftsdüngern auf weniger als 1 h in Verbindung mit dem Verbot von Breitverteilern auf Ackerland (1b) ist mit 0,66 € kg^{-1} NH_3 hinsichtlich der Ausbringung von Gülle, Jauche und Gärresten die kosteneffizienteste Maßnahme. Verhältnismäßig niedrige Minderungskosten, geringer als 1,0 € kg^{-1} NH_3, zeigt außerdem die Ansäuerung der Gärreste (3d) und die Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger mit Schlitzverfahren resp. Schleppschlauch und Ansäuerung auf Ackerland (2b). Die Ausbringung von Festmist und dessen Einarbeitung innerhalb von 1 h birgt vergleichsweise höhere spezifische Minderungskosten (1b und 2b). Die Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger mit Schlitzverfahren resp. Schleppschlauch und Ansäuerung auf Grünland (3b) weist mit 2,53 – 2,69 € kg NH_3 die höchsten spezifischen Minderungskosten auf.

Tabelle 29: NH_3-Minderungskosten für die Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern und Festmist für Tierhaltung und Biogasanlagen

Kategorie	Maßnahme				
	1b[1]	2b[1]	3b	3c	3d
	NH_3-Minderungskosten [€ kg^{-1} NH_3]				
Milchvieh/Rindvieh	0,66/1,58	0,89/1,58	2,69	2,40	0,82
Mastschweine/Zuchtsauen	0,66/1,58	0,89/1,58	2,53	0,82	0,82
Legehennen	0,66/1,58	0,89/1,58	2,60[2]	-	0,68[2]
Biogasanlagen	0,66	0,89	2,60	-	0,68

[1] Die angegebenen Werte beziehen sich jeweils auf die spezifischen Minderungskosten in Höhe von 0,66 resp. 0,89 € kg^{1} NH_3 für die Ausbringung und Einarbeitung von Gülle, Jauche und Gärresten sowie die spezifischen Minderungskosten in Höhe von 1,58 € kg^{-1} NH_3 für die Ausbringung von Festmist.

[2] Der angegebene Wert bezieht sich auf vergorenen Legehennenkot und wird von den spezifischen Minderungskosten der Kategorie „Biogasanlagen“ abgeleitet.

1b) Verkürzung der Einarbeitungszeit auf < 1 h für flüssige Wirtschaftsdünger sowie Festmist auf unbestelltem Ackerland; einschl. Verbot von Breitverteilern für Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger auf Ackerland

2b) Ausbringung von flüssigem Wirtschaftsdünger auf bewachsenem Ackerland mit Schlitzverfahren oder alternativ mit Schleppschlauch und Ansäuerung

3b) Ausbringung von flüssigem Wirtschaftsdünger auf Grünland mit Schlitzverfahren oder alternativ mit Schleppschlauch und Ansäuerung

3c) Ansäuerung von 50 % der Rinder- und Schweinegülle

3d) Ansäuerung von 50 % der Gärreste

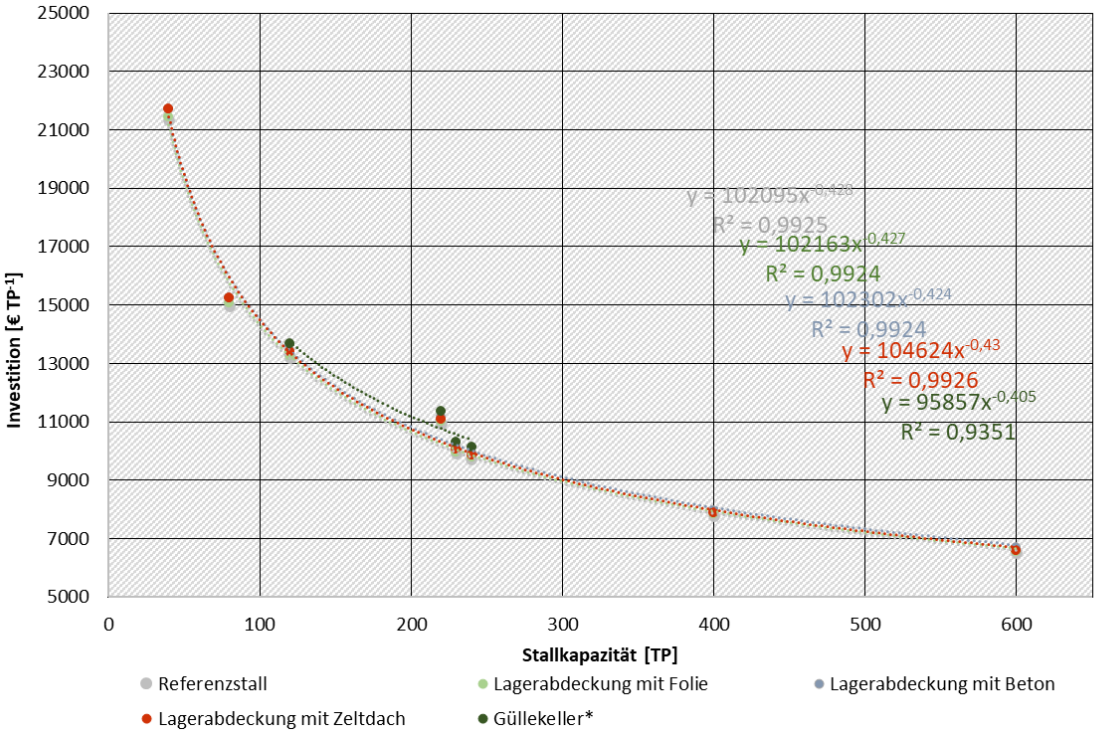
3.2.2 Stallhaltung und Wirtschaftsdüngerlagerung

In den folgenden Kapiteln werden die Kostenberechnungen für abgedeckte Güllebehälter und Stalltechniken zur Minderung von Ammoniakemissionen anhand von skalenabhängigen Kostenfunktionen beschrieben. Die Funktionen zeigen jeweils den Investitionsbedarf, die Einzelkostendifferenz zum Referenzstall sowie die spezifischen NH_3-Minderungskosten in Abhängigkeit von der Tierplatzkapazität.

3.2.2.1 Milchvieh

Der tierplatzspezifische Investitionsbedarf für die Errichtung von Milchviehställen (einschließlich zugehörige Güllelagerbehältern mit Abdeckung) (Abbildung 9) bewegt sich für niedrige Tierplatzzahlen (40 TP) im Bereich von 21.457 (Schwimmfolie) bis 21.728 € TP^{-1} a^{-1} (Zeltdach), für hohe Tierplatzzahlen (600 TP) im Bereich von 6.572 (Schwimmfolie) und 6.697 € TP^{-1} a^{-1} (Beton). Für die Stallmodelle, bei denen 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle in einem abgedeckten Außenlager gelagert werden, liegt der Investitionsbedarf für die untersuchten Stallgrößen (120 – 240 TP) zwischen 13.682 und 10.124 € TP^{-1} a^{-1}, der Investitionsbedarf hierfür ist folglich am höchsten. Die Abdeckung mittels Schwimmfolie weist den geringsten Investitionsbedarf auf. Ab einer Stallgröße von 43 Tierplätzen weist die Abdeckung mittels Zeltdach einen kleineren Investitionsbedarf auf als die Abdeckung mit Beton. Die Referenz stellt einen Milchviehstall mit Güllebehälter ohne Abdeckung dar.

Abbildung 9: Spezifischer Investitionsbedarf für Milchviehställe[1] inklusive Güllebehälter mit NH_3-Minderungstechniken in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl[2]



[1] Die Techniken werden in einem zwei- oder dreireihigen Liegeboxenstall installiert.

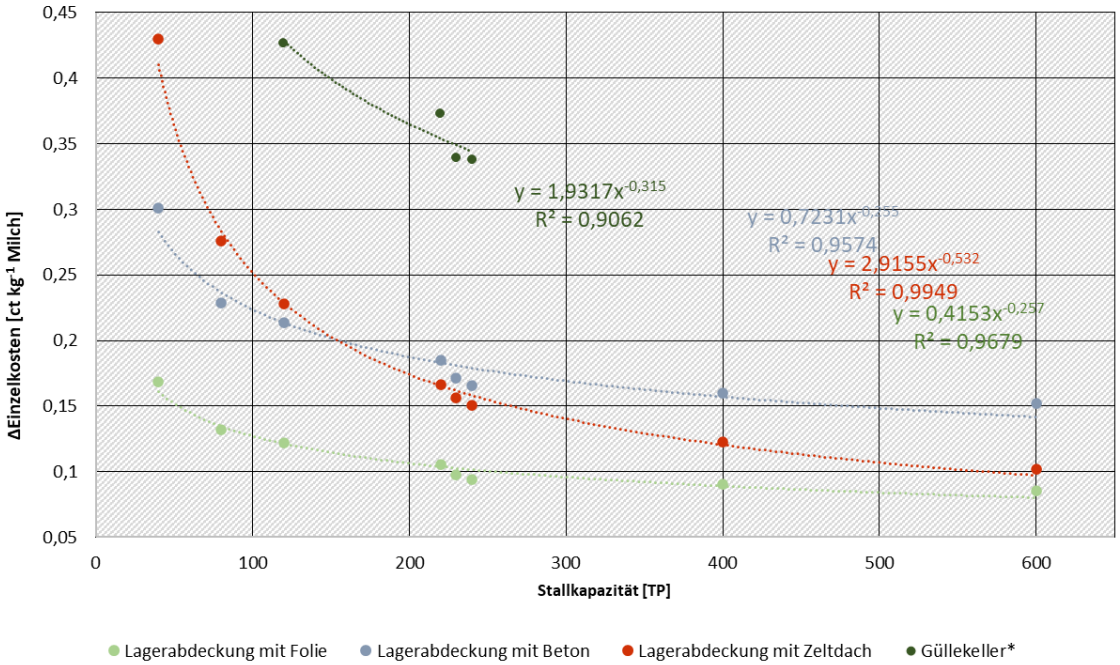
[2] Referenz entspricht Stall mit Güllebehälter ohne Abdeckung.

* Statt der Lagerung im Güllekeller wird 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle im Außenlager abgedeckt gelagert.

Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Die Lagerabdeckung mit Folie weist mit 0,9 bis 0,17 ct kg^{-1} Milch die geringste Einzelkostendifferenz (positive Einzelkostendifferenz ist gleichbedeutend mit Mehrkosten) gegenüber der Referenz auf (Abbildung 10). Die Einzelkostendifferenz für die Lagerabdeckung mit Zeltdach ist für kleine Stallanlagen zunächst höher als die für die Abdeckung mit Beton, der Degressionseffekt ist jedoch deutlicher ausgebildet und fällt ab einer Stallkapazität von 154 unter die Einzelkostendifferenz der Abdeckung mit Beton. Die Verlagerung der Gülle aus dem Güllekeller in ein Außenlager erhöht die Einzelkosten gegenüber dem Referenzverfahren mit zusätzlichen 0,34 – 0,43 ct kg^{-1} Milch am stärksten.

Abbildung 10: Änderung der Einzelkosten für Milchviehställe[1] inklusive Güllebehälter mit NH_3-Minderungstechniken gegenüber der Referenz ohne Minderungstechnik in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl



[1] Die Techniken werden in einem zwei- oder dreireihigen Liegeboxenstall installiert.

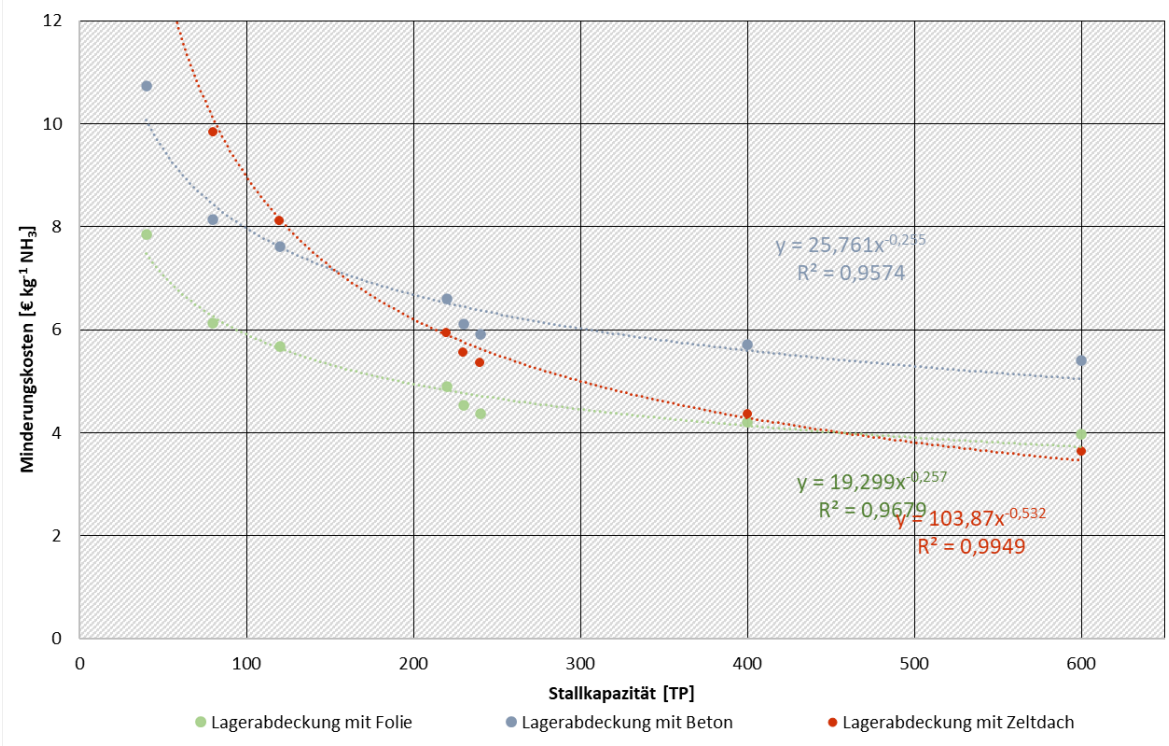
* Statt der Lagerung im Güllekeller wird 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle im Außenlager abgedeckt gelagert

Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Die spezifischen NH_3-Minderungskosten (Abbildung 11) bewegen sich für kleine Ställe (40 TP) in einem Bereich von 7,85 (Folie) bis 15,31 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach); für große Ställe mit 400 Plätzen zwischen 3,63 (Zeltdach) und 5,41 € kg^{-1} NH_3 (Beton). Die Abdeckung mittels Folie ist trotz der niedrigeren Minderungswirkung im Vergleich zu Zelt- und Betonabdeckungen (Haenel et al., 2010) bis zu einer Stallgröße von 455 Plätzen die beste Option. Lagerabdeckungen mit Zeltdach weisen die stärkste Kostendegression auf. Ab Stallgrößen von mehr als 455 Plätzen unterschreiten die Minderungskosten von Zeltabdeckungen aufgrund der höheren Minderungswirkung die Minderungskosten der Folienabdeckungen. Die spezifischen Minderungskosten der Umlagerung der Unterflur gelagerten Gülle liegen zwischen 36,70 und 46,29 € kg^{-1} NH_3 und übersteigen die der Güllelagerabdeckungen um rund ein Zehnfaches (daher nicht in Abbildung 11 dargestellt).

Allgemein ist die Abdeckung mit Folie sowohl hinsichtlich des Investitionsbedarfs als auch der Einzelkostendifferenz die kostengünstigste Option. Zusätzlich sind die spezifischen NH_3-Minderungskosten im Vergleich zur Abdeckung mit Zeltdach oder Beton für kleinere bis mittlere Stallgrößen bis 455 Plätzen am niedrigsten. Bei großen Ställen ist die NH_3-Minderung bei Lagerabdeckung mittels Zeltdach am günstigsten. Betonabdeckungen sind nur in kleinen Ställen von weniger als 154 Plätzen ökonomisch vorteilhaft, bleiben aber dennoch kostenintensiver als die Abdeckung mit einer Schwimmfolie.

Abbildung 11: Emissionsminderungskosten für NH_3-Minderungstechniken in Milchviehställen[1] inklusive Güllebehälter in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl



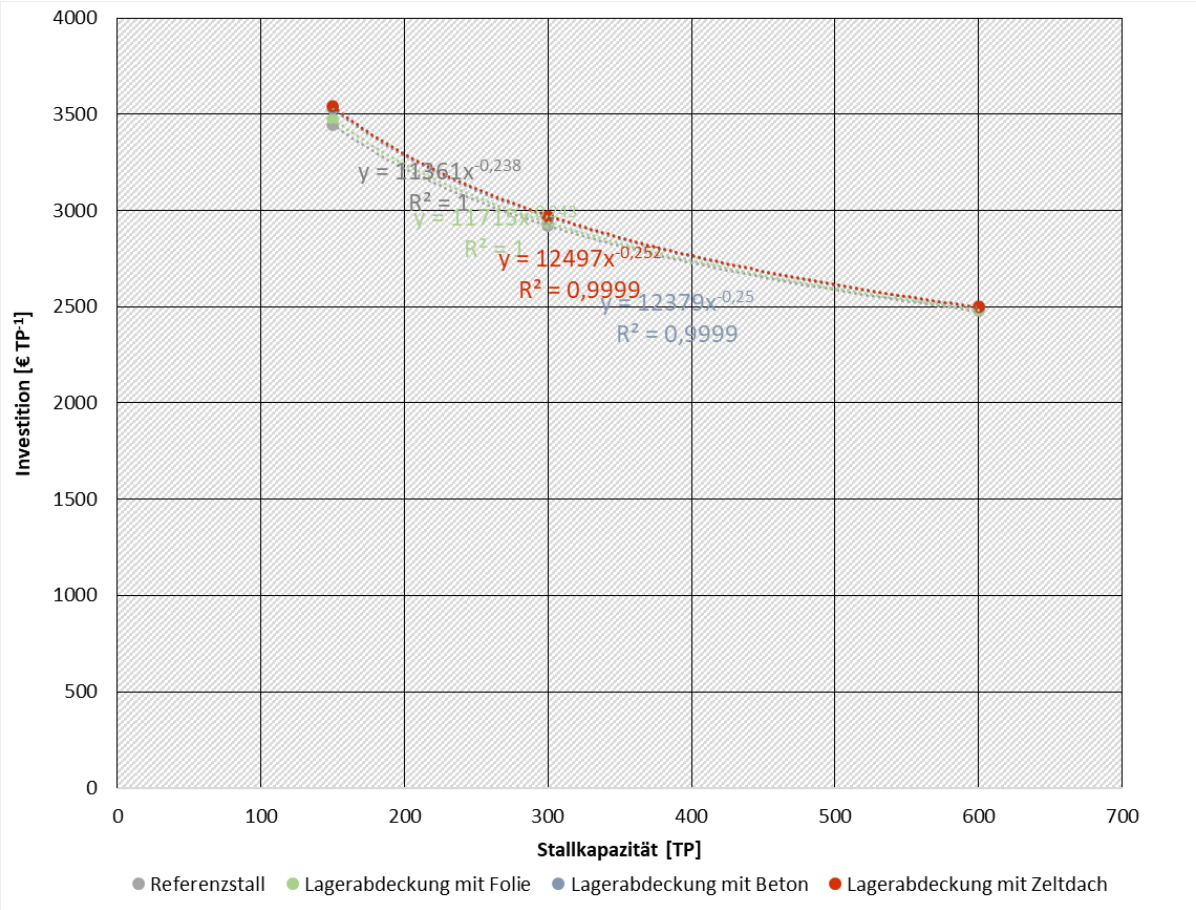
[1] Die Techniken werden in einem zwei- oder dreireihigen Liegeboxenstall installiert.

Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

3.2.2.2 Mastbullen

Die Kostenstrukturen in Mastbullenställen zeigen für die Abdeckung von Güllebehältern ähnliche Ergebnisse wie in Milchviehställen. Der spezifische Investitionsbedarf der Güllelagerbehälterabdeckungen in Mastbullenställen bewegt sich wie auch in Milchviehställen auf einem ähnlichen Niveau (Abbildung 12); der spezifische Investitionsbedarf ist allerdings geringer. Für niedrige Stallkapazitäten (150 TP) beläuft dieser sich zwischen 3.476 (Folie) und 3.544 € TP^{-1} (Zelt); für hohe Kapazitäten (600 TP) zwischen 2.477 (Folie) und 2.497 € TP^{-1} (Beton). Demnach ist die Abdeckung mittels Schwimmfolie hinsichtlich des Investitionsbedarfs die vergleichsweise günstigste Option. Die Investitionen für Abdeckung mit Zeltdach oder Betondecke unterscheiden sich nur geringfügig.

Abbildung 12: Spezifischer Investitionsbedarf für Mastbullenställe[1] inklusive Güllebehälter mit NH_3-Minderungstechniken in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl

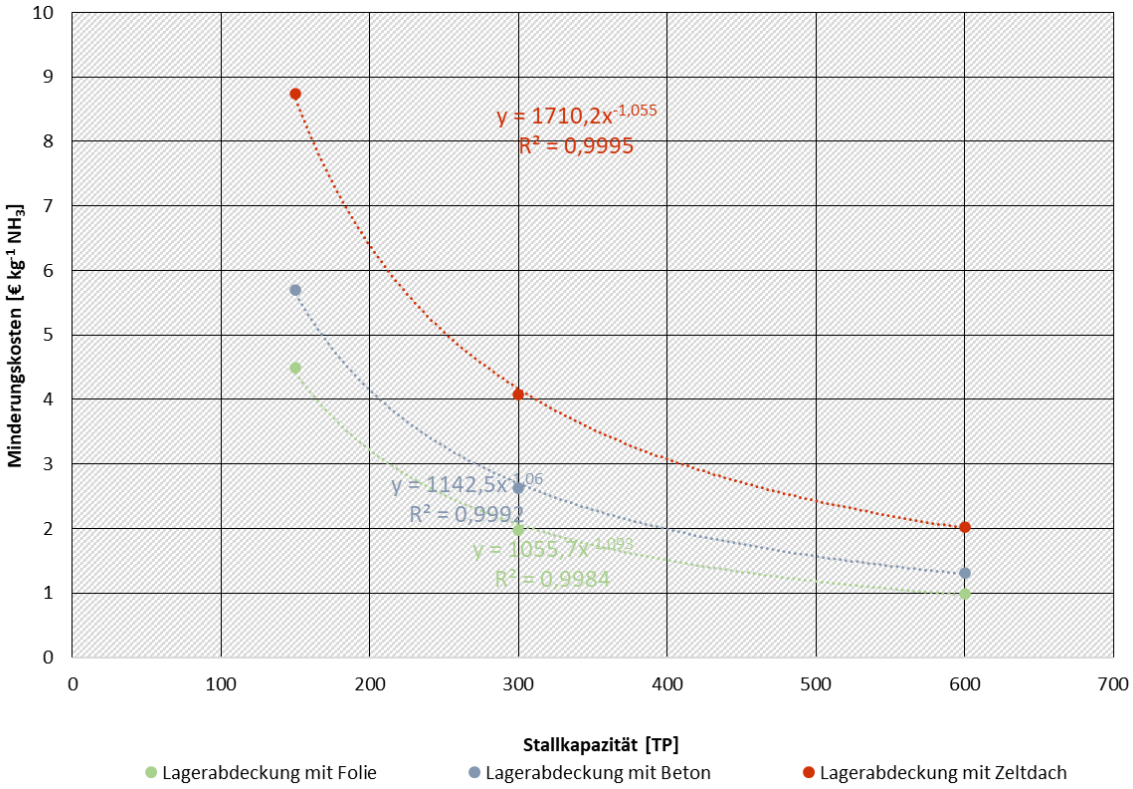


[1] Referenz entspricht Stall mit Güllebehälter ohne Abdeckung.

Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Die spezifischen Minderungskosten liegen für die kleinen Stallgrößen (150 TP) zwischen 4,52 (Folie) und 8,82 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach); für große Stallgrößen (600 TP) zwischen 1,00 (Folie) und 2,09 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach) (Abbildung 13). Hinsichtlich der spezifischen Minderungskosten ist die Lagerabdeckung mittels Schwimmfolie die günstigste Option. Da die Mehrkosten der Stalltechnik insgesamt für die Abdeckung mit Beton geringer ausfallen als die der Abdeckung mit Zeltdach, sind die spezifischen Minderungskosten bei gleicher Minderungswirkung von Zeltdach und Betondecke ebenfalls geringer (Abbildung 13). Folglich ist die Abdeckung der Lagerbehälter mit Schwimmfolie sowohl hinsichtlich des Investitionsbedarfs als auch der spezifischen Minderungskosten ebenfalls die günstigste Wahl. Die Maßnahmenkosten für die Lagerabdeckung in Mastbullenställen werden den Ställen für „Übrige Rinder“ zugrunde gelegt.

Abbildung 13: Emissionsminderungskosten für NH_3-Minderungstechniken in Mastbullenställen[1] inklusive Güllebehälter in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl



[1] Die Techniken werden in einem Tretmiststall installiert.

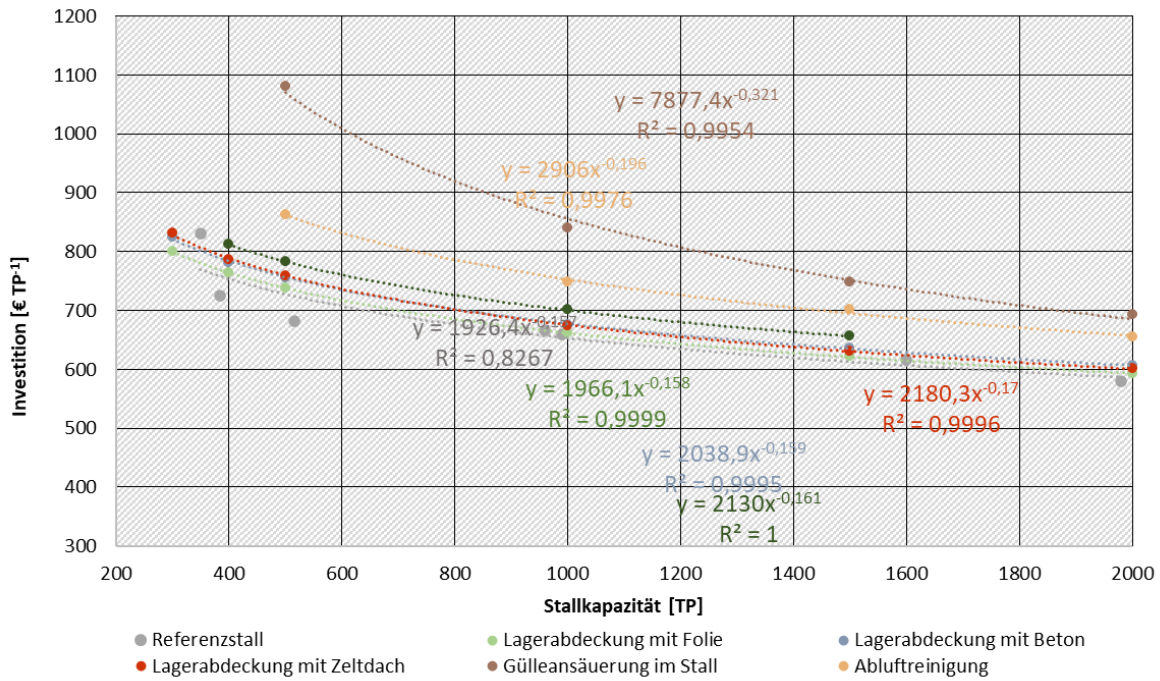
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

3.2.2.3 Mastschweine

Hinsichtlich des spezifischen Investitionsbedarfs (Abbildung 14) weisen die Minderungsmaßnahmen, welche im Stall implementiert werden, einen höheren Investitionsbedarf auf als die Maßnahmen bei der Lagerung von Gülle. Die Ansäuerung der Gülle im Stall und Abluftreinigungstechnik sind die Minderungstechniken mit dem höchsten Investitionsbedarf. Der Investitionsbedarf für den Stall inklusive der stallintegrierten Maßnahmen bewegt sich für Anlagen mit niedriger Tierplatzzahl (500 TP) zwischen 863 und 1.080 € TP^{-1}; für hohe Tierplatzzahlen (2.000 TP) zwischen 655 und 693 € TP^{-1}.

Der Investitionsbedarf der Abdeckungsoptionen von Ställen mit Güllelagerbehältern liegt für kleine Ställe (300 TP) im Bereich von 801 (Folie) bis 832 € TP^{-1} (Zeltdach), für große Ställe (2.000 TP) zwischen 593 (Folie) und 606 € TP^{-1} (Beton). Auch in Mastschweineställen ist die Abdeckung mit Schwimmfolie die Option mit dem niedrigsten Investitionsbedarf. Ab einer Stallkapazität von 444 Plätzen unterschreitet der Investitionsbedarf für Zeltdachabdeckungen den für Abdeckungen mit Betondecke. Der Investitionsbedarf für die Verlagerung und Abdeckung von 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle in außenliegende Güllebehälter liegt für die untersuchten Stallgrößen (400 – 1.500 TP) zwischen 656 und 812 € TP^{-1} a^{-1} und daher zwischen dem Investitionsbedarf von Lagerabdeckungen und der im Stall integrierten Minderungstechnik.

Abbildung 14: Spezifischer Investitionsbedarf von Stallgebäuden mit und ohne NH_3-Minderungstechniken in Mastschweineställen inklusive Güllelager mit Vollspaltenboden in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl

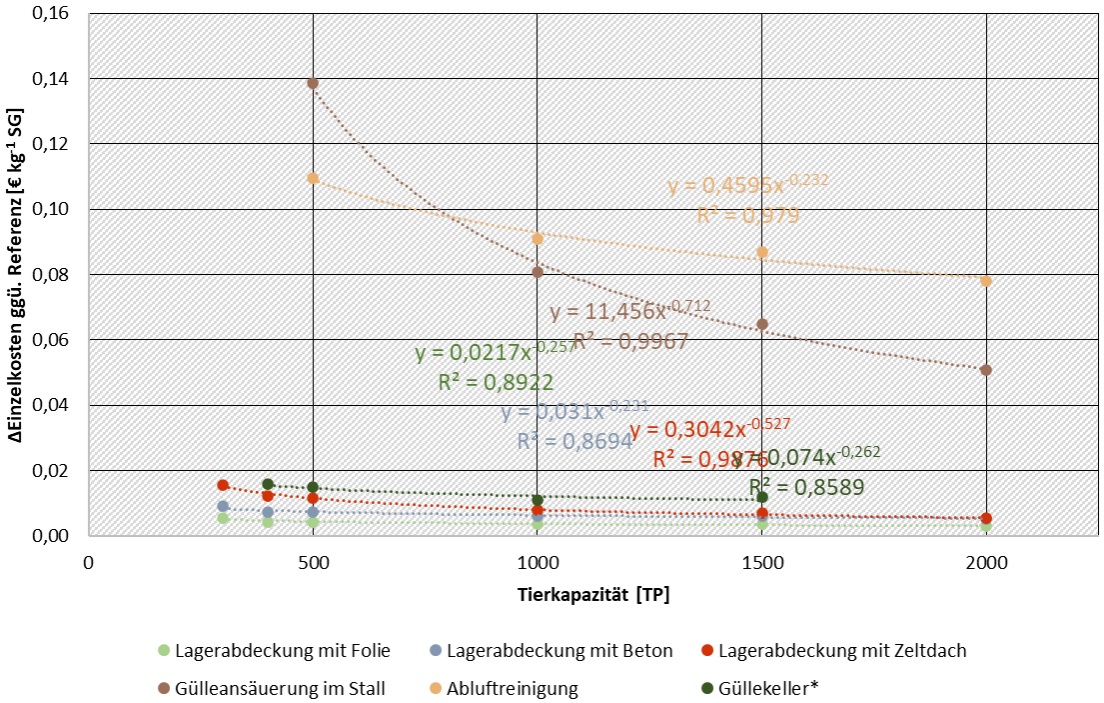


* Statt der Lagerung im Güllekeller wird 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle im Außenlager abgedeckt gelagert.
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Der hohe Investitionsbedarf der Minderungsmaßnahmen im Stall (Abluftreinigung, Ansäuerung) führt folglich zu einer stärkeren Erhöhung der Einzelkosten gegenüber dem Referenzstall ohne Minderungstechnik. Verglichen mit den Minderungstechniken im Lager durch Abdeckung der Güllebehälter sind die Einzelkostendifferenzen der Techniken im Stall deutlich größer. Die Differenzen für die verschiedenen Abdeckungen der Lager unterscheiden sich nur marginal; die größten Unterschiede zwischen den Abdeckungen gibt es für kleine

Ställe. Für niedrige Stallkapazitäten (300 TP) liegt die Einzelkostendifferenz zwischen 0,0054 (Folie) und 0,0157 € kg^{-1} SG (Zeltdach). Die Verlagerung der Gülle vom Güllekeller in ein Außenlager hat eine Erhöhung der Einzelkosten von 0,012 – 0,016 € kg^{-1} SG zur Folge. Schwimmfolien erhöhen die Einzelkosten am wenigsten (Abbildung 15).

Abbildung 15: Änderung der Einzelkosten durch Implementierung verschiedener Minderungstechniken in Mastschweineställen mit Vollspaltenboden und Güllelager in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl



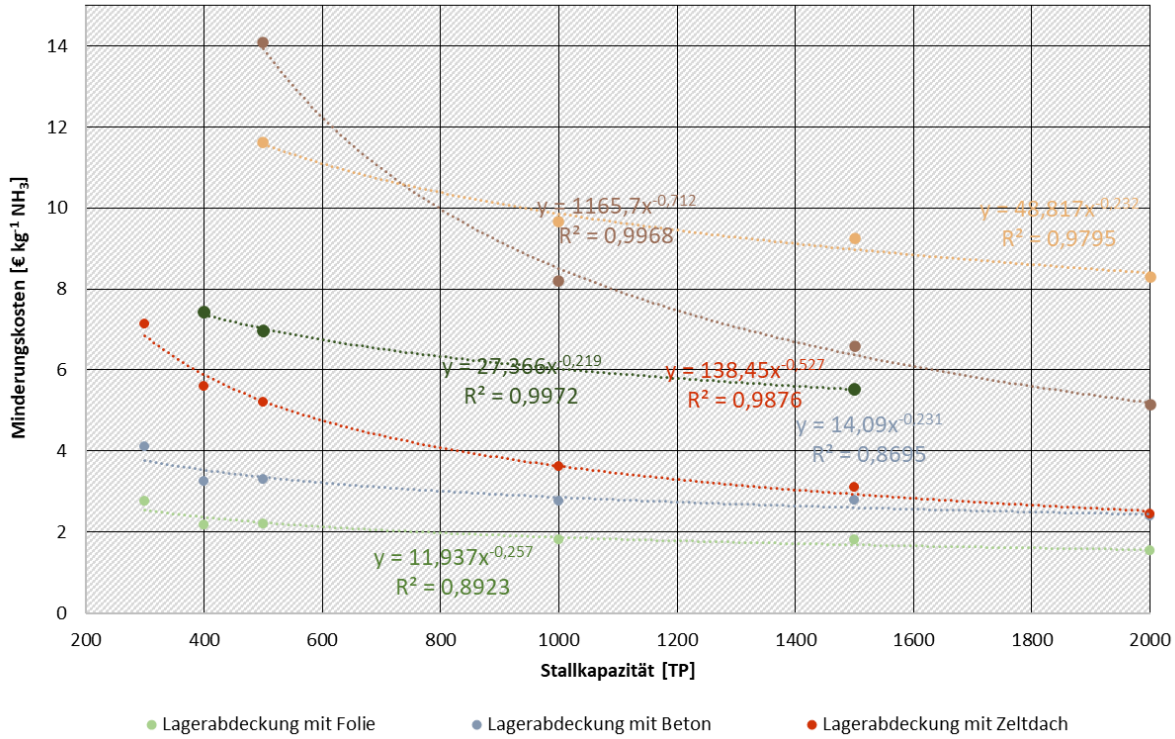
* Statt der Lagerung im Güllekeller wird 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle im Außenlager abgedeckt gelagert
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 16 zeigt die sich aus den Maßnahmenkosten und der Minderungswirkung ergebenden, spezifischen NH_3-Minderungskosten. Grundsätzlich sind die spezifischen Minderungskosten für die Techniken im Stall höher als die der Abdeckung der Güllelagerbehälter. Trotz des hohen Investitionsbedarfs der Ansäuerungstechnik unterschreiten die spezifischen Minderungskosten der Gülleansäuerung die Minderungskosten der Abluftreinigung aufgrund größerer Skaleneffekte ab einer Stallgröße von 743 Mastschweinen. Die begründet sich vornehmlich durch die höheren Direktkosten für die Abluftreinigung (vgl. auch Abbildung 15 und Abbildung 16).

Die Verlagerung der Gülle aus dem Güllekeller in Güllebehälter weist aufgrund geringerer Minderungseffekte bei gleichzeitig höheren Kosten im Vergleich zur Güllelagerabdeckung hohe spezifische Minderungskosten auf. Diese liegen für die untersuchten Stallgrößen zwischen 5,53 und 7,40 € kg^{-1} NH_3. Die spezifischen Minderungskosten für die Abdeckung von Güllelagerbehältern mittels Schwimmfolie sind grundsätzlich am geringsten. Die Minderungskosten für die Lagerabdeckungsmöglichkeiten bewegen sich für kleine Stallgrößen (300 TP) zwischen 2,77 (Folie) und 7,13 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach); für große Ställe (2.000 TP) zwischen 1,54 (Folie) und 2,44 € kg^{-1} NH_3 (Zeltdach). Die Minderungskosten für Abdeckung mit Zeltdach sind für kleine Ställe hoch, allerdings sind die Skaleneffekte dieser Technik im Vergleich zu Abdeckungen mit Schwimmfolie oder Beton relativ groß, sodass die Minderungskosten für Abdeckungen mit Zeltdächern und Beton für große Ställe nahezu gleich hoch sind (2,39 € kg^{-1} NH_3 für Beton-, 2,44 € kg^{-1} NH_3 für Zeltdachabdeckungen).

Allgemein sind die Minderungstechniken, die im Stall umgesetzt werden, im Vergleich zu den Minderungsmaßnahmen im Lager deutlich kostenintensiver. Aufgrund des hohen Investitionsbedarfs für die stallintegrierten Techniken sowie den hohen Einzelkosten für Ställe mit Abluftreinigungsanlagen sind diese Minderungstechniken aufgrund der Skaleneffekte vorzugsweise in größeren Betrieben anzuwenden. Grundsätzlich ist die Güllelagerabdeckung zur Minderung von Ammoniakemissionen eine kosteneffiziente Wahl – vor allem für kleine Mastschweinebetriebe.

Abbildung 16: Emissionsminderungskosten für verschiedene Minderungstechniken in Mastschweineställen mit Vollspaltenboden in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl

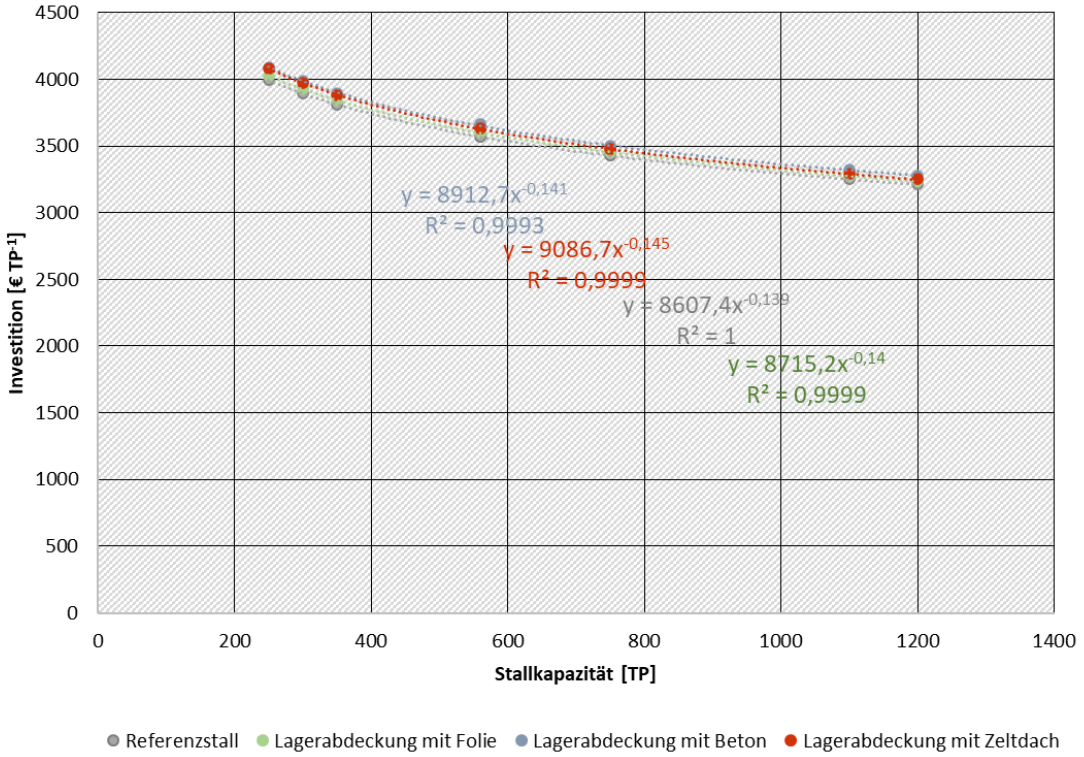


* Statt der Lagerung im Güllekeller wird 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle im Außenlager abgedeckt gelagert
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

3.2.2.4 Zuchtsauen

Der Investitionsbedarf der Güllelagerabdeckungen in Zuchtsauenställen (Abbildung 17) liegt für kleine Stallanlagen mit 300 Plätzen für Stall und Lager zwischen 3.925 (Schwimmfolie) und 3.985 € TP^{-1} (Beton). Bei größeren Stallanlagen (1.200 TP) werden Investitionen in Höhe von 3.234 (Zeltdach) bis 3.277 € TP^{-1} (Beton) erforderlich. Die Abdeckung mittels Schwimmfolie ist für die Zuchtsauenhaltung hinsichtlich des Investitionsbedarfs die günstigste Option.

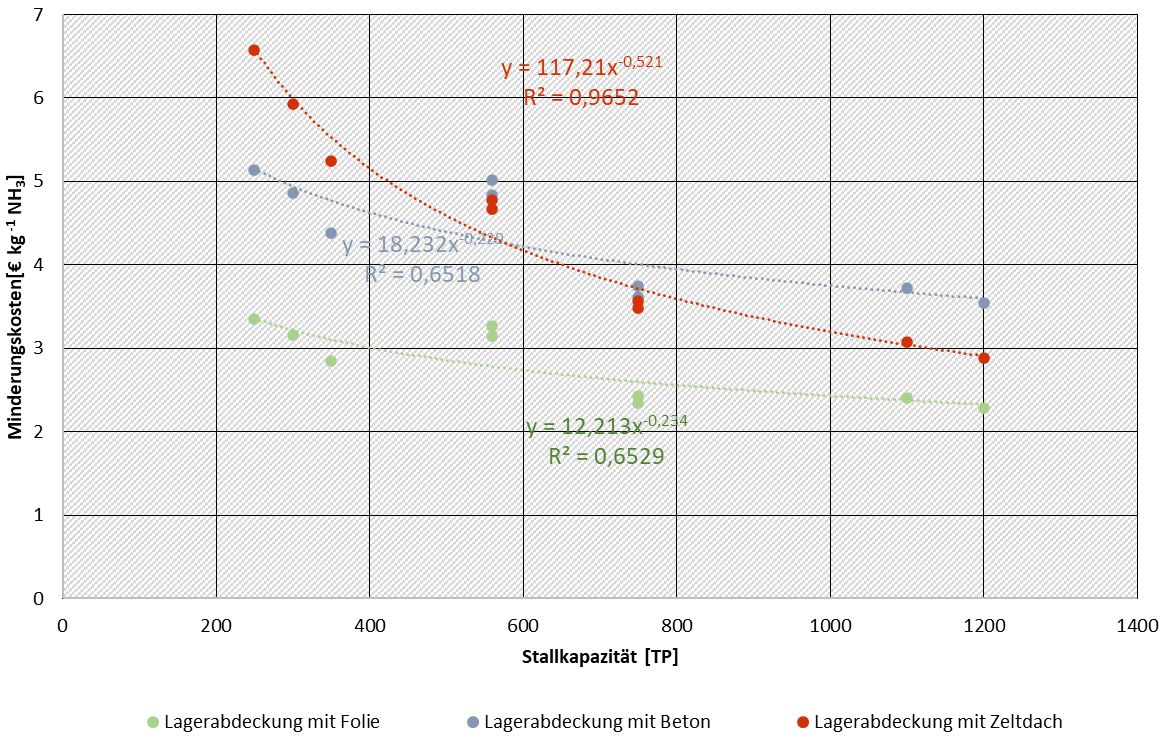
Abbildung 17: Spezifischer Investitionsbedarf von Stallgebäuden mit und ohne NH_3-Minderungstechniken in Zuchtsauenställen mit Vollspaltenboden in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Analog hierzu stellt die Abdeckung mit Schwimmfolie auch hinsichtlich der spezifischen Minderungskosten die beste Option dar (Abbildung 18). Pro Kilogramm gemindertem Ammoniak fallen bei der Abdeckung mit Folie Kosten in Höhe von 2,28 bis 3,16 € an. Ab einer Stallgröße von 586 Plätzen unterschreiten die Minderungskosten der Abdeckung mit Zeltdach aufgrund der Skaleneffekte die der Lagerabdeckung mit Beton, liegen aber noch immer über den Minderungskosten für die Abdeckung mittels Schwimmfolie.

Abbildung 18: Emissionsminderungskosten für der Implementierung verschiedener Minderungstechniken in Zuchtsauenställen mit Vollspaltenboden in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl

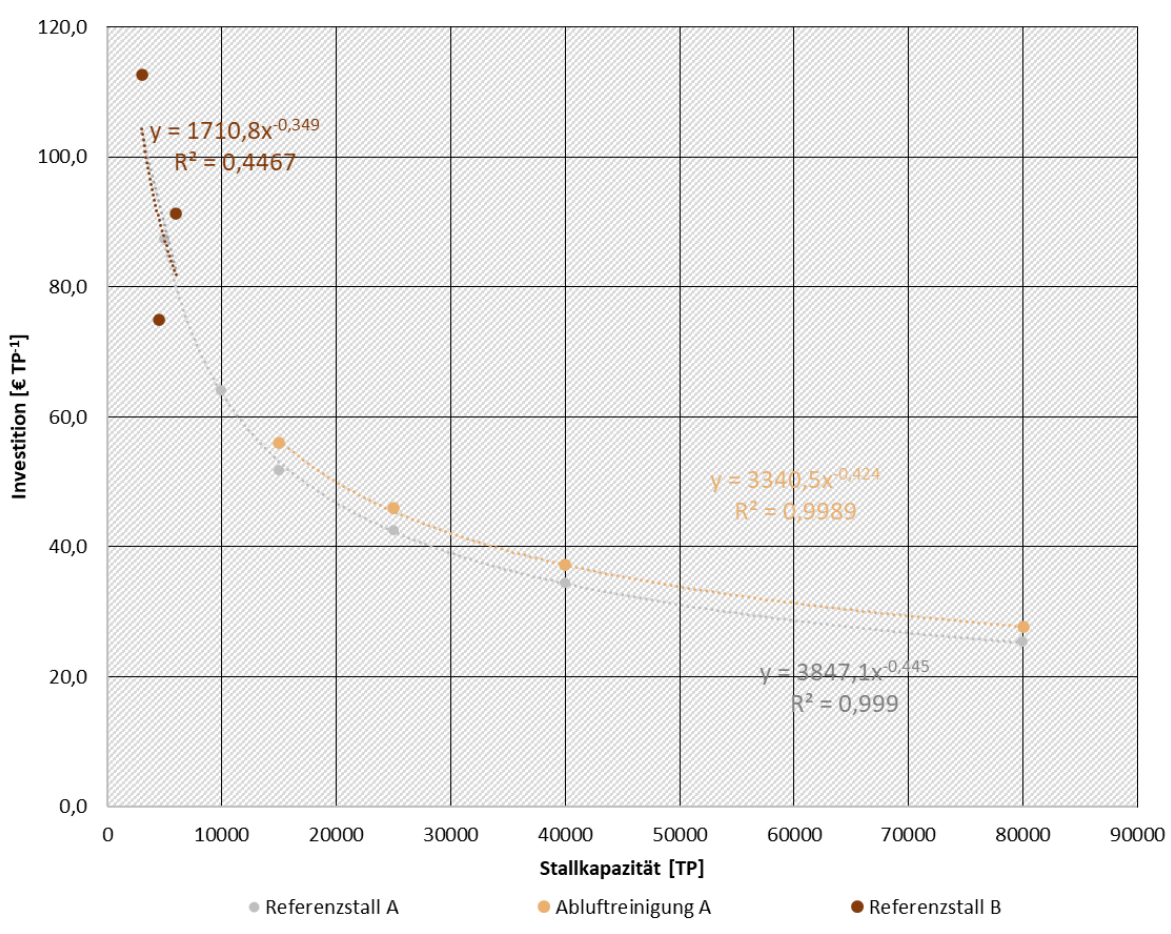


Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

3.2.2.5 Legehennen

Stallgebäude mit Bodenhaltung weisen einen höheren Investitionsbedarf als Volierenställe auf. Für Stallgrößen von 6.000 Legehennen liegt dieser für Volierenställe bei 80,1 € TP^{-1}, während der Investitionsbedarf für einen Stall mit Bodenhaltungsverfahren bei 91,3 € TP^{-1} liegt. Die skalenabhängigen Investitionsbedarfsfunktionen der Volierenställe mit und ohne Abluftreinigungsanlage verlaufen nahezu parallel. Für die untersuchten Stallgrößen ist der Investitionsbedarf für Ställe mit Abluftreinigung 7 – 9 % höher: Für kleine Stallanlagen mit 15.000 Tierplätzen und Abluftreinigung beträgt der Investitionsbedarf 56,0, für den Referenz-Volierenstall 51,8 € TP^{-1}. Für Legehennenställe mit 80.000 Tierplätzen sinkt der Investitionsbedarf auf 27,6 resp. 25,3 € TP^{-1} (Abbildung 19).

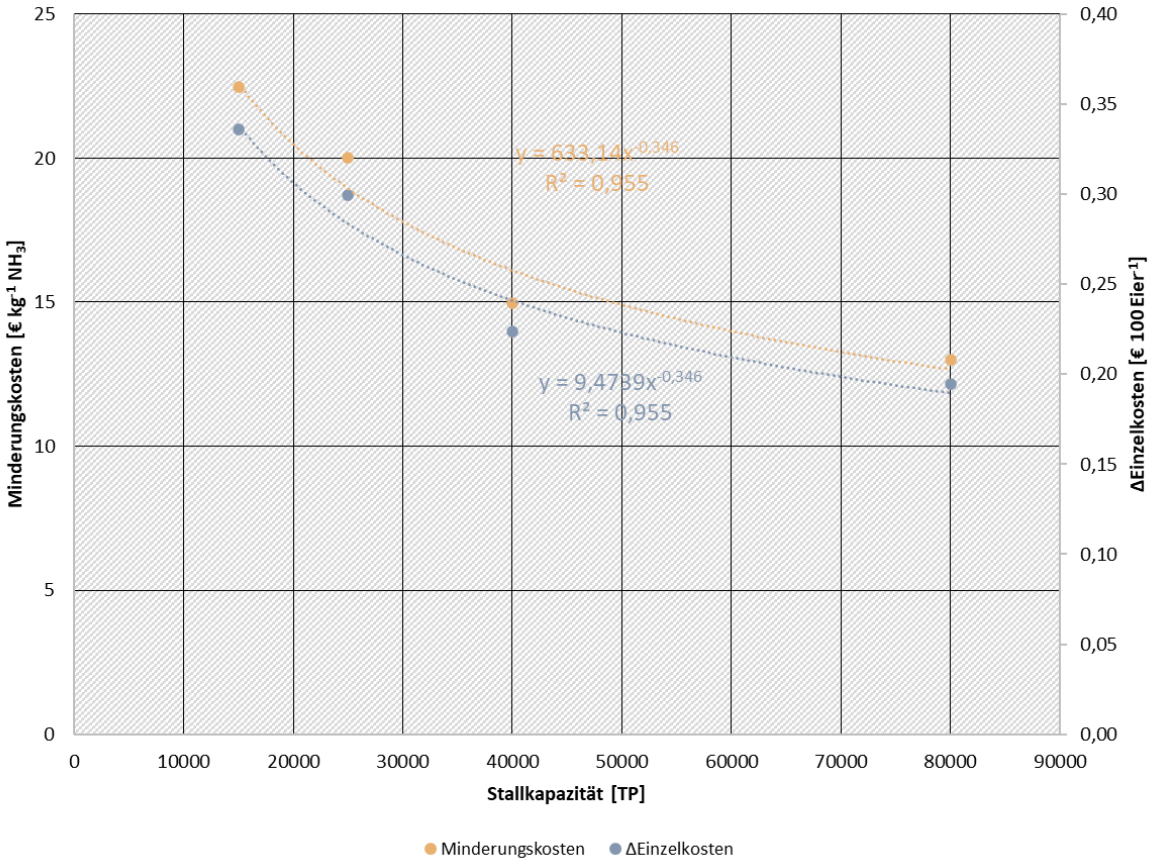
Abbildung 19: Spezifischer Investitionsbedarf von Stallgebäuden mit und ohne NH_3-Minderungstechniken in Legehennenställen in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl



Referenzstall A = Volierenhaltung; Referenzstall B = Bodenhaltung
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Die Änderung der Einzelkosten (Abbildung 20) gegenüber dem Referenzverfahren durch die Installation einer Abluftreinigungsanlage bewegt sich zwischen 0,32 (15.000 TP) und 0,18 € 100 $Eier^{-1}$ (80.000 TP). Die spezifischen NH_3-Minderungskosten (Abbildung 20) halbieren sich nahezu für die untersuchten Stallgrößen und liegen zwischen 22,46 (15.000 TP) und 13,01 € kg^{-1} NH_3 (80.000 TP).

Abbildung 20: Änderung der Einzelkosten und Emissionsminderungskosten, sich ergebend aus der Installation einer Abluftreinigungsanlage in Legehennenställen (Volierenhaltung) in Abhängigkeit von der Tierplatzzahl



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

3.2.3 Größenklassenabhängige Minderungskosten

3.2.3.1 Wirtschaftsdüngerlagerung

Tabelle 30 zeigt einen Überblick der sich ergebenden spezifischen Minderungskosten des Verfahrensschritts „Lager“, welche für die Berechnung der regionalen und nationalen Gesamtkosten der Einzelmaßnahmen und Szenarien eingesetzt werden. Die Minderungskosten liegen durch die Berücksichtigung verschiedener Stallgrößen bei der Berechnung der Stallmodelle für die definierten Größenklassen vor und unterliegen entlang dieser bei nahezu allen Maßnahmen und Tierkategorien einer ausgeprägten Größendegression. Die spezifischen Minderungskosten der Kategorien „Milchvieh“ und „Übrige Rinder“ sind grundsätzlich höher als die der Schweinekategorien. Zurückzuführen ist dies vor allem darauf, dass die Minderungseffekte der Maßnahmen in Schweinehaltungen mit Güllebehälter grundsätzlich höher sind, da Rindergülle bei der Lagerung meist eine natürliche Schwimmdecke aufweist, was niedrigere Referenzemissionen verglichen mit Schweinegülle zur Folge hat. Dementsprechend führen die Minderungsmaßnahmen bei Schweinegülle zu einer deutlich stärkeren Reduzierung der NH_3-Emissionen und sind somit kosteneffektiver (siehe auch Döhler et al., 2011; Tabelle 12 und Tabelle 13).

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus der Berechnung der spezifischen Minderungskosten der einzelnen Maßnahmen beschrieben sowie etwaige Besonderheiten und Abweichungen erörtert.

- 4a) Verpflichtende Abdeckung (mind. mit Folie) offener Lager flüssiger Wirtschaftsdünger:

  Die spezifischen Minderungskosten der Maßnahme 4a bewegen sich für Rindvieh zwischen 1,98 (Übrige Rinder) und 7,85 € kg^{-1} NH_3 (Milchvieh) und für Schweine zwischen 1,54 (Mastschweine) und 3,16 € kg^{-1} NH_3 (Zuchtsauen). Spezifische Minderungskosten für die Abdeckung von Gärrestbehältern liegen zwischen 4,12 und 5,25 € kg^{-1} NH_3. Für Legehennenställe betrifft die Maßnahme die Abdeckung von vergorenem Legehennenkot. Aufgrund fehlender Daten kann in diesem Fall die Stallgrößenklasse bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern keiner Größenklasse zugeordnet werden. Demnach wird für die spezifischen Minderungskosten der Wert für Biogasanlagengrößenklasse 2 einer mittleren Anlagengröße von 332 kW in Höhe von 4,52 € kg^{-1} NH_3 für alle Größenklassen angenommen. Zudem wird das Minderungspotenzial der Kategorie „Legehennen“ grundsätzlich als gering eingeschätzt und folglich auch der Einfluss auf die nationalen Kosten.

  Die vergleichsweise hohen Unterschiede zwischen den spezifischen Minderungskosten für Milchviehställe und Ställen der übrigen Rinder für Maßnahme 4a können durch die deutlich höheren Mehrkosten der Abdeckung von Güllelagerbehältern in Milchviehställen erklärt werden: Sowohl die Direktkosten, die Betriebskosten als auch die Gebäudekosten sind durch höhere Futterkosten, höheren Strom- und Arbeitszeitbedarf sowie größere Investitionen in Milchviehställen höher als die in Mastbullenställen, welche der Maßnahme 4a der Kategorie „Übrige Rinder“ zugrunde gelegt werden (s. auch die Kapitel 3.2.2.1 und 3.2.2.2 sowie Abbildung 10, Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14; Tabelle 11). Zudem wird angenommen, dass die Maßnahme in den Ställen für Übrige Rinder grundsätzlich in einen geringeren Teil des nationalen Tierbestands umgesetzt wird, was zu verhältnismäßig niedrigeren absoluten Umsetzungskosten Rinder führt. Die höheren Maßnahmenkosten in Verbindung mit der größeren Tieranzahl führen im Umkehrschluss zu hohen Umsetzungskosten für Milchvieh (s. auch Kapitel 2.4.3.3 und Anhang 1 Tabelle 44).

  Die Mehrkosten der Minderungsmaßnahme sind für Zuchtsauenställe der Größenklasse 4 trotz erwarteter Größendegression mit 0,06 € TP^{-1} a^{-1} trotz geringerer Gesamtkosten je Tierplatz geringfügig höher als für Betriebe der Größenklasse 3. Die jährlichen Gesamtkosten je Tierplatz der entsprechenden Referenzställe unterliegen demzufolge einer geringen Größendegression, sodass die Mehrkosten der Lagerabdeckung für Größenklasse 4 höher sind als diese für Größenklasse 3. Daraus resultieren hier geringfügig höhere (anstelle der zu erwartenden geringeren) spezifische Minderungskosten für Zuchtsauenbetriebe der Größenklasse 4. Skaleneffekte treten für Biogasanlagen nur begrenzt auf, da für die Größenklassen 4 und 5 zwei resp. drei Lagerbehälter gleicher Größe wie für GK 3 zugrunde gelegt werden (s. dazu auch Tabelle 10).

- 4b) Ergänzend zu 4a) – 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle werden im Außenlager gelagert und mind. (mit Folie) abgedeckt:

Für die Verlagerung der Hälfte der Unterflur gelagerten Gülle in ein abgedecktes Außenlager werden die Kosten aufgrund unzureichender Datengrundlage für die Rinder- und Schweinekategorien jeweils vereinheitlicht.
Die spezifischen Minderungskosten für Rindvieh liegen zwischen 36,70 und 46,29 € kg^{-1} NH_3, für Schweine zwischen 5,53 und 7,42 € kg^{-1} NH_3.
Die spezifischen Minderungskosten der Maßnahme 4b in Rindviehställen übersteigen die in Schweineställen um ein Vielfaches. Im Wesentlichen ist dieser Unterschied auf die bereits beschriebenen geringeren Referenzemissionen zurückzuführen. Andererseits hat die Lagerung der Hälfte der bisher Unterflur gelagerten Gülle im abgedeckten Außenlager keinen nennenswerten zusätzlichen Minderungseffekt. 99 % der Minderungswirkung der Maßnahme 4b in Milchviehställen resultiert aus der Umsetzung der Maßnahme 4a, 98 % in Mastschweineställen. Dem niedrigen Minderungsmehreffekt stehen aber, vor allem in Milchviehställen, vergleichsweise hohe Umsetzungskosten gegenüber. Diese Maßnahme mindert zusätzlich zu Maßnahme 4a in Milchviehställen 375.922 kg NH_3, kostet bei der Umsetzung allerdings 13,8 – 17,4 Mio. € a^{-1}, wohingegen die gleiche Maßnahme in Mastschweineställen 1.155.754 kg NH_3 mindert und Kosten in Höhe von 8,0 – 11,8 Mio. € a^{-1} verursacht (Anhang 1 Tabelle 44).

- 4c) Abdeckung von Rinder- und Schweinefestmist:

  Die Strukturdaten für die Abdeckung von Rinder- und Schweinefestmist sind für die Berechnung unterschiedlicher Stallgrößen nicht ausreichend, weswegen keine Größendegression abgeleitet werden kann. Spezifische Minderungskosten für Rindvieh und Schweine betragen 19,47 resp. 2,23 € kg^{-1} NH_3.

Ammoniak kann im Verfahrensschritt „Lager“ sowohl in Rinder- als auch Schweineställen am kosteneffizientesten mit Maßnahme 4a gemindert werden. Besonders minderungseffizient ist die Abdeckung der Lager in Mastschweineställen. Maßnahme 4c weist zwar im Vergleich zu 4b hinsichtlich der Minderungskosten zwar Vorteile auf, allerdings ist aufgrund der unzureichenden Strukturdaten bzgl. der Abdeckung von Festmist in Rinder- und Schweineställen mit Unsicherheiten zu rechnen. Maßnahme 4b weist – zumindest für Rindvieh – mit Abstand die kostenintensivste Ammoniakminderung auf.

Tabelle 30: Spezifische Minderungskosten für Minderungsmaßnahmen bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern

Maßnahme und Kategorie	NH_3-Minderungskosten [€ kg^{-1} NH_3] Größenklasse				
	1	2	3	4	5
4a					
Milchvieh	7,85	7,85	5,68	4,89	4,36
Übrige Rinder	4,50	1,98	1,98	1,98	1,98
Mastschweine	2,20	1,80	1,80	1,54	-
Zuchtsauen	3,16	3,15	2,35	2,40	-
Legehennen[1]	4,52	4,52	4,52	4,52	-
Biogasanlagen	5,25	4,52	4,12	4,35	4,20
4b[2]					
Milchvieh	46,29	46,29	46,29	36,86	36,70
Übrige Rinder	46,29	46,29	46,29	36,86	36,70
Mastschweine	7,42	6,96	5,53	5,53	-
Zuchtsauen	7,42	6,96	5,53	5,53	-
4c[3]					
Milchvieh	19,47				
Übrige Rinder	19,47				
Mastschweine	2,28				
Zuchtsauen	2,28				

[1] Die Maßnahme 4a der Tierkategorie „Legehennen“ betrifft die Abdeckung offener Lager vergorenem Legehennenkots. Aufgrund fehlender Daten kann die Stallgrößenklasse bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern keiner Größenklasse zugeordnet werden. Folglich wird für die spezifischen Minderungskosten der Wert für Biogasanlagengrößenklasse 2 einer mittleren Anlagengröße von 332 kW angenommen, da das Minderungspotenzial der Kategorie grundsätzlich als gering eingeschätzt wird.

Aufgrund unzureichender Datengrundlage wurden die spezifischen Minderungskosten der Maßnahme 4b für die Tierkategorien „Milchvieh“ und „Übrige Rinder“ sowie „Mastschweine“ und „Zuchtsauen“ vereinheitlicht und beruhen auf den Ergebnissen für Milchvieh- resp. Mastschweineställe.

[3] Die Ausgangsdaten für die Abdeckung von Rinder- und Schweinefestmist sind für die Berechnung unterschiedlicher Stallgrößen nicht ausreichend. Daher kann keine Größendegression abgeleitet werden.

4a) Verpflichtende Abdeckung (mind. mit Folie) offener Lager flüssiger Wirtschaftsdünger

4b) Ergänzend zu 4a) – 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle werden im Außenlager gelagert und (mind. mit Folie) abgedeckt

4c) Abdeckung von Rinder- und Schweinefestmist in überdachten Mistlagerstätten

3.2.3.2 Stallhaltung

Tabelle 31 zeigt die spezifischen Minderungskosten des Verfahrensschritts „Stall“ der stallintegrierten Maßnahmen.

Tabelle 31: Spezifische Minderungskosten der Minderungsmaßnahmen für stallintegrierte Techniken und Maßnahmen

Maßnahme und Tierkategorie	NH_3-Minderungskosten [€ kg^{-1} NH_3] Größenklasse			
	1	2	3	4
5g[1]				
Mastschweine	11,62	9,67	9,24	8,29
Zuchtsauen	11,62	9,67	9,24	8,29
Legehennen	22,46	20,02	14,95	13,01
6g[1]				
Mastschweine	-0,72	-0,72	-2,29	-2,29
Zuchtsauen	-0,72	-0,72	-2,29	-2,29

[1] Aufgrund unzureichender Datengrundlage wurden die spezifischen Minderungskosten der Maßnahmen in Schweineställen vereinheitlicht und beruhen auf den Ergebnissen für Mastschweine.

5g) Abluftreinigung in nach BImSchV-G-Anlagen (Schweine und Geflügel, ohne Puten), 50 % Umsetzung

6g) Reduzierung der NH_3-Emissionen im Stall um 20 % in BImSchV-G+V-Anlagen (ohne Rinder) durch stark und sehr stark N-reduzierte Fütterung, 50 % Umsetzung

- 5g) Abluftreinigung in nach BImSchV-G-Anlagen – 50 % Umsetzung:
  Die spezifischen Minderungskosten für Abluftreinigungsanlagen betragen für Schweinehaltung zwischen 8,29 und 11,62 € kg^{-1} NH_3, für Legehennen zwischen 13,01 und 22,46 € kg^{-1} NH_3.

  Zwar lassen die Unterschiede zwischen Legehennen- und Schweineställen keinen unmittelbaren Vergleich der Minderungsmehrkosten zu, allerdings kann die Abweichung zwischen Schweine- und Legehennenbetrieben mit dem geringeren Minderungseffekt von Abluftreinigungsanlagen in Legehennenställen begründet werden

- 6g) Reduzierung der NH_3-Emissionen im Stall um 20 % in BImSchV-G+V-Anlagen (ohne Rinder) durch stark und sehr stark reduzierte Fütterung – 50 % Umsetzung:

  Durch die Umsetzung einer N- und P-reduzierten Fütterung mit bedarfsgerechter Energie- und Nährstoffversorgung können in der Schweinehaltung Kosten reduziert werden. Spezifische Minderungskosten liegen für Betriebe der Größenklassen 1 und 2 bei -0,72 € kg^{-1} NH_3 und für Betriebe der Größenklassen 3 und 4 bei -2,29 € kg^{-1} NH_3.

3.2.4 Kosten der Maßnahmen bei Umsetzung in der deutschen Landwirtschaft

Die Kosten für die im Vorhaben definierten Maßnahmen sind in der Tabelle 32 zusammengefasst. Hierbei zeichnen sich zunächst die grundsätzlich höheren spezifischen Minderungskosten bei der Umsetzung von Maßnahmen bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern ab. Die jährlichen Kosten für Maßnahmen der Wirtschaftsdüngerausbringung liegen zwischen 15,3 und 120,18 Mio. €; für Maßnahmen der Wirtschaftsdüngerlagerung liegen diese trotz der geringeren zu erreichenden Minderungswirkung (Häußermann et al., 2020; Abbildung 6 und Abbildung 7) zwischen 34,5 und 367,6 Mio. €. Besonders auffallend sind die hohen Kosten für die Maßnahme 4c, die anteilig zu 99 % durch die Umsetzung in Rinderställen verursacht werden. Gründe sind rd.

achtmal höhere spezifische Minderungskosten für 4c in Rinderställen (Tabelle 28) sowie die absolut höheren Emissionen durch die Rinderhaltung.

Stallintegrierte Maßnahmen (Xg, 5g, 6g) werden nur auf die unter die 4. BImSchV fallenden Betriebe mit Schweine- und Geflügelhaltung berechnet. Folglich sind die absoluten Minderungskosten hierfür vergleichsweise gering. Durch Umsetzung einer stickstoffreduzierten Fütterung in Mastschweineställen (6g) werden Kosten in Höhe von 17,1 Mio. € durch Mengenanpassungen der Futtermittel eingespart.

Tabelle 32: Kosten der Maßnahmen bei Umsetzung in der deutschen Landwirtschaft

MNr.	Kurzbeschreibung	Minderungskosten Mio. €
1b	Verkürzung Einarbeitungszeit auf < 1 h für flüssige WSD (Gülle, Gärreste, Jauche) und Festmist (Rinder, Schweine und Geflügel) auf unbestelltem Ackerland; Verbot von Breitverteilern; Einarbeitungspflicht auf unbestelltem Ackerland auch für Festmist von Pferden und Schafen	18,9
2b	Ausbringung flüssiger WSD auf bewachsenem Ackerland mit Schlitzverfahren oder Schleppschlauch mit Ansäuerung	41,9
3b	Ausbringung flüssiger WSD auf Grünland mit Schlitzverfahren oder Schleppschlauch mit Ansäuerung	120,18
3c	Ansäuerung von 50 % der Rinder- und 50 % der Schweinegülle	30,9
3d	Ansäuerung von 50 % der Gärreste	15,3
4a	Abdeckung (min. mit Folie) von offenen Lagern flüssiger WSD	34,5
4b	Ergänzend zu 4a - 50 % der bisher Unterflur gelagerten Gülle werden im Außenlager gelagert und (min. mit Folie) abgedeckt	83,0[1]
4c	Abdeckung von Rinder- und Schweinefestmist	367,6[2]
4h	Abdeckung (min. mit Folie) von offenen Lagern flüssiger WSD in BImSchV-G+V-Anlagen, 50 % Umsetzung	2,5
Xg	Weitere unspezifische Maßnahmen mit 40 % Emissionsminderung in Schweineställen von BImSchV-V-Anlagen, 50 % Umsetzung	10,5
5g	Abluftreinigung in nach BImSchV-G-Anlagen, Schweine und Geflügel ohne Puten, 50 % Umsetzung	63,4
6g	Reduzierung der NH_3-Emissionen im Stall um 20 % in BImschV-G+V-Anlagen (ohne Rinder) durch stark und sehr stark N-reduzierte Fütterung, 50 % Umsetzung	-17,1

[1] Maßnahme 4b wird immer in Kombination mit Maßnahme 4a umgesetzt. Die kalkulatorischen Erfüllungskosten der Maßnahmen 4b liegen bei 48,5 Mio. €

[2] Über 99 % der Kosten entfallen auf die Umsetzung in Rindviehställen

3.3 Minderungsszenarien und deren Minderungswirkung

Die Tabelle 33 bis Tabelle 37 sowie die Abbildung 21bis Abbildung 25 zeigen Auswertungen der Ergebnisse der NEC-Szenarien 1 – 4 sowie des „TA Luft 50"-Szenarios. In den folgenden Kapiteln werden Emissionen, Minderungswirkung, spezifische und summierte Minderungskosten der Szenarien differenziert nach deren Quell-Kategorie und ihres Quell-Orts (Stall – Lager – Ausbringung) dargestellt und beschrieben.

Da sich NEC 4 nur hinsichtlich der zusätzlichen Umsetzung der Maßnahme MD2a von NEC 1 unterscheidet, wird NEC 4 in den Abbildungen nicht gesondert dargestellt.

3.3.1 Minderungsszenarien auf nationaler Ebene

3.3.1.1 NEC-Compliance-Szenarien 1 – 4

Gesamtemissionen

Von den untersuchten NEC-Szenarien erfüllt mit 432,2 kt NH_3 lediglich NEC 3 eindeutig das geforderte Reduktionsziel auf einen jährlichen Emissionswert von 444 kt NH_3 für das Jahr 2030, die NEC-Szenarien 1,2 und 4 weisen ein Emissionsniveau von 462 bis 464 kt NH_3 auf, die geforderte Minderung wird also nicht ganz erreicht (Abbildung 21, Tabelle 33). Es kann aber aufgrund des derzeit zu erwartenden, beschleunigten Viehbestandsabbaus vor allem im Bereich der Schweine- und Rinderhaltung und der im Kalkulationswerkzeug nicht berücksichtigten Minderungsoptionen für die übrigen „Tierkategorien" davon ausgegangen werden, dass die Emissionen auf die geforderten 444 kt zurückgehen.

Sowohl die Minderungskosten als auch die NH_3-Emissionen der Szenarien NEC 1, 2 und 4 liegen auf einem ähnlichen Niveau. Die Szenarien NEC 1 und 4 unterscheiden sich hinsichtlich der angenommenen Maßnahmen im Bereich der Wirtschaftsdüngerausbringung und -lagerung nicht. NEC 4 beinhaltet zusätzlich die Absenkung der Stickstoffdüngung um 20 kg N pro Hektar landwirtschaftliche Fläche. Der Unterschied dieser beiden Szenarien zu NEC 2 liegt darin, dass NEC 2 keine Ansäuerung von 50 % der Gärreste (3d) beinhaltet und stattdessen vorsieht, flüssige Wirtschaftsdünger auf bewachsenem Ackerland mit Schlitzverfahren oder alternativ mit Ansäuerung auf dem Feld auszubringen (2b). Die Minderungswirkung von 2b beträgt 1,39 kt NH_3, bei gleichzeitig höheren Kosten von rd. 26,6 Mio. € (126 %) gegenüber NEC 1 und 4. Die erhöhten Kosten von NEC 2 spiegeln sich auch beim Vergleich der spezifischen Minderungskosten der Szenarien wider: Für NEC 1 und 4 liegen diese bei 1,34 resp. 1,30 € kg^{-1} NH_3. NEC 2 weist Minderungskosten in Höhe von 1,65 € kg^{-1} NH_3 auf. Insgesamt liegen die spezifischen Minderungskosten allerdings auf einem relativ geringen Niveau von < 2 € kg^{-1} NH_3.

Die Szenarien NEC 1 und 4 unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Senkung der Mineraldüngerzufuhr von 20 kg N pro Hektar landwirtschaftliche Fläche (MD2a) in NEC 4. Die Minderungswirkung durch diese zusätzliche Maßnahme steigert sich gegenüber dem Emissionsniveau von Bl2030 allerdings nur sehr geringfügig und senkt die spezifischen Minderungskosten pro gemindertem Kilogramm Ammoniak um lediglich 0,04 € kg^{-1} NH_3. Aufgrund der getroffenen Annahmen hinsichtlich der Maßnahmen zur Änderung des Mineraldüngermanagements gelten die Minderungskosten zunächst unter Vorbehalt. Es muss berücksichtigt werden, dass sich die Kosten bei der Umsetzung möglicherweise durch Investition in die Technik teilflächenspezifischer Düngung oder indirekt durch Ertragseinbußen erhöhen (s. Kapitel 2.4.4.1).

Mit einer relativen Abnahme um 25 % (75 % ggü. dem Emissionsniveau von Bl2030) weist NEC 3 das höchste Minderungspotenzial auf. Die Lagerung der Unterflur gelagerten Gülle im

abgedeckten Außenlager (4b) sowie die zusätzliche Abdeckung von Rinder- und Schweinefestmist (4c) im Rahmen der Umsetzung von NEC 3 bringt zwar eine zusätzliche Minderungswirkung von 5 bis 6 %, erhöht allerdings die Minderungskosten verglichen mit den anderen NEC-Szenarien um etwa das Vierfache (5,25 € kg^{-1} NH_3). Dies ist vor allem durch die Umsetzung der Maßnahmen 4b und 4c mit hohen spezifischen Minderungskosten für Rindvieh begründet (s. auch Tabelle 30; genauere Erläuterungen zur Kostenverteilung über die Tierkategorien im Abschnitt „Absolute Minderungskosten nach Kategorie und Verfahrensabschnitt“ in diesem Kapitel).

Tabelle 33: Nationale NH_3-Emissionen nach Umsetzung der Szenarien gegenüber Bl2030, sowie absolute und spezifische Minderungskosten

Szenario	Gesamtemission kt NH_3	Kosten Mio. €	Minderungseffekt ggü. Bl2030 %	Spez. Minderungs-kosten[1] € kg^{-1} NH_3
Bl2030	575,98	-	-	-
NEC 1	462,26	99,63	81	1,34
NEC 2	463,65	126,22	80	1,65
NEC 3	432,90	511,41	75	5,25
NEC 4	463,64	99,63	80	1,30
TA Luft 50[2]	555,11	59,33	98	6,31
TA Luft 50[3]	555,11	76,41	98	8,12

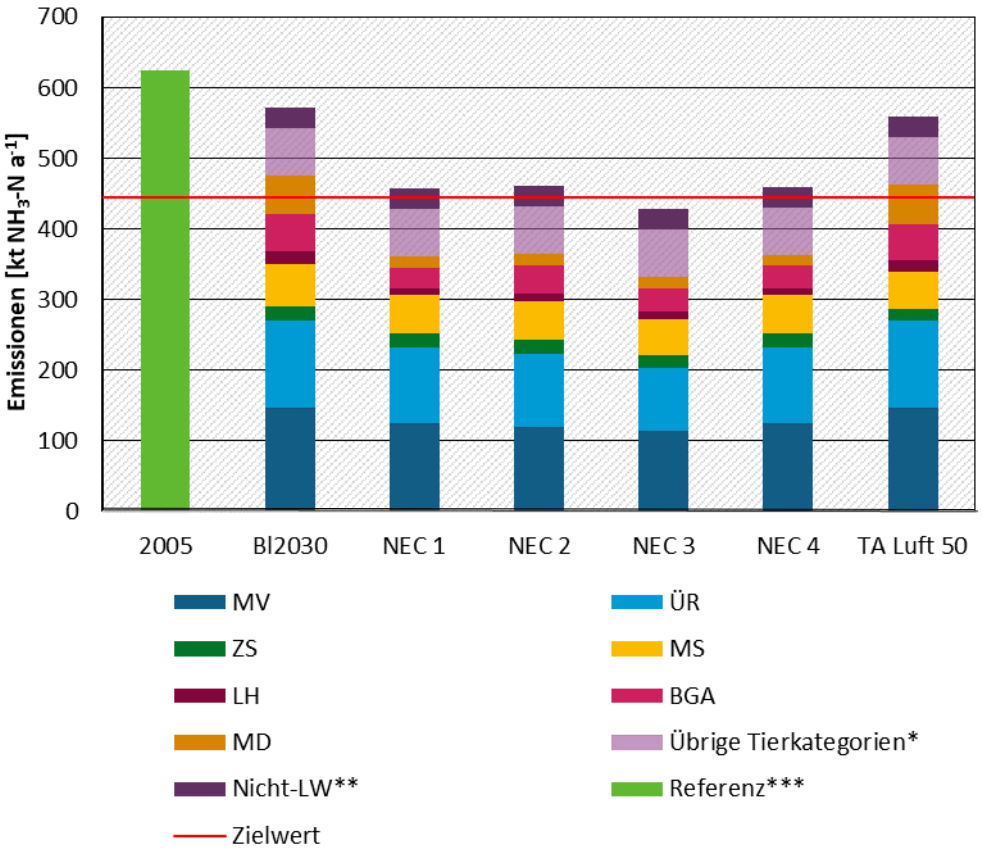
[1] Die spezifischen Minderungskosten beziehen sich auf die landwirtschaftlichen Emissionen (s. auch Abbildung 21). Bei der Angabe der Gesamtemissionen werden auch die nicht-landwirtschaftlichen Quellen (Industrie- und Verbrennungsprozesse sowie Abfall- und Abwasserbehandlungen) mitberücksichtigt. Dieser Wert in Höhe von 29 kt NH_3-N (BMU, 2019) wird in allen Szenarien als gegeben angenommen.

[2] Inklusive Kosteneinsparung bei Umstellung auf stickstoffreduzierte Fütterung.

[3] Exklusive der Kosteneinsparung bei Umstellung auf stickstoffreduzierte Fütterung.

Abbildung 21: Nationale Ammoniakemissionen des Referenzjahrs 2005, der Thünen-Baseline und der Szenarien NEC 1 bis 4 und TA Luft 50, untergliedert nach Quellkategorien: Die rote Linie zeigt den Zielwert der neuen NEC-Richtlinie (EU-RL 2016/2284) für das Jahr 2030 an.

*landwirtschaftliche Emissionen der Tierkategorien, die bei den Kostenberechnungen nicht berücksichtigt wurden
**Emissionen aus Industrie- und Verbrennungsprozessen sowie Abfall- und Abwasserbehandlung
***Das Jahr 2005 ist das Referenzjahr für die in der neuen NEC-Richtlinie festgelegten Reduktionsziele.
(MV = Milchvieh; ÜR = Übrige Rinder; ZS = Zuchtsauen; MS = Mastschweine; LH = Legehennen; BGA = Biogasanlagen; MD = Mineraldünger)



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

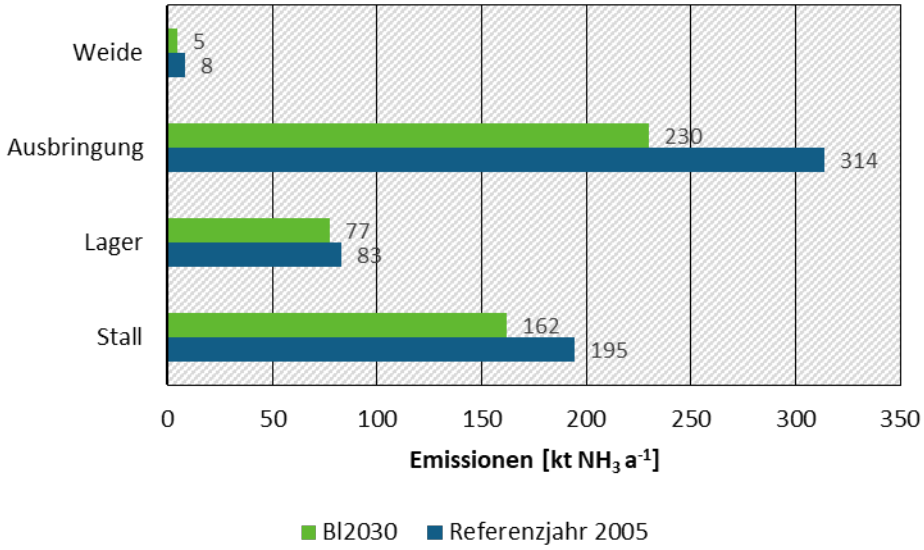
In Abbildung 21 werden auch die Beiträge der Tierkategorien, der Kategorie Biogasanlagen und der Kategorie Mineraldüngung dargestellt. Die Darstellung beinhaltet für jede Kategorie die Emission für die Entstehung, Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger. Zum einen ist erkennbar, dass aktuell und auch zukünftig die Rinderhaltung die Quellgruppe mit den höchsten Emissionen darstellt, gefolgt von Schweinen, den übrigen Tierkategorien (Geflügel außer Legehennen, Schafe, Ziegen, Pferde), Biogasanlagen und Mineraldünger. Weiterhin wird deutlich, dass mit den Annahmen in den NEC-Szenarien ein deutlicher Rückgang der Emissionen bei der Mineraldüngung (durch Optimierung der Düngung und Umstellung auf nicht Harnstoffhaltige Düngemittel) und Biogas (u.a. durch Anlagenrückbau) zu erwarten ist. Auch bei allen Tierkategorien werden die Maßnahmen sowie der Tierbestandsabbau zu Minderungseffekten führen.

Emissionen und Minderungseffekte nach Kategorie (Nutztierhaltung, Mineraldünger und Industrie) und Verfahrensabschnitt (Stall, Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern)

Wie die Baseline-Projektion (Bl2030) zeigt, werden die landwirtschaftlichen NH_3-Emissionen im Vergleich zum Jahr 2005 (Referenzjahr der neuen NEC-Richtlinie) innerhalb der Verfahrensschritte (Stall – Lager – Ausbringung (Wirtschaftsdünger) - Ausbringung von Mineraldüngern – Weide) von 599 kt NH_3 a^{-1}deutlich auf etwa 474 kt NH_3 a^{-1} absinken (Abbildung 22). Eine deutliche Reduktion der Emissionen von 27 % zeigt insbesondere der Verfahrensschritt „Ausbringung“, dies ist auf die Umsetzung der Regelungen der novellierten Düngeverordnung 2017 zurückzuführen. Die Minderungen der übrigen Verfahrensschritte können überwiegend auf die vermehrte Umsetzung von proteinreduzierten Fütterungsverfahren seit dem Jahr 2005 zurückgeführt werden.

Abbildung 22: NH_3-Emissionen des Jahres 2005[1] und der Baseline-Projektion Bl2030

[1] Referenzjahr der Reduktionsziele der neuen NEC-Richtlinie (EU-RL 2016/2284)



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Die Abbildung 23 und die Abbildung 24 geben Aufschluss über die Verteilung der Emissionen und Minderungseffekte innerhalb der NEC-Szenarien sowohl differenziert nach Tierkategorien als auch nach Verfahrensschritt. Die anteiligen Emissionen über die Tierkategorien und Verfahrensschritte hinweg bleiben innerhalb der Projektion Bl2030 und der Szenarien auf einem ähnlichen Niveau (Abbildung 23). Die Kategorien „Übrige Rinder“ und „Milchvieh“ machen die größten Anteile an der Gesamtemission in allen Szenarien aus (rd. 27 – 29 % übrige Rinder, 33 – 35 % Milchvieh). Hinsichtlich der weiteren Tierkategorien tragen Mastschweine mit 15 % der Emissionen und Zuchtsauen (5 – 6 %) sowie Legehennen (3 %) maßgeblich bei. Biogasanlagen machen in den Szenarien einen Emissionsanteil von 9 bis 11 % aus, die Ausbringung von Mineraldüngern einen Anteil von 4 bis 5 %. Die Emissionen aus dem Stall machen in allen Tierkategorien den größten Anteil aus. Bedingt durch die Zusammenfassung der Nicht-Milchkühe zu einer Kategorie „Übrige Rinder“ – diese Kategorie umfasst doppelt so viele Tiere wie die Kategorie „Milchvieh“ – und dem höheren Weideanteil bei der Haltung derer (Tabelle 23) ist der Anteil der im Stall entstehenden Emissionen der Milchkühe vergleichsweise höher. Für die weiteren Kategorien (bis auf die übrigen Rinder) machen die Emissionen nach der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in

allen NEC-Szenarien den nächstgrößeren Anteil aus, Emissionen der Weidewirtschaft den kleinsten Anteil. Aufgrund der Annahme, dass alle Gärrestlager gasdicht abgedeckt werden, treten bei der Lagerung von Biogasgärresten keine Emissionen auf.

Die Minderungseffekte bei den verschiedenen Kategorien für alle Szenarien ähnlich. (Abbildung 24). Die Minderungswirkung durch Anpassung des Mineraldüngermanagements ist mit 27 bis 37 % Anteil an der Gesamtminderungswirkung in allen Szenarien am größten und gleichzeitig unter den gegebenen Annahmen (s. auch Kapitel 2.4.4) einer kostenneutralen Verfahrensumstellung bei Umsetzung von MD1b und MD2a am kostengünstigsten. Milchvieh macht mit 19 bis 24 % den zweitgrößten Anteil an der Minderungswirkung aus, gefolgt von Biogasanlagen (12 – 17 %) und den übrigen Rindern (10 – 19 %). Die Kategorien Legehennen, Mastschweine und Zuchtsauen haben mit weniger als 10 % in den NEC-Szenarien grundsätzlich einen geringeren Minderungseffekt. Folglich weisen die Tierkategorien mit einem hohen Anteil an absoluten Emissionen auch einen hohen Minderungseffekt auf.

Die Minderungswirkung der Szenarien bei der Ausbringung von WSD ist in den Kategorien „Biogasanlagen“, „Legehennen“ und den beiden Rindviehkategorien (abgesehen von „Übrige Rinder“ in NEC 3) höher als bei der Lagerung. Die erhöhte Minderungswirkung bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern der übrigen Rinder ist auf Folgewirkungen der Produktionsschritte „Lager“ und „Ausbringung“ zurückzuführen, denn durch die Abdeckung des Rinderfestmists (4c) erhöhen sich die Emissionen im Rahmen der Ausbringung (wenn dort keine Minderungsmaßnahmen ergriffen werden) deutlich. In der Kategorie „Legehennen“ beschränkt sich die Minderungswirkung überwiegend auf die Emissionsminderung bei der Ausbringung der entstehenden WSD. Die Minderungseffekte innerhalb der Verfahrensschritte „Lager“ und „Ausbringung“ der Kategorien „Mastschweine“ und „Zuchtsauen“ bewegen sich in allen Szenarien auf einem ähnlichen Niveau.

Das Szenario NEC 3 weist über alle Tierkategorien hinweg eine höhere Minderungswirkung als die anderen NEC-Szenarien auf. Die besonders hohe Minderungswirkung – vornehmlich im Lager – in den Rindviehkategorien in NEC 3 ist auf die Umsetzung der Maßnahmen 4b und 4c zurückzuführen, die nicht Bestandteil der Maßnahmen in den Szenarien NEC 1, 2 und 4 sind (s. auch Tabelle 2). NEC 3 schließt verglichen mit den weiteren NEC-Szenarien weitergehende Maßnahmen zur Emissionsminderung im Lager ein, die wiederum zu erhöhten Emissionen bei der Wirtschaftsdüngerausbringung führt. Infolgedessen wird die Minderungswirkung bei der Ausbringung durch Wechselwirkungen verglichen mit NEC 1, 2 und 4 geschwächt.

Absolute Minderungskosten nach Kategorie und Verfahrensabschnitt

Die anteiligen Minderungskosten liegen innerhalb der Szenarien 1, 2 und 4 in einer ähnlichen Größenordnung (Abbildung 24). Tendenziell verursachen die Kategorien mit einer hohen anteiligen Minderungswirkung auch verhältnismäßig hohe Minderungskosten. Die Minderungsmaßnahmen im Bereich der Rinderhaltung (einschließlich Wirtschaftsdüngermanagement) macht in den Szenarien NEC 1, 2 und 4 65 bis 67 % der Gesamtkosten aus, in NEC 3 sind es 91 %. Milchvieh wiederum ist in den Szenarien NEC 1, 2 und 4 der größere Kostenfaktor, wohingegen die übrigen Rinder in NEC 3 aufgrund einer größeren Anzahl an Betrieben mit Güllekellern (4b) höhere Kosten verursachen. Minderungsmaßnahmen im Bereich der Biogasanlagen machen in NEC 1, 2 und 4 18 bis 21 % und in NEC 3 5 % der Gesamtkosten aus, die Maßnahmen in den weiteren Kategorien

(Mastschweine, Zuchtsauen, Legehennen) haben mit weniger als 10 % einen vergleichsweisen geringen Anteil an den Gesamtkosten. Der größte Anteil der Minderungskosten der Szenarien NEC 1, 2 und 4 entsteht über alle Kategorien hinweg bei der Wirtschaftsdüngerausbringung.

Besonders hoch sind die Kosten für Rinder in NEC 3, bedingt durch die kostenintensiven Maßnahmen 4b und 4c im Verfahrensabschnitt „Lager". Diese Maßnahmen weisen die kostenträchtigsten (hohe spezifische Minderungskosten) in Höhe von 36,70 bis 46,29 resp. 19,47 € kg-1 NH_3 für die Rindviehkategorien auf (s. auch Tabelle 30). Da die spezifischen Minderungskosten der o.g. Einzelmaßnahmen sowie absolute Minderungseffekte für Mastschweine und Zuchtsauen verhältnismäßig niedriger sind, ist der beschriebene Effekt für Schweine weniger stark ausgeprägt (s. auch Tabelle 30). NEC 3 beinhaltet keine Maßnahmen zur Wirtschaftsdüngerlagerung in Legehennenställen, folglich ergeben sich hier weder Minderungseffekte noch Umsetzungskosten.

Spezifische Minderungskosten nach Kategorie und Verfahrensabschnitt

Abbildung 25 zeigt die spezifischen Minderungskosten der NEC-Szenarien untergliedert nach Kategorie und dem jeweiligen Verfahrensschritt. Hinsichtlich der spezifischen Minderungskosten der Wirtschaftsdüngerlagerung unterscheiden sich NEC 1, 2 und 4 nicht voneinander, da sich die Minderungsmaßnahmen zur Emissionsminderung im Lager in diesen Szenarien auf die Umsetzung der Maßnahme 4a beschränken (s. auch Tabelle 2).

Generell sind die spezifischen Minderungskosten bei der Umsetzung von Maßnahmen im Lager in nahezu allen Szenarien und Kategorien größer als die der Maßnahmen zur Wirtschaftsdüngerausbringung und bewegen sich in den Szenarien NEC 1, 2 und 4 zwischen 2,17 (Mastschweine) und 4,76 € kg^{-1} NH_3 (Milchvieh). Diese höheren Kosten entstehen durch die höheren spezifischen Minderungskosten der Einzelmaßnahmen zur Emissionsminderung im Lager (Tabelle 29 und Tabelle 30) in Verbindung mit den allgemein geringeren Minderungseffekten von Maßnahmen im Rahmen der Wirtschaftsdüngerlagerung. Die kostenintensive Minderungsmaßnahme 4a (Abdeckung Gülle) – vor allem für Milchviehställe – verursacht hohe spezifische Minderungskosten des Verfahrensschritts „Lager" (Tabelle 30).

Die Unterschiede zwischen den spezifischen Minderungskosten in Mastschweine- und Zuchtsauenställen können mit dem höheren Anteil an güllebasierten Systemen in Mastschweinehaltungen erklärt werden, zudem sind die spezifischen Minderungskosten der Maßnahme 4a für Zuchtsauen höher als für Mastschweine.

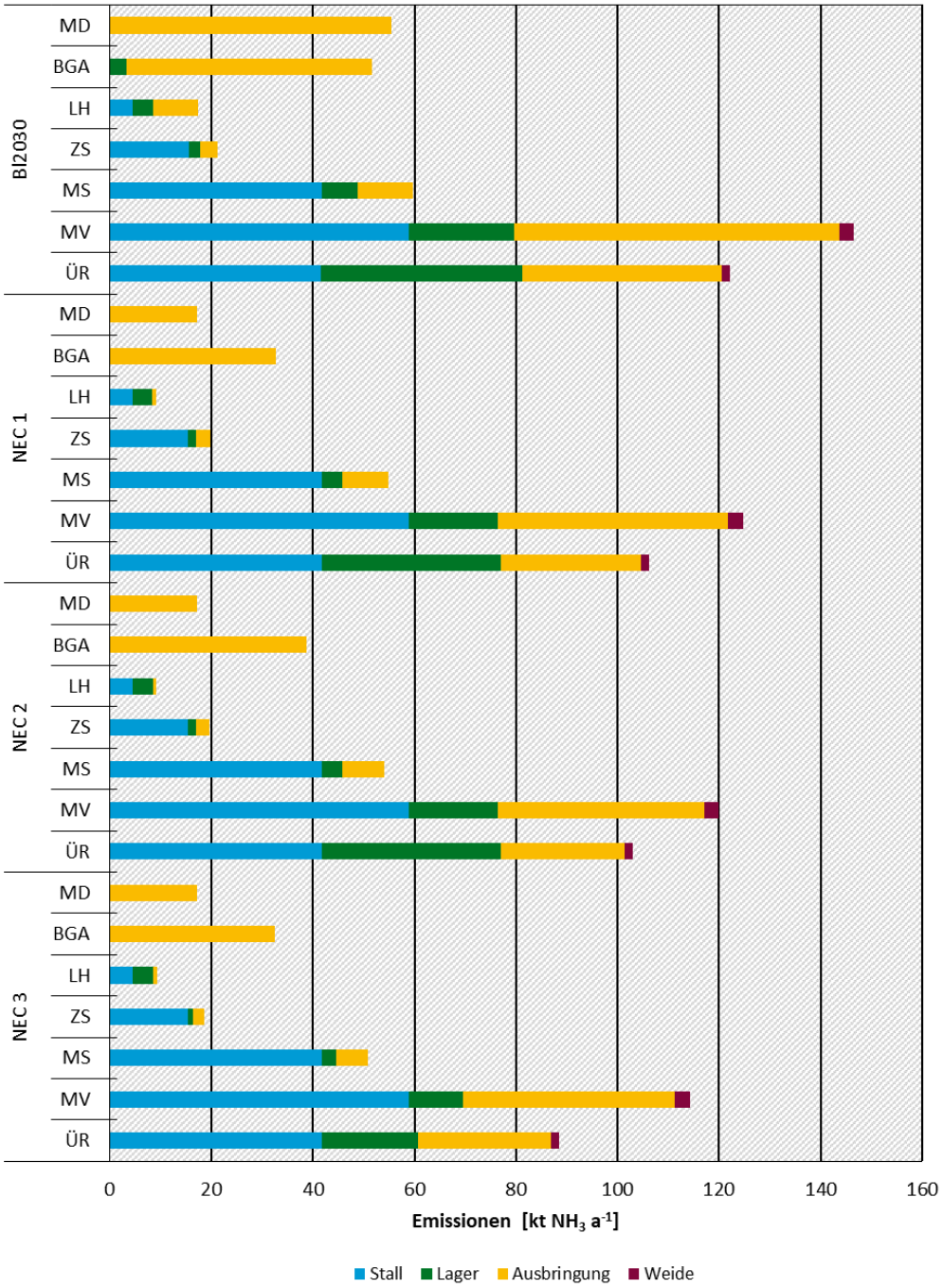
Durch die zusätzliche Umsetzung der Maßnahmen 4b und 4c in NEC 3 erhöhen sich nicht nur die Umsetzungskosten des Szenarios für Maßnahmen im Lager (Abbildung 24), sondern folglich auch deren spezifische Minderungskosten. Dementsprechend liegen die spezifischen Minderungskosten der Tierhaltungskategorien in NEC 3 zwischen 3,45 (Mastschweine) und 21,62 € kg^{-1} NH_3 (Milchvieh). Besonders ausgeprägt ist der Effekt der Erhöhung der Kosten in den Rindviehkategorien, bedingt durch die hohen spezifischen Minderungskosten der Einzelmaßnahmen 4b und 4c für Rinder (Tabelle 30). In Kombination mit der nur geringen Minderungswirkung, die durch die ergänzende Umsetzung von 4b zu 4a im Lager erzielt wird, erhöhen sich die spezifischen Minderungskosten für Minderungsmaßnahmen im Lager in Rindviehställen deutlich (s. auch Kapitel 3.2.2).

Die spezifischen Minderungskosten, die im Rahmen der Umsetzung von Minderungsmaßnahmen bei der Wirtschaftsdüngerausbringung entstehen, sind für NEC 1 und 4 tendenziell am niedrigsten und liegen für die Umsetzung in Biogasanlagen, Mastschweine- und Zuchtsauenställen unter 1,5 € kg^{-1} NH_3, in Legehennenställen sogar weniger als 1 € kg^{-1} NH_3. Die Minderungskosten für die Rindviehkategorien sind mit jeweils

rd. 2,30 € kg^{-1} NH_3 aufgrund der im Vergleich kostenintensiveren Einzelmaßnahme 3c geringfügig höher (Tabelle 29).

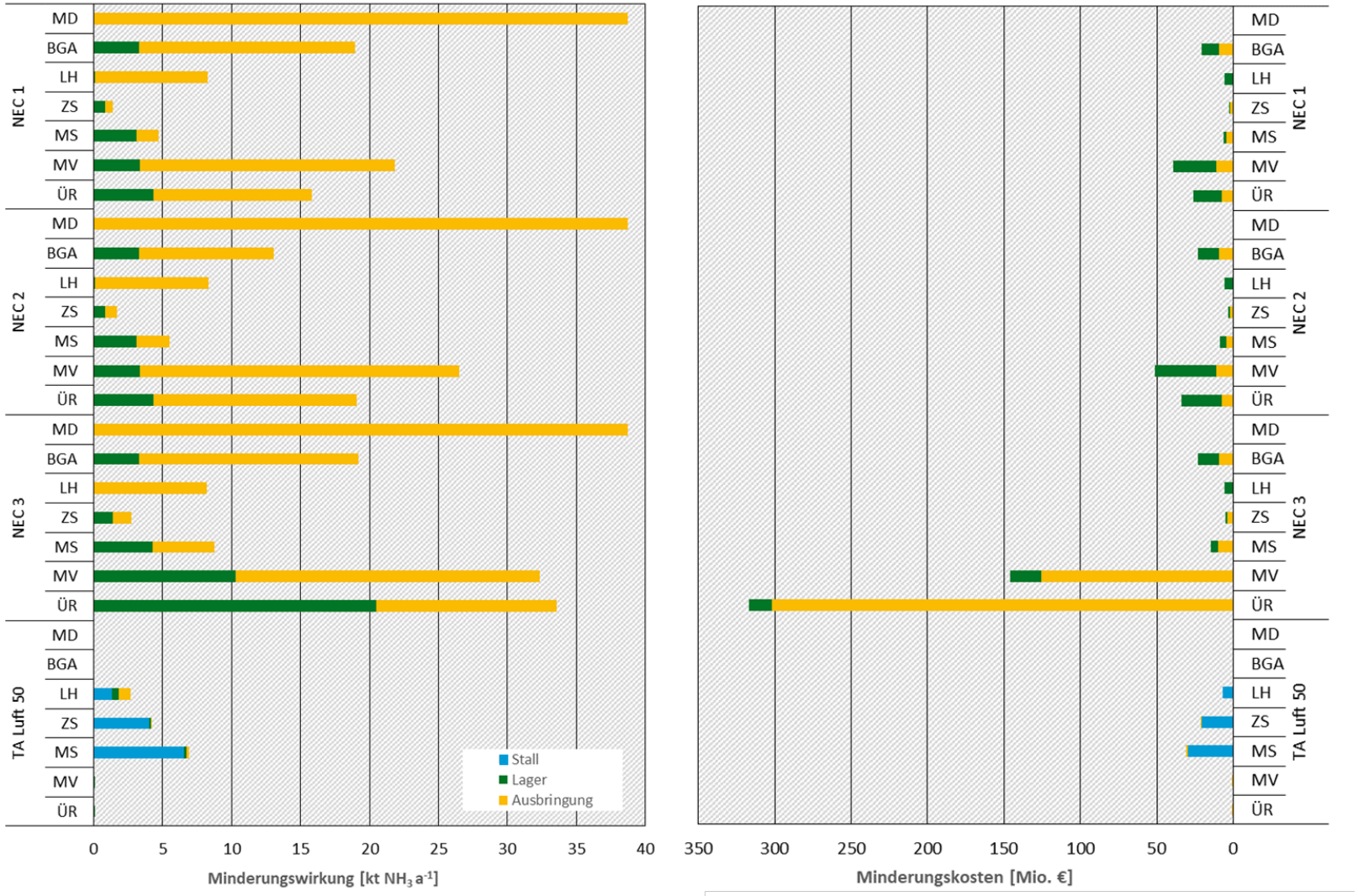
In den Szenarien NEC 2 und 3 sind die spezifischen Minderungskosten der Wirtschaftsdüngerausbringung im Vergleich zu NEC 1 und 4 etwas höher und tendenziell in NEC 2 am höchsten. Die Kosten in NEC 2 bewegen sich zwischen 0,99 (Legehennen) und 2,67 € kg^{-1} NH_3 (Zuchtsauen), in NEC 3 zwischen 0,99 (Legehennen) und 1,72 € kg^{-1} NH_3 (Übrige Rinder). Die Steigerung der Kosten gegenüber NEC 1 ist auf die kostenintensive Umsetzung der Maßnahme 2b (Gülle-Schlitzverfahren, Ansäuerung auf Ackerland) in NEC 2 und 3 zurückzuführen (s. auch Tabelle 2), was vor allem in NEC 2 zu höheren Kosten bei der Ausbringung führt.

Abbildung 23: NH_3-Emissionen in Bl2030 und den NEC-Szenarien 1 – 3[1] differenziert nach Kategorie und Verfahrensabschnitt (Stall – Lager – Ausbringung, Mineraldünger – Weide)



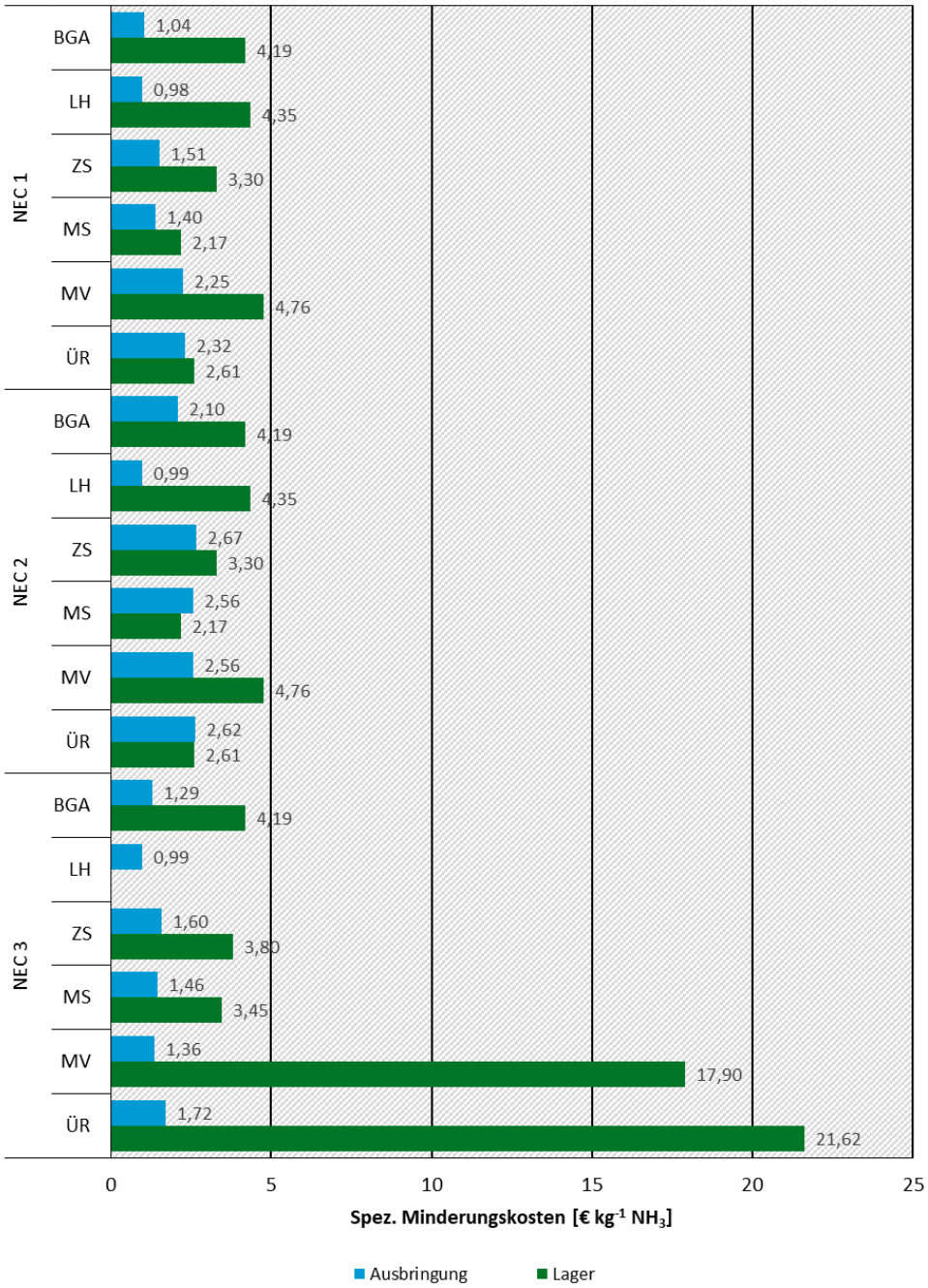
[1] NEC 4 wird nicht dargestellt, da sich NEC 4 von NEC 1 nur hinsichtlich der Mineraldüngeranwendung unterscheidet. Emissionen bei der Mineraldüngeranwendung in NEC 4 betragen 14,2, in den übrigen NEC-Szenarien 17,2 kt NH_3 a^{-1}.
MD = Mineraldünger; BGA = Biogasanlagen; LH = Legehennen; ZS = Zuchtsauen; MS = Mastschweine; MV = Milchvieh; ÜR = Übrige Rinder
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 24: Verteilung der NH_3-Minderungswirkung (links) und der Minderungskosten (rechts) der NEC-Szenarien 1 – 3[1] differenziert nach Kategorie und Verfahrensabschnitt (Stall - Lager - Ausbringung - Mineraldünger)



[1] NEC 4 wird nicht gesondert dargestellt, da sich NEC 4 von NEC 1 nur hinsichtlich der Mineraldüngeranwendung unterscheidet. Die Minderungswirkung bei der Mineraldüngeranwendung in NEC 4 beträgt 41,38, in den übrigen NEC-Szenarien 38,36 kt NH_3 a^{-1}.
MD = Mineraldünger; BGA = Biogasanlagen; LH = Legehennen; ZS = Zuchtsauen; MS = Mastschweine; MV = Milchvieh; ÜR = Übrige Rinder
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 25: Spezifische Minderungskosten der NEC-Szenarien 1 – 3[1] differenziert nach Kategorie und Verfahrensabschnitt (Lager – Ausbringung)



[1] NEC 4 wird nicht gesondert dargestellt, da sich NEC 4 von NEC 1 nur hinsichtlich der Mineraldüngeranwendung unterscheidet.
MD = Mineraldünger; BGA = Biogasanlagen; LH = Legehennen; ZS = Zuchtsauen; MS = Mastschweine; MV = Milchvieh; ÜR = Übrige Rinder
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

3.3.1.2 „TA Luft 50“-Szenario

Überblick

Im „TA Luft 50“-Szenario wird angenommen, „dass die unter die Regelungen der TA Luft fallenden Anlagen die Minderungsmaßnahmen bis 2030 zu 50 % umsetzen. Dementsprechend beinhaltet das Szenario in Schweine- und Legehennenställen umgesetzte Maßnahmen wie die die Umstellung des Fütterungsverfahrens auf proteinreduzierte Fütterung und Abluftreinigung, sowie stallintegrierte Techniken mit pauschalierten Annahmen (z.B. Verkleinerung von Güllekanälen, Güllekühlung, oder Urease-Inhibitoren).

Die nationalen Emissionen bei Umsetzung des „TA Luft 50“-Szenarios belaufen sich 2030 auf 557 kt NH_3 und liegen folglich 113 kt NH_3 über der NEC-Obergrenze. Da die Maßnahmen des Szenarios lediglich für die unter die 4. BImSchV fallenden Betriebe berechnet werden (s. auch Kapitel 3.1.2), werden die Emissionen durch das TA Luft-Szenario verglichen mit dem Emissionsniveau des Baseline-Szenarios Bl2030 lediglich um 2 % gemindert. Dementsprechend sind die absoluten Maßnahmenkosten mit 59,33 bis 76,41 Mio. € relativ niedrig (mit und ohne Berücksichtigung der Einsparungen durch die angepasste Fütterung), trotz der hohen spezifischen Minderungskosten. Durch die Verfahrensumstellung auf eine angepasste Fütterung können insgesamt Kosten in Höhe von 17,1 Mio. € eingespart werden (Tabelle 33).

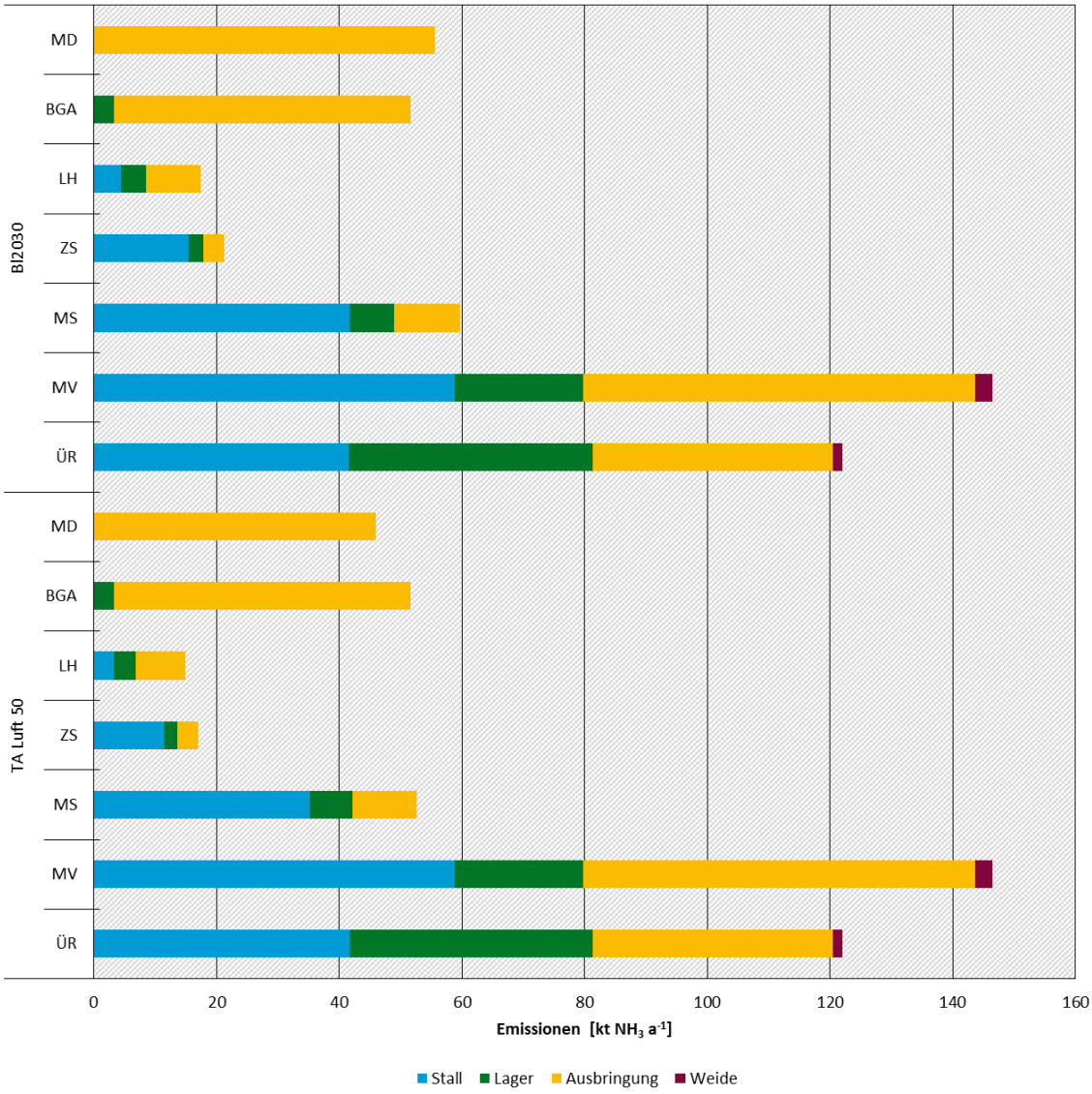
Das „TA Luft 50“-Szneario ist daher dasjenige mit den höchsten spezifischen Minderungskosten (Tabelle 34), diese liegen zwischen 6,65 und 14,45 € kg^{-1} NH_3 (exklusive der Kosteneinsparung durch die Verfahrensumstellung auf stickstoffreduzierte Fütterung). Damit ist das Szenario verglichen mit den NEC-Szenarien deutlich weniger kosteneffizient bei vergleichsweise hohen Minderungskosten.

Emissionen und Minderungseffekte nach Kategorie und Verfahrensabschnitt

Die deutlichste Minderungswirkung, wenn auch grundsätzlich geringer als in den NEC-Szenarien, zeigt das Szenario in Mastschweineställen gefolgt von Zuchtsauenställen. In Legehennenställen sind die Effekte mit etwa 1 kt NH_3 a^{-1} am geringsten (Abbildung 24 und Abbildung 26). Die deutlichsten Effekte treten bei allen Kategorien im Stall auf (s. auch Tabelle 1 und Tabelle 2). Minderungseffekte im Lager und bei der Ausbringung werden durch die Abdeckung von Lagern flüssiger Wirtschaftsdünger (4h) und die Emissionsminderung entlang der gesamten Verfahrenskette durch die Reduktion der Ammoniakemissionen durch N- und P-reduzierte Fütterung (6g) erreicht. Allerdings werden diese durch die Erhöhung von Emissionen im Lager und bei der Ausbringung, bedingt durch Senkung von Emissionen im Stall durch stallintegrierte Maßnahmen (5g und Xg), durch Wechselwirkungen gemindert, da stallintegrierte Maßnahmen den TAN-Gehalt von Wirtschaftsdüngern erhöhen, was ohne weitere Minderungsmaßnahmen im Bereich der Lagerung und Ausbringung zu höheren NH_3-Emissionen in diesen Abschnitten der Prozesskette führt. Durch die Umsetzung der Maßnahme 4h werden in Rindviehställen mit Wirtschaftsdüngerlagerbehältern, die von der 4. BImSchV betroffen sind, geringe Minderungseffekte (< 0,03 kt NH_3 a^{-1}) erzielt.

Abbildung 26: NH_3-Emissionen im Bl2030- und dem „TA Luft 50“-Szenario differenziert nach Kategorien und Verfahrensabschnitt (Stall – Lager – Ausbringung – Weide)

MD = Mineraldünger; BGA = Biogasanlagen; LH = Legehennen; ZS = Zuchtsauen; MS = Mastschweine; MV = Milchvieh; ÜR = Übrige Rinder



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Spezifische Minderungskosten nach Kategorie und Verfahrensabschnitt

Die absoluten Kosten für Mastschweineställe machen über die Hälfte der für das Szenario insgesamt ermittelten Kosten aus, für Zuchtsauenställe rd. ein Drittel. Die Kosten für die Umsetzung in Legehennenställen sind mit einem Anteil von 10 % zwar geringer als in Schweineställen, machen aber einen deutlich höheren Kostenanteil als die Rindviehkategorien aus (nur Lagerbehälter), deren Kosten jeweils weniger als 1 % der gesamten Kosten des Szenarios betragen (Abbildung 24).

Die spezifischen Minderungskosten (Tabelle 34) für die Umsetzung der Maßnahme im Lager (4h) sind mit 8,68 bis 14,45 € kg^{-1} NH_3 hoch. Diese erklären sich durch einen geringeren Minderungseffekt im Lager bei hohen Umsetzungskosten der Maßnahme. Auffallend sind die erhöhten spezifischen Minderungskosten im Wirtschaftsdüngerlager für Zuchtsauen verglichen mit denen der Mastschweine. Die höheren Kosten sind darauf zurückzuführen, dass der Anteil

der güllebasierten Systeme in Mastschweineställen grundsätzlich höher ist als in Zuchtsauenställen, was zu einem höheren Minderungseffekt bei der Abdeckung offener Lager für flüssige Wirtschaftsdünger führt, der die spezifischen Minderungskosten für die Kategorie „Mastschweine“ verhältnismäßig stärker absenkt, wohingegen dieser Effekt bei festmistbasierten Ställen ausbleibt.

Im Verfahrensschritt „Stall“ sind die spezifischen Minderungskosten zwar hoch, aufgrund größerer Minderungseffekte jedoch allgemein geringer als für Lagerungsmaßnahmen. Die Kosten sind für die Umsetzung des Szenarios in Schweineställen und Legehennenställen auf ähnlichem Niveau (6,65 – 7,54 € kg^{-1} NH_3; 7,41 € kg^{-1} NH_3). Unterschiede werden durch die höheren Minderungskosten für die Installation und den Betrieb von Abluftreinigungsanlagen in Legehennenställen hervorgerufen (Tabelle 34).

Tabelle 34: Spezifische Minderungskosten[1] des Szenarios „TA Luft 50“ nach Tierkategorien und Verfahrensschritt

Verfahrensschritt	Spezifische Minderungskosten [€ kg^{-1} NH_3] Tierkategorie				
	ÜR	MV	MS	ZS	LH
Stall	-	-	6,65	7,54	7,41
Lager	9,55	13,65	8,68	14,45	-

ÜR = Übrige Rinder; MV = Milchvieh; MS = Mastschweine; ZS = Zuchtsauen; LH = Legehennen

[1] ohne Berücksichtigung der Kosteneinsparung durch Einführung einer stickstoffreduzierten Fütterung in Mastschweineställen

3.3.2 Minderungsszenarien auf regionaler Ebene in den Hotspots der Nutztierhaltung

3.3.2.1 Emissionsminderung der Szenarien in den Hotspots

Tabelle 35 zeigt eine Übersicht der für die NEC-Szenarien errechneten Emissionswerte und Minderungseffekte in den Hotspotregionen sowie deren Umsetzungskosten. Die relativen Minderungseffekte der Szenarien in diesen Regionen gegenüber Bl2030 bewegen sich im Vergleich zu den Effekten der Szenarien auf nationaler Ebene in ähnlichen Größenordnungen (Tabelle 35). NEC 1, 2 und 4 zeigen in allen Regionen vergleichbare Effekte im Bereich von 81 bis 88 % gegenüber dem Emissionsniveau von Bl2030. NEC 3 zeigt mit 75 bis 81 % die größte Minderungswirkung mit einem durchschnittlich 6 bis 13 % höheren Minderungseffekt gegenüber den übrigen Szenarien.

Die Emissionsminderungseffekte der NEC-Szenarien gegenüber Bl2030 sind in den süddeutschen Regionen Ostwürttemberg/Mittelfranken, Allgäu und Südostbayern im Vergleich zu denen im Nordwesten um rd. 5 bis 9 % höher. Dies ist auf den höheren Anteil von Rindern an den Viehbeständen zurückzuführen, denn die NEC-Szenarien weisen bei Rindern größere Effekte auf die Emissionsminderung (Haltung, Fütterung und Wirtschaftsdüngermanagement) auf. In den bayerischen Regionen verursachen Rinder 78 – 85 % der Emissionen, in Ostwürttemberg/Mittelfranken 52 %, wohingegen auf die Schweinehaltung (Mastschweine und Zuchtsauen) dort nur 3 – 6 % resp. 26 % entfallen. Die anteilig durch die Schweinehaltung verursachten Emissionen in den nordwestlichen Gebieten liegen im Münsterland bei 53 %, 43 % entfallen davon auf Mastschweine. Auf die Haltung von Milch- und Rindvieh entfallen lediglich 36 % der Emissionen. In der niedersächsischen Region Vechta-Cloppenburg werden 40 % der Emissionen durch Schweinehaltung und 35 % durch Milchvieh- und Rinderhaltung verursacht, allerdings entfällt in dieser Region ein überdurchschnittlich hoher Anteil (14 %) der entstehenden Emissionen auf die Haltung und das Wirtschaftsdüngermanagement von Legehennen, denn 35 % der Legehennenplätze Deutschlands befinden sich in Niedersachsen

(Statistisches Bundesamt, 2017a) und 25 % alleine in der Region Vechta-Cloppenburg. Im Gegensatz dazu verursachen Legehennen in den übrigen Regionen lediglich 1 – 3 % der Emissionen.

Aufgrund der generell vergleichsweise höheren Emissionen durch Haltung und Wirtschaftsdüngermanagement von Rindvieh und dementsprechend höheren absoluten Minderungseffekten sind in den Regionen mit höheren Anteilen an Emissionen aus der Rinderhaltung hinsichtlich der Gesamtminderungswirkung der Szenarien höhere Effekte zu verzeichnen.

Zudem ist der Umsetzungsgrad im Hinblick auf Minderungsmaßnahmen bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdünger in den nordwestlichen Regionen bereits höher (Statistisches Bundesamt, 2011), was die absoluten Minderungseffekte der Szenarien im Münsterland und in Vechta-Cloppenburg im Vergleich zu den Regionen in Süddeutschland reduziert.

Das „TA Luft 50"-Szenario zeigt in den Regionen Münsterland, Ostwürttemberg/ Mittelfranken, Allgäu und Südostbayern geringfügige bis keine Effekte. Aufgrund einer höheren Anzahl von unter die Genehmigungsgrenze der 4. BImSchV fallenden Betriebe in der Region Vechta-Cloppenburg erreicht das o.g. Szenario in dieser Region eine Minderungswirkung von 6 %.

Tabelle 35: Gesamtemission, Emissionsminderung ggü. BI 2030, absolute und spezifische Minderungskosten der Szenarien in den untersuchten Hotspotregionen

Region / Szenario	Gesamt-emission[1] kt NH_3	Minderung ggü. BI2030 kt NH_3	Kosten[4] Mio. € a^{-1}	Relativer Minderungs-effekt ggü. BI2030 %	Spez. Minderungs-kosten € kg^{-1} NH_3
Münsterland					
BI2030	27,44	-	-	-	-
NEC 1	23,90	3,55	3,20	88	1,33
NEC 2	23,73	3,71	4,69	86	1,85
NEC 3	22,24	5,20	16,78	81	4,74
NEC 4	23,87	3,52	3,20	87	1,32
TA Luft 50[2]	26,91	0,53	1,61	98	4,40
TA Luft 50[3]	26,91	0,53	2,37	98	6,47
Vechta-Cloppenburg					
BI2030	42,59	-	-	-	-
NEC 1	37,32	5,28	5,64	88	1,57
NEC 2	37,55	5,05	7,17	88	2,09
NEC 3	35,67	6,92	19,1	84	4,05
NEC 4	37,29	5,30	5,64	88	1,56
TA Luft 50[2]	40,18	2,41	9,12	94	5,54
TA Luft 50[3]	40,18	2,41	11,62	94	7,07
Ostwürttemberg/Mittelfranken					
BI2030	8,80	-	-	-	-
NEC 1	6,68	2,21	2,02	81	1,78
NEC 2	7,09	1,71	2,53	81	2,18
NEC 3	6,64	2,15	5,56	75	3,79
NEC 4	7,10	1,69	2,02	81	1,75
TA Luft 50[2]	8,72	0,07	0,24	99	5,24

TA Luft 50[3]	8,72	0,07	0,32	99	7,08
Allgäu					
Bl2030	17,90	-	-	-	-
NEC 1	14,79	3,11	3,92	83	1,85
NEC 2	14,47	3,42	5,42	81	2,33
NEC 3	13,89	4,10	11,92	78	4,37
NEC 4	14,75	3,15	3,92	82	1,83
TA Luft 50[2]	17,87	0,02	0,10	100	5,13
TA Luft 50[3]	17,87	0,02	0,12	100	5,62
Südostbayern					
Bl2030	15,98	-	-	-	-
NEC 1	13,00	2,99	3,53	81	1,74
NEC 2	12,81	3,17	4,87	80	2,26
NEC 3	12,11	3,87	12,11	76	4,60
NEC 4	12,96	3,03	3.53	81	1,72
TA Luft 50[2]	15,95	0,04	0,10	100	4,48
TA Luft 50[3]	15,95	0,04	0,11	100	4,99

[1] Bei der Bewertung werden nur die Emissionen aus landwirtschaftlichen Quellen berücksichtigt. Emissionen aus Industrie- und Verbrennungsprozessen sowie Abfall- und Abwasserbehandlung können für die Hotspotregionen regional nicht abgegrenzt werden.

[2] Inklusive der Kosteneinsparungen bei Umstellung auf stickstoffreduzierte Fütterung.

[3] Exklusive der Kosteneinsparungen bei Umstellung auf stickstoffreduzierte Fütterung.

3.3.2.2 Auswirkung der Minderungsszenarien auf die schutzgutbezogenen Immissionswerte

Werden die Emissionen und Emissionsminderungen auf die Fläche der jeweiligen Hotspotregion bezogen, lässt sich daraus der regionale Immissionswert errechnen. Die sich für die fünf Regionen für die Szenarien ergebenden Emissionen und Immissionswerte sind in der Tabelle 36 dargestellt. Es zeigt sich, dass die schutzgutbezogenen Immissionshöchstwerte nach Heldstab et al. (2020) in den Hotspotregionen (Anhang 1 Abbildung 36) allenfalls in der Region Mittelfranken/Ostwürttemberg erreicht werden können, mit Werten etwas über 3 µg NH_3 m^{-3} Luft, im Allgäu und Südostbayern liegen die Konzentrationen bereits bei 4 bis 5 µg NH_3 m^{-3} Luft , dementsprechend liegt bereits eine Überschreitung des Schutzgutzielwertes um 50 % und mehr vor. Die nordwestdeutschen Regionen weisen kalkulatorische Immissionswerte um 8 oder 9 bzw. 12 oder 13 µg NH_3 m^{-3} Luft auf, sie überschreiten den Zielwert nach Heldstab et al. (2020) damit um das 3 bis 4-fache. Die mit den in den Szenarien definierten Minderungstechniken führen demnach nur zu moderaten Minderungen der Immissionswerte, auch durch die Kombination der NEC-Szenarien mit dem TA Luft 50-Szenario ist nur eine geringfügige Minderungsmehrwirkung zu erwarten. Um Ammoniakemissionen zum Schutz von Ökosystemen und zur Erhaltung der Biodiversität in diesen Regionen dennoch weiterhin zu reduzieren, wäre die Umsetzung weiterer Minderungsmaßnahmen notwendig.

Tabelle 36: Flächenbezogene Emissionen und Emissionsminderung gegenüber Bl2030 der Szenarien sowie die sich daraus ergebenden Immissionswerte

Region / Szenario	Emissionen[1] kg NH_3 ha^{-1}	Emissionsminderung ggü. Bl2030 kg NH_3 ha^{-1}	Immissionswert nach Umsetzung der Maßnahmen µg NH_3 m^{-3} Luft
Münsterland			
Bl2030	48,59	-	9,67
NEC 1	42,30	6,29	8,50
NEC 2	42,00	6,59	8,44
NEC 3	39,37	9,22	7,91
NEC 4	42,27	6,33	8,49
TA Luft 50	47,64	0,95	9,57
Vechta-Cloppenburg			
Bl2030	69,89	-	14,04
NEC 1	61,24	8,66	12,37
NEC 2	61,61	8,28	12,39
NEC 3	58,53	11,37	11,76
NEC 4	61,19	8,70	12,29
TA Luft 50	65,93	3,96	13,25
Ostwürttemberg/Mittelfranken			
Bl2030	20,78	-	4,17
NEC 1	16,83	3,94	3,38
NEC 2	16,75	4,03	3,36
NEC 3	15,68	5,09	3,15
NEC 4	16,77	4,01	3,36
TA Luft 50	20,62	0,16	4,14
Allgäu			
Bl2030	29,29	-	5,89
NEC 1	24,20	5,09	4,86
NEC 2	23,69	5,60	4,76
NEC 3	20,99	6,70	4,22
NEC 4	24,15	5,15	4,85
TA Luft 50	29,25	0,05	5,88
Südostbayern			
Bl2030	27,71	-	5,57
NEC 1	22,54	5,17	4,53
NEC 2	22,22	5,49	4,46
NEC 3	22,74	6,57	4,57
NEC 4	22,48	5,23	4,52
TA Luft 50	27,65	0,06	5,55

[1] Bei der Bewertung werden nur die Emissionen aus landwirtschaftlichen Quellen berücksichtigt, Emissionen aus Industrie- und Verbrennungsprozessen sowie Abfall- und Abwasserbehandlung können für die Hotspotregionen regional nicht abgegrenzt werden.

3.3.2.3 Absolute und spezifische Minderungskosten der NEC-Szenarien in den Hotspots

Die Minderungskosten der Szenarien (Tabelle 35) in den Hotspots werden durch zwei Faktoren maßgeblich beeinflusst. Zum einen werden die Kosten gegen das Emissionsniveau des Baseline-Szenarios in der jeweiligen Region kalkuliert. Je höher also das Niveau der Emissionen in der Baseline2030, desto größer sind die absoluten Minderungseffekte der Maßnahmen. Hohe absolute Minderungseffekte führen zu hohen regionalen Minderungskosten der Maßnahmen. Die höchsten absoluten Minderungseffekte werden in der Region Vechta-Cloppenburg erzielt. Die Minderungskosten der NEC-Szenarien in dieser Region belaufen sich auf 5,64 bis 19,1 Mio. €. In Ostwürttemberg/Mittelfranken werden mit etwa 2 kt NH_3 die niedrigsten Minderungseffekte erzielt, die Minderungskosten liegen dementsprechend bei lediglich 2,02 bis 5,56 Mio. €. Zum anderen prägen regionale Unterschiede des Verfahrensmix und des Umsetzungsgrades bei der Wirtschaftsdüngerausbringung und -lagerung die Kosten der Region. Das Maß der bereits umgesetzten Minderungsmaßnahmen ist in den nordwestlichen Regionen bereits höher. Folglich resultieren geringere spezifische Minderungskosten für deren Ausweitung bzw. geringere absolute Minderungseffekte im Münsterland und in Vechta-Cloppenburg, was die Umsetzungskosten niedrig hält.

Während für Einarbeitung und Ausbringung mittels Schlitzverfahren oder Schleppschlauch flüssiger Wirtschaftsdünger auf bewachsenem Acker- und Grünland (1b, 2b und 3b) in allen Regionen ähnliche Minderungskosten anfallen, unterscheiden sich vor allem die spezifischen Minderungskosten für die Umsetzung von der Ansäuerung von Rinder-, Schweinegülle und Gärresten bei der Ausbringung (3c und 3d) sowie die Maßnahmen zur Abdeckung offener Lager flüssiger Wirtschaftsdünger und die Umlagerung von Unterflur gelagerter Gülle (4a und 4b) in nordwestlichen und südlichen Regionen (Tabelle 37).

Tabelle 37: Spezifische Minderungskosten der Maßnahmen 1b, 2b, 3c, 3d, 4a und 4b in den südlichen und nordwestlichen Hotspotregionen

	Spezifische Minderungskosten [€ kg^{-1} NH_3]	
MNr.	Nordwestliche Regionen[1]	Südliche Regionen[2]
1b	0,97	0,97
2b	1,32	1,32
3b	3,82 – 3,86	3,90 – 3,95
3c	2,31 – 2,40	3,14 – 3,64
3d	0,72 – 0,78	1,12 – 1,73
4a	3,63 – 3,92	4,96 – 5,95
4b	7,31 – 14,82	9,78 – 15,60

[1] Münsterland und Vechta-Cloppenburg

[2] Ostwürttemberg/Mittelfranken, Südostbayern und Allgäu

[3] Spezifische Minderungskosten der Einzelmaßnahme aggregiert für die untersuchten Kategorien

Folglich können Ammoniakemissionen in den nordwestlichen Regionen mit den Minderungsmaßnahmen kostengünstiger gemindert werden, das zeigen sowohl die spezifischen Minderungskosten der Einzelmaßnahmen als auch die der Szenarien (Tabelle 37 und Tabelle 35).

3.3.2.4 Absolute und spezifische Minderungskosten „TA Luft 50"-Szenario in den Hotspot-Regionen

Absolute Kosten des „TA Luft 50"-Szenarios sind in den Regionen höher, in denen verhältnismäßig mehr Betriebe unter die Genehmigungsschwellen der 4. BImSchV fallen. Aufgrund größerer Betriebe mit höheren Tierplatzzahlen in den nordwestlichen Regionen gibt es dort anteilig mehr genehmigungsbedürftige Betriebe als in Süddeutschland. Die Regressionsfunktionen zur Ableitung der größenklassenverteilten Struktur bestätigen, dass v.a.

für Mastschweine, Zuchtsauen und Legehennen eine größere Anzahl an Tieren auf eine vergleichsweise kleinere Anzahl an Betrieben aufgeteilt wird, woraus im Umkehrschluss größere Betriebsgrößenklassen resultieren (s. auch Anhang 2 Abbildung 30 -Abbildung 35). Daraus ergeben sich einerseits höhere absolute Minderungseffekte im Münsterland und in Vechta-Cloppenburg, andererseits aber auch höhere Minderungskosten für das „TA Luft 50"-Szenario.

Die spezifischen Minderungskosten des TA-Luft-Szenarios sind in allen Hotspotregionen deutlich höher als die der NEC-Szenarien, was einerseits ein geringes Minderungspotenzial der stallintegrierten Maßnahmen, andererseits hohe spezifische Minderungskosten der jeweiligen Maßnahmen zum Ausdruck bringt.

3.3.2.5 Prüfung weitergehender Minderungsoptionen und Szenarien am Beispiel der Hotspotregion Niedersachsen

Im folgenden Abschnitt werden Maßnahmenpakete, als „Maximalszenarien" bezeichnet, zur weitergehenden Reduktion von Ammoniakemissionen und -immissionen am Beispiel Vechta-Cloppenburg definiert (Tabelle 38) und deren Emissionen und Kosten berechnet.

Tabelle 38: Maximal-Szenarien zur weitergehenden Emissionsminderung

Szenario	Annahmen
MAX 1	Umsetzung aller in den NEC-Szenarien definierten Maßnahmen; Zusätzlich Umsetzungsgrad des TA Luft 50-Szenarios; Berücksichtigung aller Tierhaltungsbetriebe
MAX 2	Umsetzung des „Maximalszenarios 1" (s.o.); Zusätzliche Aufnahme von Rindvieh in die TA Luft (Installation stallbautechnischer Maßnahmen in Rinderställen mit einer Minderungswirkung von 50 %) Reduzierung der N-Ausscheidungen aller Rinder sinkt durch stark N-reduzierte Fütterung um 5 %
MAX 3	Umsetzung des „Maximalszenarios 1" (s.o.); Aufnahme von Rindvieh in die TA Luft (MAX 2); Vollständige Emissionsvermeidung bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern durch unmittelbare Aufbereitung der anfallenden Wirtschaftsdünger

MAX 1 nimmt an, dass alle Maßnahmen des Katalogs (Tabelle 1) im gesamten regionalen Agrarsektor umgesetzt werden. Zusätzlich wird ein Umsetzungsgrad der TA Luft in Höhe von 50 % angenommen – dabei werden nicht nur die nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftigen Betriebe, sondern alle landwirtschaftlichen Betriebe berücksichtigt. Die Szenarien MAX 2 und 3 berücksichtigen zusätzlich stallintegrierte Maßnahmen bei der Rinderhaltung. Mit dem Szenario MAX 2 wird angenommen, dass die N-Ausscheidungen aller Rinder durch die Umsetzung einer stickstoffreduzierten Fütterung weitergehend um 5 % gesenkt werden. Des Weiteren sollen die Ammoniakemissionen in allen Rinderställen durch die Installation von stallbautechnischen Maßnahmen um 50 % gesenkt werden. Darüber hinaus wird in MAX 3 angenommen, dass bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern durch deren sofortigen Abtransport und nachfolgender Aufbereitung Emissionen gänzlich vermieden werden.

Darüber hinaus wird in MAX 3 angenommen, dass bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern durch deren direkten Abtransport und Aufbereitung Emissionen gänzlich vermieden werden.

Die spezifischen Minderungskosten der zusätzlichen Maßnahmen der in Tabelle 38 beschriebenen Szenarien (stallbautechnische Maßnahmen in Rinderställen, unmittelbare Aufbereitung und Abtransport der anfallenden Wirtschaftsdünger) wurden im Rahmen dieses

Vorhabens nicht explizit berechnet. Daher erfolgt hierfür lediglich eine Kostenschätzung auf der Basis eigener, aktueller Erhebungen. Über die technischen Minderungsoptionen in Rinderställen liegen diverse Untersuchungen vor, die jedoch als noch nicht abgeschlossen bzw. abgesichert gelten müssen. Demnach können auch die Minderungskosten noch nicht abschließend beurteilt werden. Die Haltungstechnik mit den geringsten Emissionen ist die Anbindehaltung, die jedoch aus Tierschutzgründen immer mehr an Bedeutung verliert. In Boxenlaufställen werden zur Emissionsminderung folgende Technikmaßnahmen als emissionsmindernd diskutiert, deren Wirkung ist jedoch nicht abschließend quantifiziert:

- Rinnen- oder Rillenboden sowohl in planbefestigten als auch in Güllesystemen (mit Abschiebetechnik),
- Gummiauflagen zur Verbesserung des Tierkomforts und zur Verkleinerung der Spaltenschlitzweite (ggfs. mit Abschiebetechnik und Dichtungsventilen zur Verhinderung des Ammoniakübertritts über den Güllekanal),
- Kotschieber mit Harnableitung auf leicht geschrägter Lauf- und Schieberfläche,
- Ansäuerung von Gülle im Stall.

Alle Techniken erfordern beträchtliche Investitionen, die 100 bis 300 Euro pro Kuhplatz ausmachen können. Für die Emissionsminderung wird pauschal ein Effekt von 30 %, für die Szenarioberechnung pauschale Minderungskosten von 10 € kg^{-1} NH_3 angenommen. Für den Abtransport und Aufbereitung der Wirtschaftsdünger werden Ergebnisse von Döhler et al. (Döhler et al. 2021) herangezogen und spezifische Minderungskosten in Höhe von 5 – 10 € kg^{-1} NH_3 festgelegt.

Tabelle 39: Gesamtemission, relative Abweichung gegenüber Bl2030 absolute und spezifische Minderungskosten der weiterführenden Szenarien MAX 1 – 3 in der Region Vechta-Cloppenburg

	Gesamtemission[1]		Kosten	Relation Bl2030	Spez. Minderungs-kosten	Immissionswert
Szenario	kg NH_3 ha^{-1}	kt NH_3	Mio. €	%	€ kg^{-1} NH_3	µg NH_3 m^{-3} Luft
MAX 1	50,2	30,6	40,32	72	4,88	10,04
MAX 2	46,4	28,3	59,21	66	6,04	9,30
MAX 3	42,8	26,1	85,19 - 111,17[2]	61	7,54 – 9,83[2]	8,57

[1] Bei der Bewertung werden nur die Emissionen aus landwirtschaftlichen Quellen berücksichtigt, Emissionen aus Industrie- und Verbrennungsprozessen sowie Abfall- und Abwasserbehandlung können für die Hotspotregionen regional nicht abgegrenzt werden.

[2] Je nach Höhe der spezifischen Minderungskosten für den direkten Abtransport und Aufbereitung des Wirtschaftsdüngers (5 – 10 € kg^{-1} NH_3)

Tabelle 39 zeigt die aus den Annahmen für die weitergehenden Minderungsszenarien MAX 1 - 3 hervorgehenden Gesamtemissionen der Immissionskonzentration, sowie die absoluten und spezifischen Minderungskosten. Die NH_3-Emissionen werden um bis zu 39 auf 61 % gegenüber dem Niveau der Baseline-Projektion reduziert. Die Anpassung der Fütterung und die Umsetzung stallintegrierter Minderungstechniken in der Rindviehhaltung führt in MAX 2 zu einer zusätzlichen Minderungswirkung von sechs Prozentpunkten gegenüber MAX 1. Ein sofortiger Abtransport mit Aufbereitung der Wirtschaftsdünger mindert die Emissionen um weitere 5 %. Die Immissionswerte fallen damit auf ein Niveau von 8,6 bis 10 µg NH_3 m^{-3} Luft, dementsprechend liegen diese noch deutlich über dem von Heldstab et al. (2020) errechneten Zielwert.

Die Minderungskosten liegen für diese Szenarien zwischen 40,3 und 111,2 Mio. €. Vor allem die Szenarien MAX 2 und 3 weisen besonders hohe Mehrkosten aus, da die Implementierung von stallintegrierten Maßnahmen die Kosten verhältnismäßig stark erhöht. Die spezifischen Minderungskosten der MAX-Szenarien betragen 4,9 bis 9,8 € pro gemindertem Kilogramm Ammoniak.

4 Einhaltung der Emissionshöchstgrenzen der NEC-RL und assoziierte Erfüllungskosten

Aus den vorgehenden Berechnungen geht hervor, dass die Emissionen der NEC-Szenarien 1, 2 und 4 etwas über dem Zielwert der NEC-RL liegen. Da im regionalisierten Kalkulationsmodell noch keine Minderungsmaßnahmen für die Tierkategorien Broiler, Puten, Pferde etc. implementiert wurden, ist dennoch von einer Unterschreitung der nationalen Höchstgrenzen auszugehen (siehe Häußermann et al. 2020). Mit dem NEC 3-Szenario werden die Grenzen deutlich unterschritten, während das TA Luft-Szenario, welches lediglich Schweine- und Geflügelhaltungsanlagen betrifft nur geringfügig zu einer nationalen Minderungsstrategie beiträgt. Auch ist zu erwarten, dass eine Ausweitung des Regelungsbereiches auf die Rinderhaltung nur wenig zusätzliche Effekte erbringen würde.

Deutliche Unterschiede treten hinsichtlich der Kosteneffizienz hervor. Mit spezifischen Minderungskosten deutlich unterhalb von 1,50 € kg^{-1} NH_3 sind NEC 1 und 4 gegenüber den übrigen Szenarien am kosteneffizientesten. Werden Verfahren wie die Gülleausbringung mittels Schlitzverfahren oder Ansäuerung auf Grün- und Ackerland und die weitergehende Abdeckung von Wirtschaftsdüngerlagern implementiert (s. NEC 2 und 3; Tabelle 2), erhöhen sich sowohl die absoluten als auch die spezifischen Minderungskosten deutlich, der Minderungsmehreffekt ist allerdings begrenzt (vgl. Minderungseffekt NEC 1 und 2; Tabelle 33 und Abbildung 25).

Der Minderungsmehreffekt und die damit vergleichsweise größte Minderungswirkung in Höhe von 143,7 kt NH_3 des Szenarios NEC 3 entsteht durch weitergehende Minderungsmaßnahmen im Lager (4b und 4c), welche allerdings mit hohen Minderungskosten in Höhe von 511,4 Mio. € und spezifischen Kosten von 5,25 € kg^{-1} NH_3 verbunden sind. Die Ausbringung von festen und flüssigen Wirtschaftsdüngern birgt sehr großes Minderungspotenzial, aufgrund des hohen Anteils an den Emissionen und den wirkungsvollen Minderungstechniken (Abbildung 22). Die Minderungsmaßnahmen bei der Ausbringung zeigen mit spezifischen Minderungskosten von weniger als 2,67 € kg^{-1} NH_3 die höchste Kosteneffizienz in allen Szenarien und Kategorien (Abbildung 25).

Lediglich das Szenario „TA Luft 50“ beinhaltet Stall integrierte Maßnahmen wie Abluftreinigung oder die Optimierung von Spaltenböden und -belägen. Die Minderungstechniken für Geflügel und Schweine im Stall zeigen erwartungsgemäß hohe spezifische Minderungskosten (Döhler et al. 2002, Döhler et al. 2011, Reis et al. 2015), und bieten nur ein begrenztes Potenzial zur Senkung der nationalen Emissionen.

Zur Berechnung der nationalen Erfüllungskosten für den Agrarsektor sind zunächst die Regelungen des nationalen Luftreinhalteprogramms zu berücksichtigen, der eine schrittweise Reduktion der NH_3-Emissionen bereits mit dessen Inkrafttreten bis zum Zieljahr 2030 vorsieht. Folglich entstehen Kosten bereits mit dem Beginn der Umsetzung des Luftreinhalteprogramms, um eine zusätzliche Minderung von 181 kt NH_3 a^{-1} im Zieljahr 2030 gegenüber dem Basisjahr 2005 zu erreichen. Mit der Tabelle 40 wird anhand einer vereinfachten Berechnung gezeigt, mit welchen Umsetzungs- bzw. Erfüllungskosten bis 2030 zu rechnen sein wird.

Tabelle 40: Berechnung der Erfüllungskosten der NEC RL (NEC 1 – Szenario) ohne Berücksichtigung von Inflationseffekten und Anstieg von Einkaufspreisen

Startjahr		2018
Zieljahr		2030
Zeitspanne	a	12
Erforderliche Minderung im Zieljahr	kt NH_3 a^{-1}	181
Davon Minderung durch Baseline-Szenario	kt NH_3 a^{-1-}	49
Stetige jährliche Minderung bis Zieljahr	kt NH_3 a^{-1}	11
Spezifische Minderungskosten	€ kg^{-1} NH_3	1,34[1]
Minderungskosten pro Jahr ab Zieljahr 2030	Mio. € a^{-1}	176,88
Absolute Minderung bei stetiger Umsetzung von Start- bis Zieljahr (2019 – 2030)	kt NH_3	990
Absolute Kosten von Start - bis Zieljahr (2019 – 2030)	Mrd. €	1,33

[1] Spezifische Minderungskosten des Szenarios NEC 1

Es wird dabei angenommen, dass ab dem Jahr 2018 – dem Basisjahr des Nationalen Luftreinhalteprogramms – die Emissionen jährlich stetig durch Umsetzung der Maßnahmen zur Erreichung der Reduktionsziele gemindert werden. Zur Berechnung der Erfüllungskosten werden die Emissionen des Bl-Szenarios (die Emissionen, die aufgrund struktureller Veränderungen, Technikentwicklungen und Düngegesetzgebung zu erwarten sind) als Referenz herangezogen. Dies entspricht einer zu erbringenden weitergehenden Minderung zur Erfüllung der NEC-RL in Höhe von 132 kt NH_3 bis 2030.

Daraus ergibt sich für die Zeitspanne von 12 Jahren eine jährlich zusätzlich zu erbringende Minderung von 11 kt NH_3 a^{-1}, um den Minderungszielwert für 2030 zu erreichen. Absolut werden durch die Minderungsmaßnahmen demnach 990 kt NH_3 gemindert. Bei spezifischen Minderungskosten in Höhe von 1,34 € kg^{-1} NH_3 (Minderungskosten für das Szenario NEC 1) ergeben sich bis 2030 absolute Kosten in Höhe von 1,33 Mrd. €, im Zieljahr 2030 selbst und den darauffolgenden Jahren jährliche Kosten von 242,54 Mio. € a^{-1}. Ein Inflationsausgleich ist in dieser Berechnung nicht enthalten, so dass durch entsprechende Preis- und Kostensteigerungen mit erheblich höheren Erfüllungskosten gerechnet werden muss. Ebenso nicht eingerechnet sind die Mehrkosten, die durch die Befolgung der Dünge-Verordnung entstehen, mit der rund 30 bis 40 kt Ammoniakemissionen reduziert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der revidierten NEC-Richtlinie wurden die EU-Mitgliedsstaaten zur Einhaltung von weitergehender Emissionsreduktion von bestimmten Luftschadstoffen verpflichtet. Für Ammoniak lag in Deutschland die jährliche Höchstmenge bis zum Jahr 2020 bei 550 kt NH_3 (EG-RL 2001/81). Mit der neuen NEC-Richtlinie (2016/2284) wurde diese Höchstmenge auf 444 kt NH_3 im Jahr 2030 (entspricht 29 % Minderung im Vergleich zum Basisjahr 2005) festgelegt. Ziel des vorliegenden Vorhabens ist es, die Optionen zur Minderung der Ammoniakemissionen der deutschen Landwirtschaft zu analysieren und die mit der Einhaltung der Vorgaben der NEC-Richtline assoziierten Kosten zu ermitteln. Darüber hinaus soll geprüft werden, inwieweit die Ammoniak-Immissionen in den Hotspotregionen der Tierhaltung auf ein akzeptables Maß reduziert werden können.

Aufbauend auf die Arbeiten von Döhler et al. (2011), Döhler (2020) und Häußermann et al. (2020) werden mit dem Vorhaben die Emissionen, Emissionsminderungsoptionen und die hierfür zu erwartenden Kosten berechnet. Für die Berechnung der Emissionsminderung werden fünf Szenarien definiert, welche die etablierten Minderungstechniken zur Reduzierung von Ammoniakemissionen beinhalten. Diese werden hinsichtlich ihrer Minderungswirkung analysiert und die Erfüllungskosten für das Erreichen der Vorgaben der NEC-Richtlinie und des nationalen Luftreinhalteprogramms berechnet. Insbesondere erfolgt eine Analyse der Kosteneffizienz, dabei wird untersucht, in welcher der Tierkategorien und in welchen Verfahrensschritten (Stall – Lager – Ausbringung – [Weide]) Emissionen am kosteneffizientesten gemindert werden können.

Die Analyse der nationalen Szenarien zeigt, dass das Reduktionsziel des Nationalen Luftreinhalteplans mit den geprüften NEC-Szenarien und Minderungstechniken knapp erreicht werden kann. Dabei sind die Szenarien NEC 1 und 4 vergleichsweise kostengünstig. Bezüglich der Erfüllungskosten der NEC-Richtlinie resp. des Nationalen Luftreinhalteprogramms sind insgesamt bis zum Jahr 2030 Kosten in Höhe von 1,33 Mrd. € zu erwarten. Um das Niveau der Minderung zu halten, fallen ab 2030 jährlich 177 Mio. € an. Die beste Kosteneffizienz weisen die Maßnahmen bei der Wirtschaftsdüngerausbringung auf.

Die Kalkulationen zeigen, dass auf nationaler Ebene der Immissionszielwert nach Heldstab et al. (2020) (3 µg NH_3 m^{-3} Luft) ohne den Einsatz kostenaufwändiger, stallintegrierter Maßnahmen erreicht werden kann, jedoch nicht in den Hotspotregionen der Tierhaltung. Insbesondere trifft dies für die nordwestdeutschen Regionen mit intensiver Tierhaltung Vechta-Cloppenburg und Münsterland zu. Denn auch bei der Einbeziehung von sogenannten Maximalszenarien, welche weitgehende Minderungsoptionen in Rinderställen beinhalten, werden diese Richtwerte am Beispiel Vechta-Cloppenburg noch um das Dreifache überschritten.

Perspektivisch können für Regionen mit besonders hohen NH_3-Emissionen und/oder für den Fall einer künftigen Verschärfung von Emissionsgrenzwerten landwirtschaftlicher Ammoniakemissionen Minderungstechniken für Stallgebäude in Betracht gezogen werden. Vor allem in Milchvieh- und Rinderställen gibt es dahingehend Minderungspotenzial. Erfahrungen mit solchen Minderungsoptionen liegen bisher nur begrenzt vor und vor allem liegen noch keine anerkannten Emissionskoeffizienten vor. Zur Behebung dieses Defizits reichen hierfür Messungen in Ställen nicht aus, vielmehr ist aufgrund der Vielzahl der Haltungssysteme ein flexibles Kalkulationstool zu entwickeln, mit dem die diversen Systeme abgebildet werden können. Methodische Ansätze sind in mehreren europäischen Staaten vorhanden, Emissionsmessungen in Praxisanlagen können zur Verifizierung der Modellansätze herangezogen werden.

Aus den Analysen der Emissionsminderungsszenarien geht hervor, dass die aktuellen NEC-Minderungsziele für Ammoniak zu moderaten Kosten erreicht werden können, die gleichwohl der Landwirtschaft hohe Mehrausgaben abverlangen. Da von weitergehenden Minderungsforderungen seitens der EU und der UN ausgegangen werden kann, muss bei gleichbleibenden Viehbeständen mit massiv steigenden Kosten für die Emissionsminderung für den Sektor Landwirtschaft gerechnet werden, denn die kostengünstigen Maßnahmen sind mit den hier berechneten Szenarien weitgehend ausgeschöpft. Das Ausmaß der Minderungskosten hängt demzufolge auch vom Strukturwandel in der Nutztierhaltung ab. Langfristig könnte der Umbau der Nutztierhaltung zur Emissionsminderung beitragen. Hierzu kann die Umsetzung von vollständigen Kot-Harn-Trennungstechniken eine wichtige Rolle spielen, denn zumindest für die Schweinehaltung liegen Erkenntnisse vor, die auf deutliche Minderungseffekte in der Verfahrenskette hindeuten und mit Tierwohlkonzepten gut zu vereinbaren sind (Döhler 2020, Döhler et al. 2023, Auinger et al. 2023).

Unabhängig davon wird deutlich, dass die regionalen Ammoniakimmissionen in den Hotspotregionen (insbesondere die im Nordwesten Deutschlands) alleine mit den hier zur Rede stehenden Emissionsminderungsmaßnahmen nur schwer auf Werte unterhalb der aktuell diskutierten Belastungsschwellen (Heldstab et al. 2020) zurückzuführen sein werden. Die Emissionen bei der Ausbringung könnten zwar durch Wirtschaftsdünger-„Exportkonzepte“- oder Aufbereitungskonzepte in Ackerbauregionen verfrachtet werden, was zusätzlich den P-Überschuss der exportierenden Regionen sehr wirksam verringern würde; auf die Ammoniakemissionen hat diese Maßnahme allerdings nur begrenzte Wirkung (siehe Kapitel 3.3.2.5). Die Kosten könnten dabei sowohl der Emissionsminderung als auch der Nährstoffentlastung anteilig zugeschrieben werden. Auf längere Sicht ist diese Problematik nur mit der regionalen Entzerrung der Nutztierbestände in Richtung der Regionen mit geringen Viehbesätzen zu erreichen. Dies wiederum wird nur mit einem nationalen Aktionsplan erreichbar sein, der ausgehend von einem Tierwohlkonzept, die Re-Etablierung vor- und nachgelagerter Sektoren (Futtermittel-, Schlachtbetriebe) einschließlich eines effizienten Spezialberatungskonzeptes beinhaltet. Ohne umfangreiche staatliche Förderinstrumente wird dieser Umbau nicht zu bewerkstelligen sein, ein Teil der für die agrarische Erzeugung entstehenden Mehrkosten könnten durch ein aufwandsgerechtes Vergütungssystem kompensiert werden. Somit wären auch Lebensmitteleinzelhandel und Verbraucher in die Kostendeckung dieser Mehraufwendungen einbezogen.

6 Literaturverzeichnis

4. BImSchV, 2017. Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV), 2. Mai 2013, neugefasst durch Bekanntmachung vom 31.5.2017, BGBl. I 1440.

aid/KTBL (2003): Ammoniak-Emissionen in der Landwirtschaft mindern – Gute fachliche Praxis. Gemeinsames Heft von aid und KTBL; Nr. 1454

ALB Hessen (2018): Richtpreise für den Neu- und Umbau landwirtschaftlicher Wirtschaftsgebäude und ländlicher Wohnhäuser. Ausgabe 2018/2019, Arbeitsgemeinschaft für Rationalisierung, Landtechnik und Bauwesen in der Landwirtschaft Hessen e.V. (ALB Hessen), Kassel.

ALB Hessen (2019): Richtpreise für den Neu- und Umbau landwirtschaftlicher Wirtschaftsgebäude und ländlicher Wohnhäuser. Ausgabe 2019/2020, Arbeitsgemeinschaft für Rationalisierung, Landtechnik und Bauwesen in der Landwirtschaft Hessen e.V. (ALB Hessen), Kassel.

Amann, M.; Bertok, I.; Cofala, J.; Gyarfas, F.; Heyes, C.; Klimont, Z.; Makowski, M.; Syri, S. (1998): Cost_effective control of acidification and ground_level ozone: 6th Interim Report to the European Commission, DG_XI. Interim Report, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria.

Auinger, C.; Döhler, H. G. (2023): Emissionsarmer Tierwohlstall für Mastschweine mit vollständiger Kot-Harn-Trennung – Konzept und praktische Ausführung; Emissionen der deutschen Tierhaltung 2023 – erheben, beurteilen, mindern; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL e.V.), Darmstadt

BMU (2018): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), Entwurf vom 16. Juli 2018. https://www.bmuv.de/filead-min/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/ta_luft/entwurf/ta_luft_180716_refe_bf.pdf, Stand: 19.04.2022

BMU (2019): Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland nach Artikel 6 und Artikel 10 der Richtlinie (EU) 2016/2284 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe sowie nach §§ 4 und 16 der Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion bestimmter Luftschadstoffe (43. BImSchV). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/dokumente/luftreinhalteprogramm_bericht_bf.pdf, Stand: 08.06.2022

BImSchG (2013): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG).

DLG (2005): Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere. Arbeiten der DLG, Band 199, Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft (DLG), Frankfurt am Main, 69 pp.

DLG (2014): Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere. Arbeiten der DLG, Band 199 (2. Auflage), Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft (DLG), Frankfurt am Main, 119 pp.

Döhler, H. (1990): Laboratory and field experiments for estimating ammonia losses from pig and cattle slurry following application. In: Nielsen VC et al. (eds). Odour and ammonia emissions from livestock farming. Proceedings of a seminar held in Silsoe, United Kingdom 26 – 28 March 1990, pp. 140 – 149.

Döhler, H.; Dämmgen, U.; Eurich-Menden, B.; Osterburg, B.; Lüttich, M.; Berg, W.; Bergschmidt, A.; Brunsch, R.: (2002): Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien sowie Erfassung und Prognose der Ammoniak-Emissionen der deutschen Landwirtschaft und Szenarien zu deren Minderung bis zum Jahre 2010, UBA-Texte 05/02

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2071.pdf; Stand: 27.09.2023

Döhler, H.; Eurich-Menden, B.; Rößler, R.; Vandré, R.; Wulf, S. (2011): UN ECE-Luftreinhaltekonvention – Task Force on Reactive Nitrogen, TEXTE 79/2011; FKZ 312 01 287. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Döhler, H. (2015): Ergebnisse deutscher Forschungsarbeiten über Ammoniakemissionen aus mineralischen Düngemitteln vor dem Hintergrund des nationalen Emissionsinventars, Böden – Lebensgrundlage für Pflanze und Tier, Kongressband 2015 Göttingen; VDLUFA-Schriftenreihe Band 71 / 2015, VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Döhler, H.; Döhler, S.; Immel, L. (2019): Anlage 4 (8) Stand des Wissens über Vermeidung und Verminderung der Ammoniakemissionen. In: Beschreibung und Umsetzung der nationalen BVT in der Intensivtierhaltung unter Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF) im Bereich Aufarbeitung von Gülle und Gärresten (Zwischenbericht zum UFOPLAN-Vorhaben FKZ 3717 53 258 0; unveröffentlicht)

Döhler, H. und Döhler, S. (2020): Konzeptentwicklung für einen zukunftsfähigen und gesellschaftlich konsensfähigen Mastschweinestall unter Einbeziehung der Ansprüche an Tiergerechtheit, Tiergesundheit, Klimaschutz, Umweltschutz und Arbeitsplatzqualität. Abschlussbericht, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

Döhler, H.; Döhler, S.; Möller, K.; Bilbao, J.; Campos, A.; Fischer, H.; Hartmann, S.; Burton, C.; Meier, U.; Hersener, J.-L.; Loyon, L.; Snauwaert, E.; Vannecke, T.; Dinuccio, E.; Gioelli, F.; Balsari, P.; Hansen, N. (2021): Nationaler Stand der Technik für die Intensivtierhaltung unter der Berücksichtigung der BVT-Schlussfolgerungen (IRPP BREF), TEXTE 109/2021; FKZ 3716 53 302 5. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Döhler, H.; Kaupenjohann, M. (2023): Emissionsarmer Tierwohlstall für Mastschweine mit vollständiger Kot-Harn-Trennung – Laboruntersuchungen zur Harnstoffstabilisierung und Nährelementfällung im Urin; Emissionen der deutschen Tierhaltung 2023 – erheben, beurteilen, mindern; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL e.V.), Darmstadt

DüV (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV), 26. Mai 2017, BGBl. I 1305.

Europäische Kommission (2014): Allgemeines Umweltaktionsprogramm der Union für die Zeit bis 2020 – Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, Luxemburg.

Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Dämmgen, U.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Freibauer, A.; Döhler, H.; Schreiner, C.; Osterburg, B.; Fuß, R. (2018): Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2016 Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2018. Thünen Report 57. Thünen-Institut, Braunschweig.

Häußermann, U.; Bach, M.; Klement, L.; Breuer, L. (2019): Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017, TEXTE 131/2019; FKZ 3714 43 202 0. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Häußermann, U.; Bach, M.; Breuer, L.; Döhler, H. (2020): Potenziale zur Minderung der Ammoniakemissionen in der deutschen Landwirtschaft, TEXTE 221/2020; FKZ 3718 51 242 0. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Heldstab, J.; Schäppi, B.; Reutimann, J.; Bach, M.; Häußermann, U.; Knoll, L.; Klement, L.; Breuer, L.; Fuchs, S.; Weber, T. (2020): Integrierter Stickstoffindikator, nationales Stickstoffziel und IST-Zustand (DESTINO-Teilbericht 1), TEXTE 96/2020; FKZ 3716 51 200 0. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Klimont, Z. und Winiwater, W. (2011): Integrated ammonia abatement –Modelling of emission control potentials and costs in GAINS; September 2011- Interim Report / https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/9809/, Zugriff: 27.09.2023

Kosch, R. (2013): Neueste technische Entwicklungen in der Abluftreinigung für die Geflügelhaltung. In: Fachsymposium „Emissionsminderung in der Tierhaltung“, 25. November 2013.

https://www.ml.niedersachsen.de/download/82373/Dr._Ralf_Kosch_Neueste_technische_Entwicklungen_in_der_Abluftreinigung_fuer_die_Gefluegelhaltung.pdf, Zugriff: 18.05.2022

KTBL, verschiedene Jahrgänge. Betriebsplanung Landwirtschaft Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.

KTBL – Web-Anwendung „BauKost – Investition Betriebsgebäude“. Abrufbar unter https://www.ktbl.de/webanwendungen/baukost-investition-betriebsgebaeude, Stand: 22.06.22

KTBL – Web-Anwendung „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“. Abrufbar unter https://www.ktbl.de/webanwendungen/wirtschaftlichkeitsrechner-biogas, Stand: 22.06.2022

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2022): Sensoren für die variable Stickstoffdüngung – Funktionsprinzipien und Marktübersicht. https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/33577_Sensoren_f%C3%BCr_die_variable_Stickstoffd%C3%BCngung_-_Funktionsprinzipien_und_Markt%C3%BCbersicht, Stand: 07.05.22

Langenberg, J.; Nordhaus, F.B. und Theuvsen, L. (2017): Navigations- und N-Sensor gestützte Anwendungen in der Landwirtschaft – eine Rentabilitätsanalyse. In: Ruckelshausen A et al. (eds). Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft, Gesellschaft für Informatik e.V., Bonn, pp. 97 – 100. markt.agrarheute.com, 2022. Marktpreise Stickstoffdünger. https://markt.agrarheute.com/duengemittel-4/stickstoffduenger-20, Stand: 07.05.22

Lanigan, G. J.; Trevor, D.; Hanrahan, K.; Burchill, W.; Forrestal, P.; McCutcheon, G.; Crosson, P.; Murphy, P.; Schulte, R.; Richards, K.; Browne, P. (2015): An Analysis of the Cost of the Abatement of Ammonia Emissions in Irish Agriculture to 2030; https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2015/An-Analysis-of-the-Cost-of-the-Abatement-of-Ammonia-Emissions-in-Irish-Agriculture-to-2030.pdf (Zugriff 27.09.2023)

Offermann, F.; Banse, M.; Freund, F.; Haß, M.; Kreins, P.; Laquai, V.; Osterburg, B.; Pelikan, J.; Rösemann, C.; Salamon, P. (2018): Thünen-Baseline 2017 – 2027: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Thünen Report 56, Thünen-Institut, Braunschweig.

Potnika, J. und Pößneck, J. (2006): Untersuchungen zur Teilflächenbewirtschaftung, Schriftenreihe, Heft 18/2006. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.

Santonja, G. G.; Georgitzikis, K.; Scalet, B. M.; Montobbio, P.; Roudier, S.; Sancho, L. D. (2017) : Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs. Luxemburg: Publications Office of the European Union

SRU (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), Berlin.

Statistisches Bundesamt (2011): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei Wirtschaftsdünger, Stallhaltung, Weidehaltung Landwirtschaftszählung/Agrarstrukturerhebung 2010. Fachserie 3, Heft 6, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2017a): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei Viehhaltung der Betriebe Agrarstrukturerhebung 2016. Fachserie 3 Reihe 2.1.3, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2017b): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben Agrarstrukturerhebung 2016. Fachserie 3 Reihe 2.2.2, Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden.

Umweltbundesamt (2021a): 30. März. Ammoniak-Emissionen. https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/ammoniak-emissionen#entwicklung-seit-1990, Stand: 16.02.2020

Umweltbundesamt (2021b): 22. Juli. Ammoniak, Geruch und Staub. https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/ammoniak-geruch-staub#emissionen-der-landwirtschaft, Stand: 14.06.2022

Umweltbundesamt (2022) 25. März. Reaktiver Stickstoff in der Umwelt. https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme/reaktiver-stickstoff-in-der-umwelt#formen-reaktiven-stickstoffs, Stand: 22.06.2022

Vettori, A.; Sutter, D.; Porsch, L.; Löschel, A.(2016): Analyse des Erfüllungsaufwands und der „One in one out"-Regel als Leitbilder der Politikgestaltung; Texte 50/2016, FKZ 3714 14 1030; Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau

Vos, C.; Rösemann, C.; Haenel, H.-D.; Dämmgen, U.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Freibauer, A.; Döhler, H.; Schreiner, C.; Osterburg, B.; Fuß, R; (2022): Berechnung der gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2020 Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2022. Thünen Report 91, Thünen-Institut, Braunschweig.

Wang M, Kong W, Marten R et al., 2020. Rapid growth of new atmospheric particles by nitric acid and ammonia condensation. Nature 581(7807), 184-189.

A Anhang

A.1 Haltung von Nutztieren

Tabelle 41: Berechnete Stallmodelle und Minderungstechniken in Geflügelställen

Stallmodelle	Ref.	Stall				Fütterung	Lager			Aus-bringung
		GA	ALR	GK	AGW	N-P-red.	SF	ZD	B	
Broiler										
1	x									
2	x					x				
3	x									
Legehennen										
Voliere										
1	x									
2	x									
3	x					x				
4	x		x							
5	x		x							
6	x		x							
Bodenhaltung										
1	x									
2	x									
3	x									
Puten										
1	x									
2	x					x				
3	x									
4	x									
5	x					x				
6	x									

GA = Gülleansäuerung, ALR = Abluftreinigung, GK = Gülleкühlung, AGW = angeschrägte Wände, SF = Schwimmfolie, ZD = Zeltdach, B = Beton

Tabelle 42: Berechnete Stallmodelle und Minderungstechniken in Rinderställen

Stallmodelle	Ref.	Stall				Fütterung	Lager			Aus-bringung
		GA	ALR	GK	AGW	N-P-red.	SF	ZD	B	
Mastrinder										
1	x						x	x	x	
2	x						x	x	x	
3	x						x	x	x	
Milchvieh										
1	x						x	x	x	
2	x						x	x	x	
3	x						x	x	x	
4	x						x	x	x	
5	x						x	x	x	
6	x						x	x	x	
7	x						x	x	x	
8	x						x	x	x	

GA = Gülleansäuerung, ALR = Abluftreinigung, GK = Gülleкühlung, AGW = angeschrägte Wände, SF = Schwimmfolie, ZD = Zeltdach, B = Beton

Tabelle 43: Berechnete Stallmodelle und Minderungstechniken in Schweineställen

Stallmodelle	Ref.	Stall				Fütterung	Lager			Aus-bringung
		GA	AR	GK	AGW	N-P-red.	SF	ZD	B	
Aufzuchtferkel										
1	x									
2	x									
3	x	x								
4	x									
5	x	x				x				
6	x	x								
7	x									
Mastschweine										
1	x						x	x	x	
2	x						x	x	x	
3	x	x	x				x	x	x	
4	x	x	x				x	x	x	
5	x	x	x				x	x	x	
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
7	x	x	x			x	x	x	x	
Zuchtsauen										
1	x						x	x	x	
2	x	x				x	x	x	x	
3	x	x					x	x	x	
4	x						x	x	x	
5	x						x	x	x	
6	x	x				x	x	x	x	
7	x	x					x	x	x	

GA = Gülleansäuerung, ALR = Abluftreinigung, GK = Güllekühlung, AGW = angeschrägte Wände, SF = Schwimmfolie, ZD = Zeltdach, B = Beton

Tabelle 44: Annahmen zur Ableitung der nationalen Aktivität und des Umsetzungsgrades der Stalltechniken (MV = Milchvieh; MB = Mastbullen; ZS = Zuchtsauen; MS = Mastschweine; LH = Legehennen)

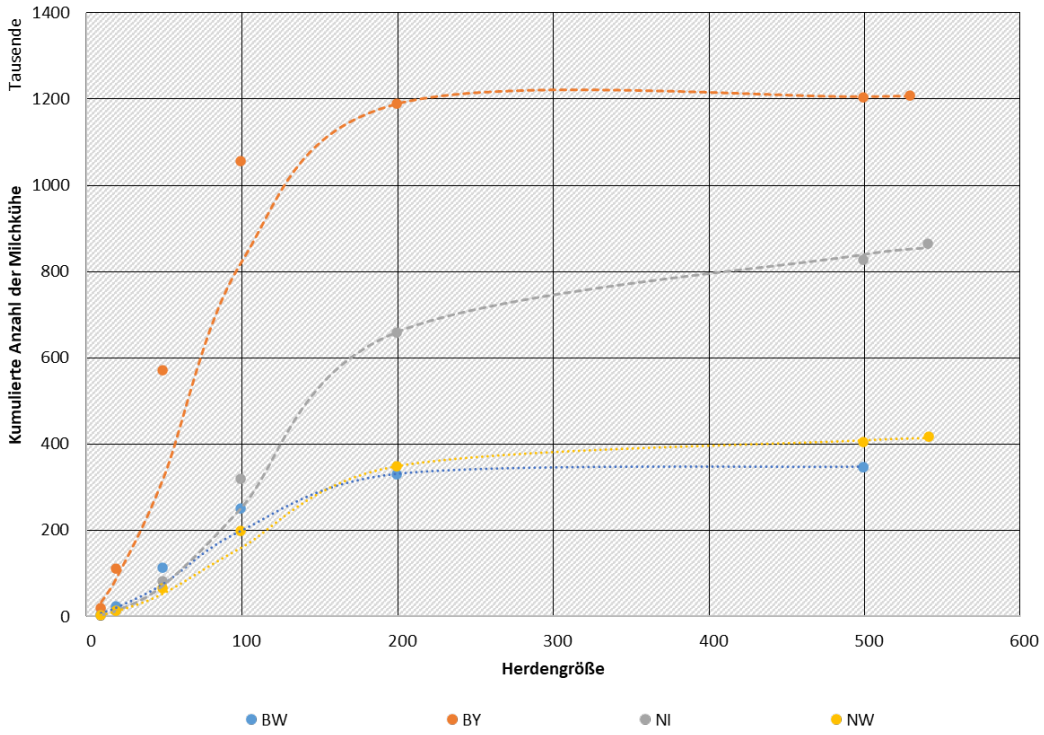
MNr. / Kategorie	Anteil [%]	Anmerkung[1]
4a, Bl2030 / MV	27	82 % güllebasierte Systeme insgesamt; davon 6 % offene Güllelager und 27 % der Güllelager werden auf Lager mit fester Abdeckung umgestellt
4b, Bl2030 / MV	11	82 % güllebasierte Systeme; davon abzüglich 27,5 % zur Wirtschaftsdüngervergärung; davon werden 19 % der Unterflur gelagerten Gülle umgestellt auf Außenlager mit fester Abdeckung
4c, Bl2030 / MV	17	18 % strohbasierte Systeme insgesamt; davon abzüglich 5 % für Festmistvergärung
4a, Bl2030 / MB	21	65 % güllebasierte Systeme insgesamt; davon 6 % offene Güllelager und 27 % der Güllelager werden auf Lager mit fester Abdeckung umgestellt
4a, Bl2030 / ZS	36	86 % güllebasierte Systeme insgesamt; davon 9 % offene Güllelager und 29 % der Güllelager mit Schwimmdecke und 4 % der Güllelager mit Strohhäckselabdeckung werden auf Lager mit fester Abdeckung umgestellt
4a, Bl2030 / MS	39	94 % güllebasierte Systeme insgesamt; davon 9 % offene Güllelager und 29 % der Güllelager mit Schwimmdecke und 4 % der Güllelager mit Strohhäckselabdeckung werden auf Lager mit fester Abdeckung umgestellt
4b, Bl2030 / MS	13	94 % güllebasierte Systeme insgesamt; davon abzüglich 16 % zur Wirtschaftsdüngervergärung; davon werden 16 % der Unterflur gelagerten Gülle umgestellt auf Außenlager mit fester Abdeckung
4c, Bl2030 / MS	4	4 % strohbasierte Systeme insgesamt; alle
5g, Bl2030 / MS	18	Rd. 3 Mio. Mastschweine oberhalb der oberen BImSchV-Grenze; davon sind 98 % güllebasiert und 9 % bereits mit Abluftreinigung ausgestattet
6g, Bl2030 / MS	20	Die Minderung der N-Ausscheidungen durch sehr stark N- und P-reduzierte Fütterung2 beträgt rd. 25 %; zur Minderung von 5 % der Maßnahme 6g sind ca. 20 % der Mastschweine betroffen
5g, Bl2030 / LH	55	Rd. 29 Mio. Legehennen oberhalb der oberen BImSchV-Grenze, davon 91 % ohne Öko- resp. Freilandhaltung

[1] Die Daten wurden im Rahmen von EMMa-L erhoben (Häußermann et al., 2020) und stammen ursprünglich aus Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamts (Statistisches Bundesamt, 2011 und 2017b).

[2] 3-Phasenfütterung gegenüber Universalmast mit Standardfutter

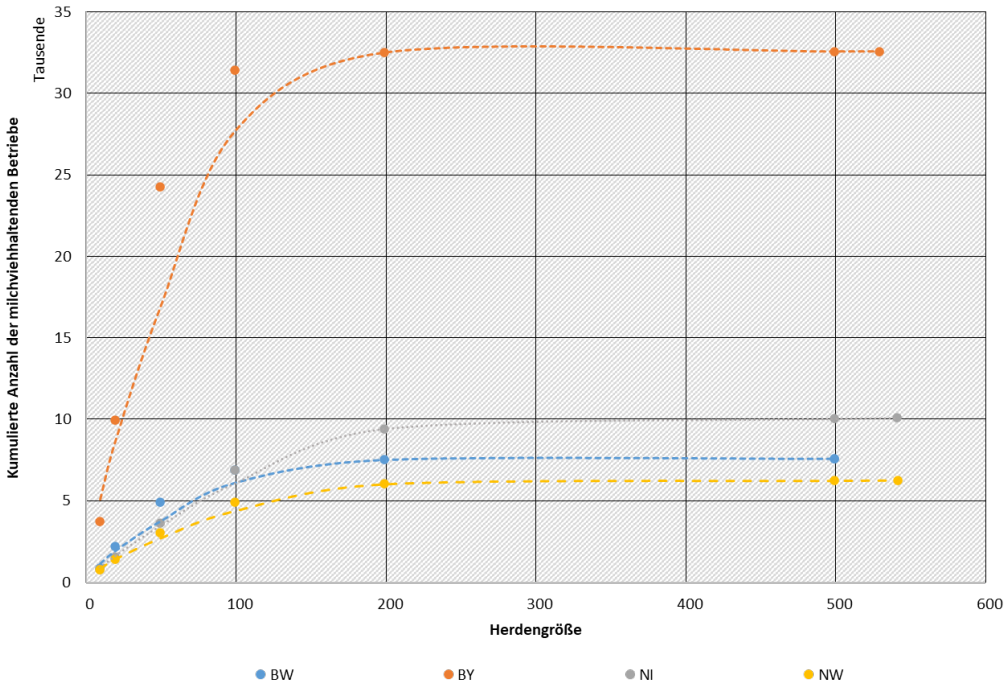
A.2 Anzahl der Betriebe und Herdengrößen in den Hotspotregionen

Abbildung 27: Kumulierte Anzahl der Milchkühe in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

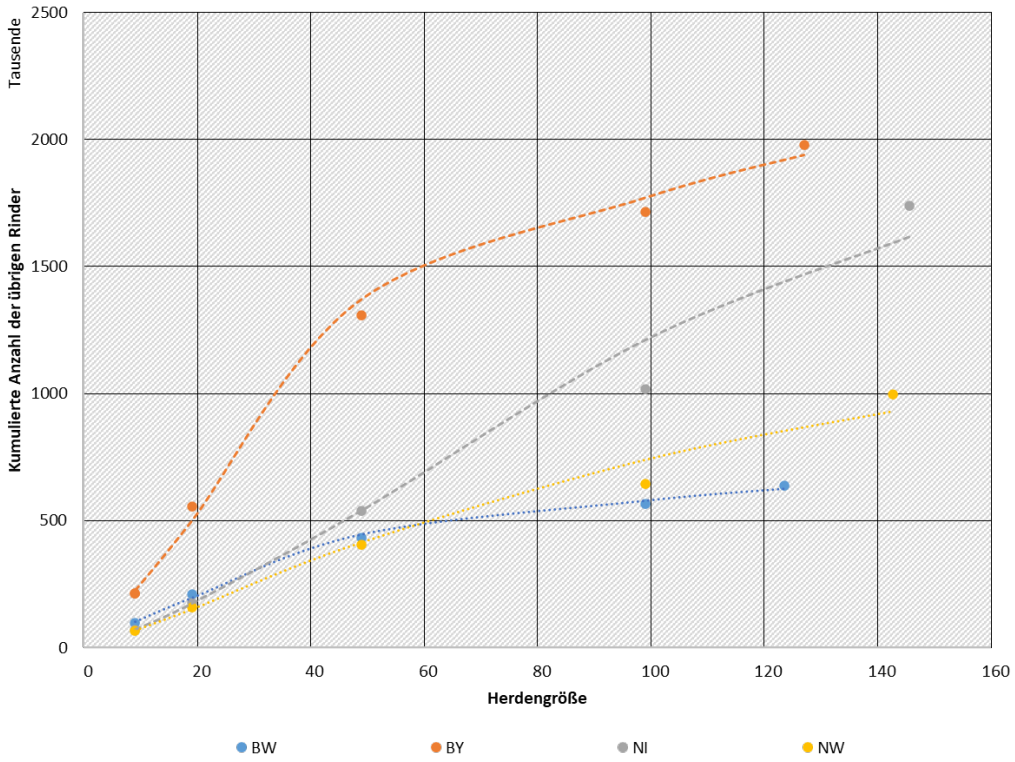
Abbildung 28: Kumulierte Anzahl der milchviehhaltenden Betriebe in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)



Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

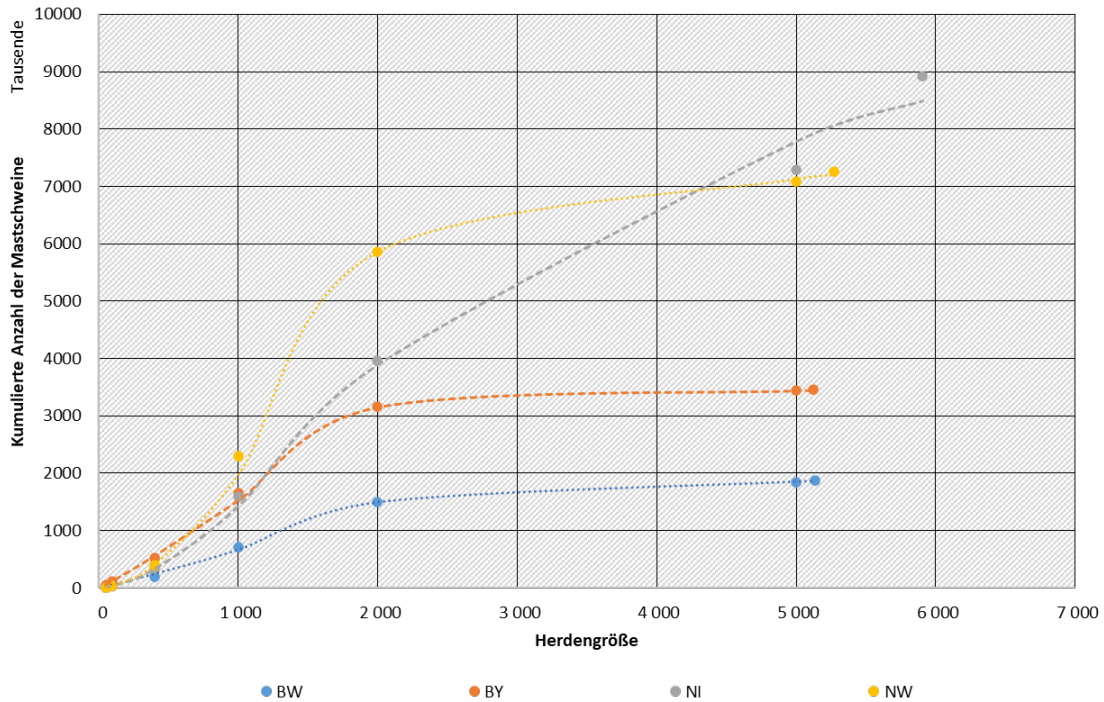
Abbildung 29: Kumulierte Anzahl der übrigen Rinder[1] in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)

[1] Zusammenfassung des Bestands an Kälbern sowie Jungrindern, männlichen Rindern und anderen Kühen



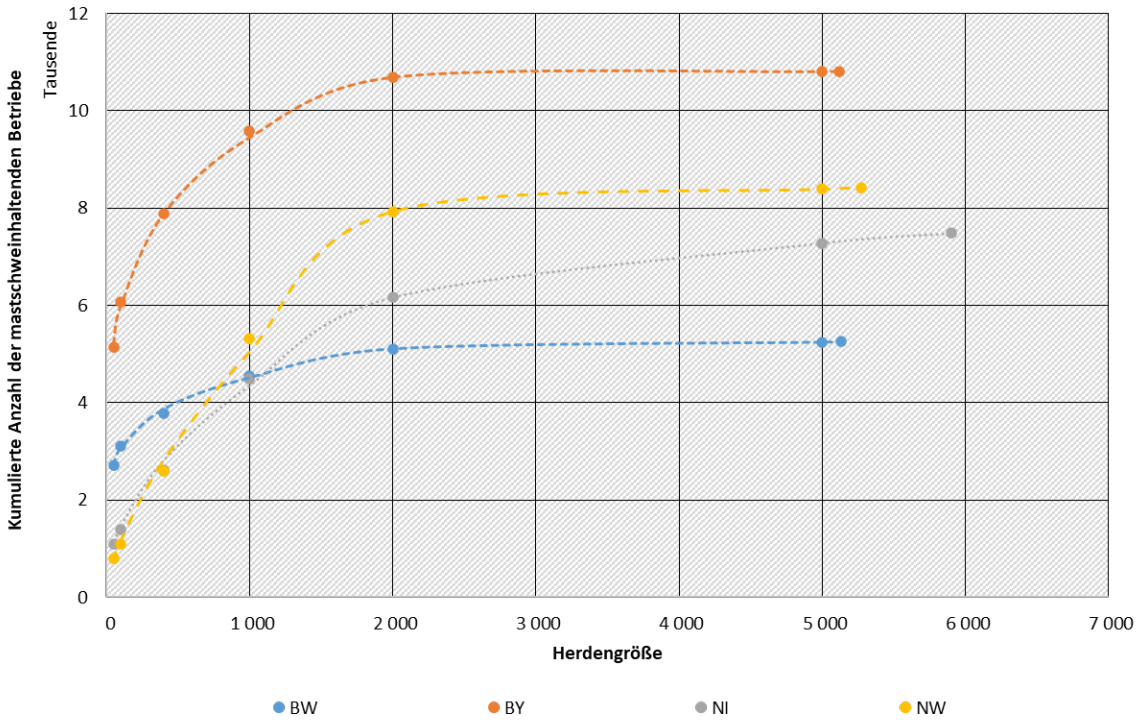
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 30: Kumulierte Anzahl der Mastschweine in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)



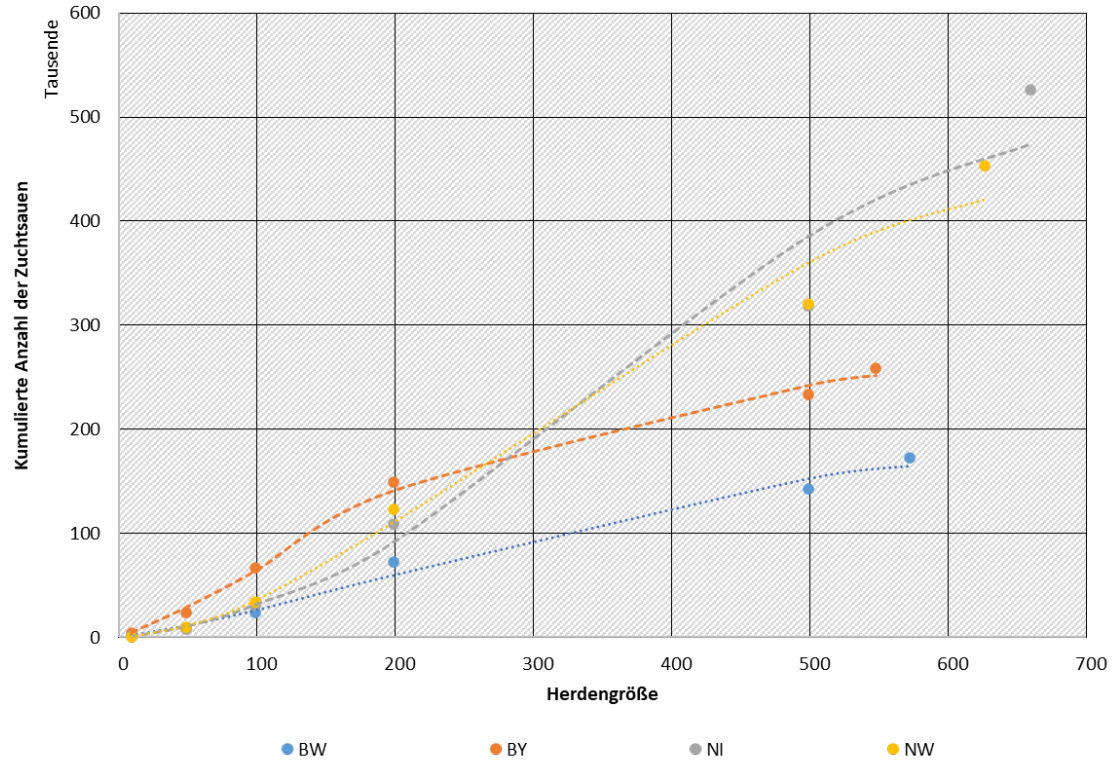
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 31: Kumulierte Anzahl der mastschweinehaltenden Betriebe in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)



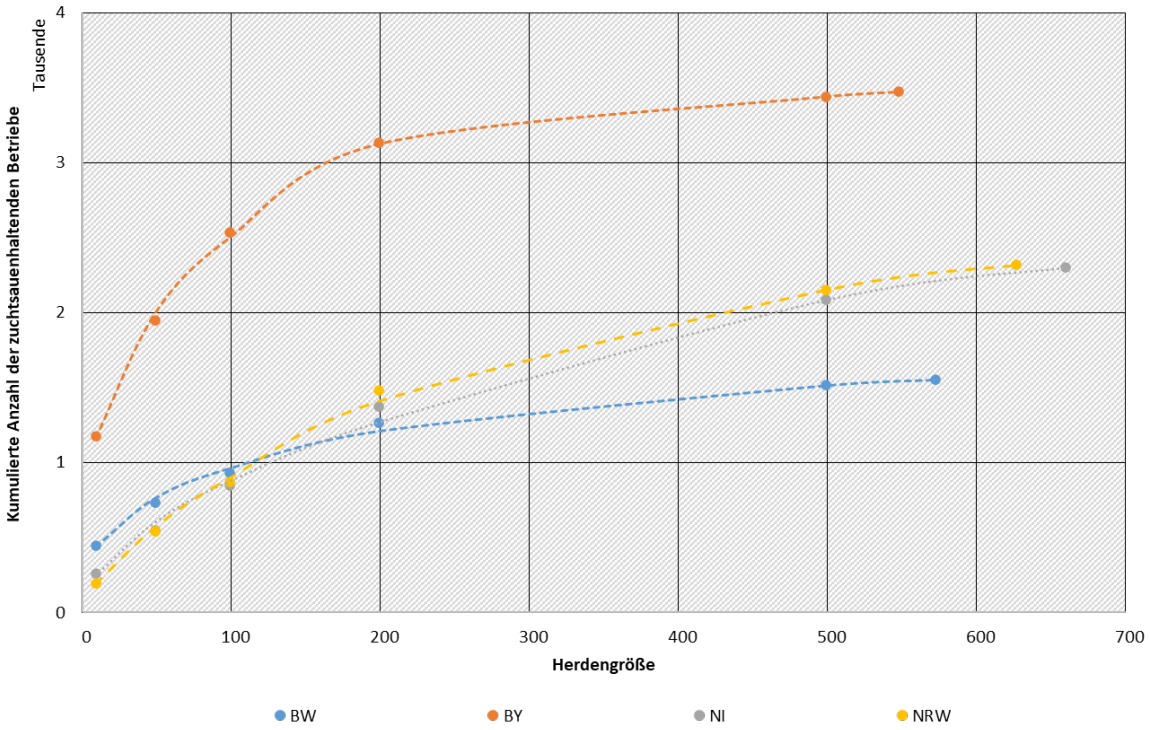
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 32: Kumulierte Anzahl der Zuchtsauen in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)



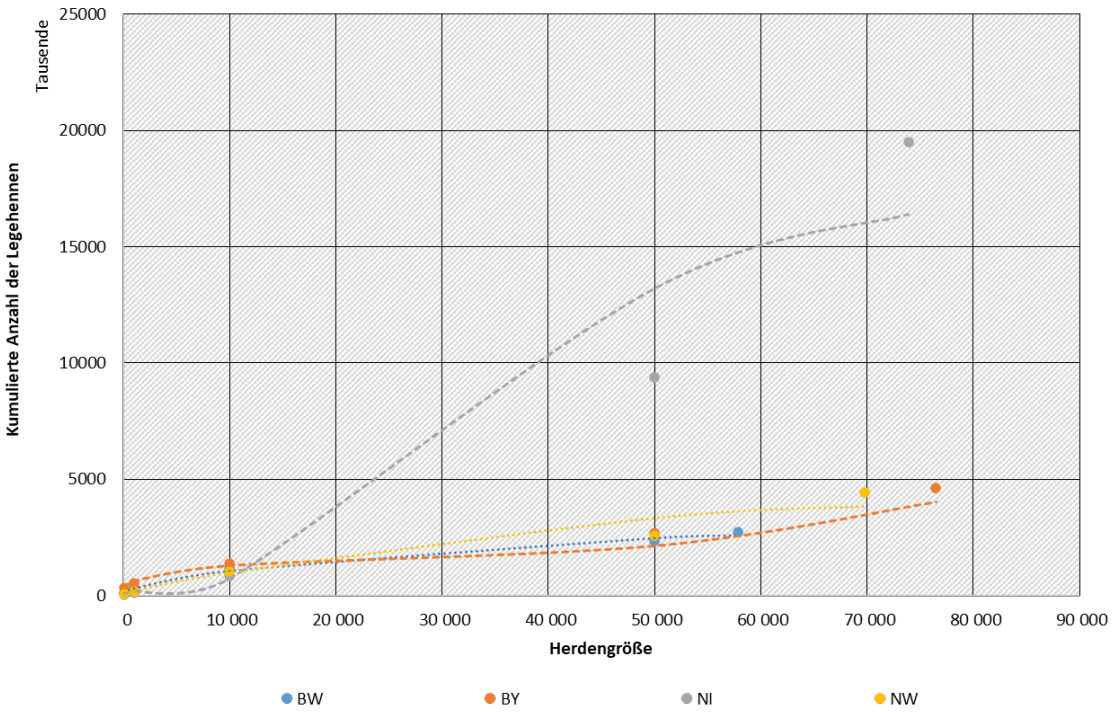
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 33: Kumulierte Anzahl der zuchtsauenhaltenden Betriebe in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)



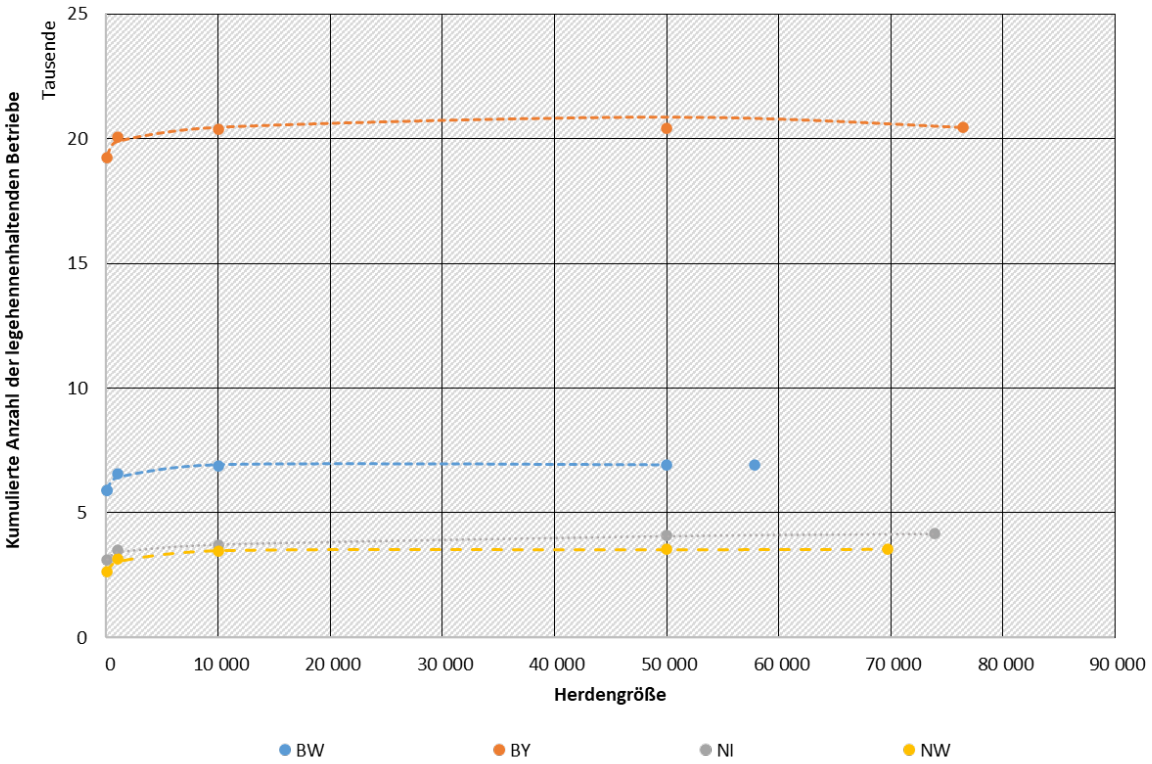
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 34: Kumulierte Anzahl der Legehennen in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)



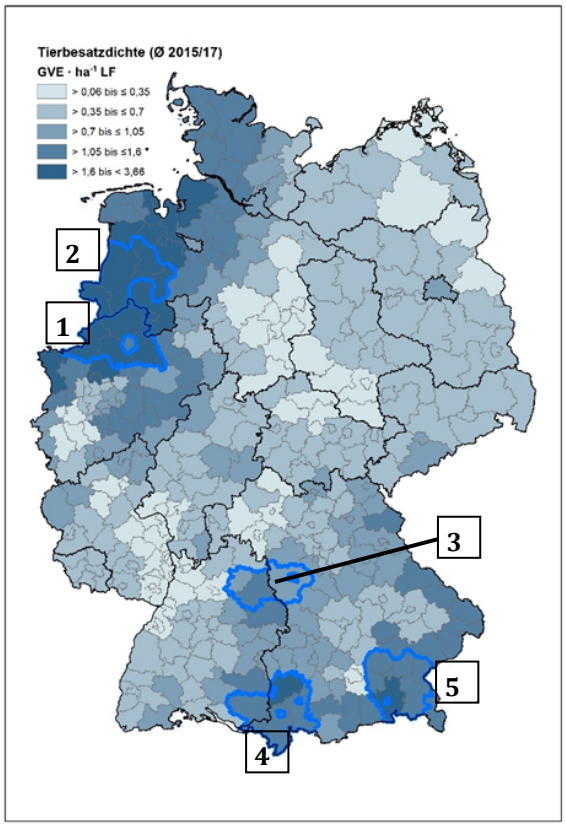
Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

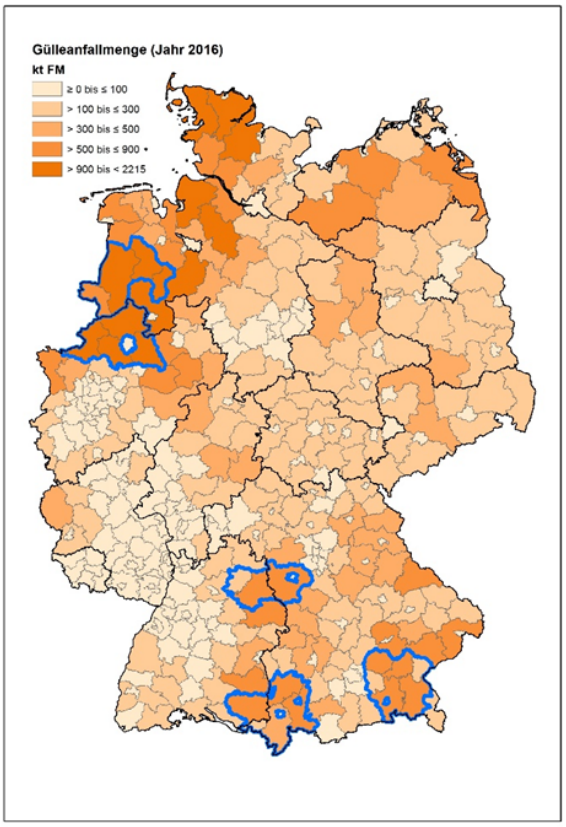
Abbildung 35: Kumulierte Anzahl der legehennenhaltenden Betriebe in den Ländern der Hotspotregionen in Abhängigkeit von der Herdengröße (Ergebnisse der ASE 2016 und modelliert)

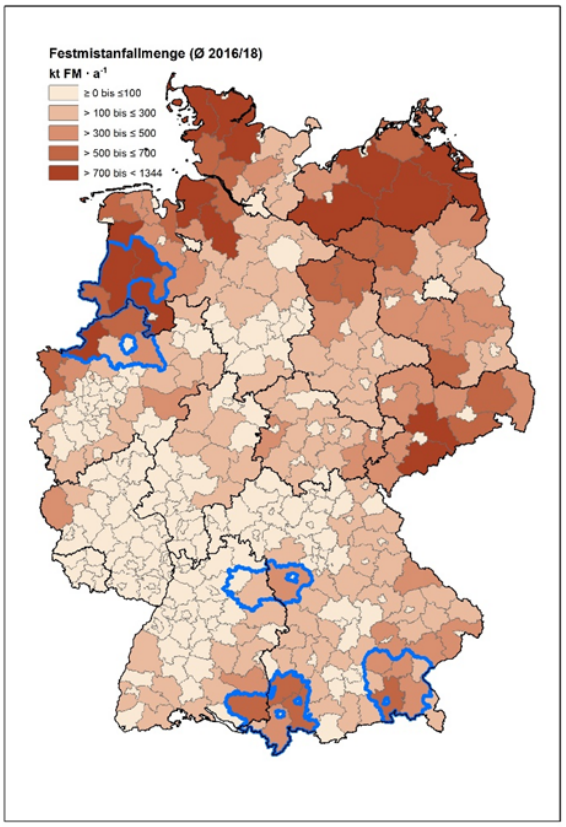


Quelle: eigene Darstellung, DöhlerAgrar

Abbildung 36: Durchschnittliche Tierbesatzdichte, Gülle- und Festmistanfallmengen auf Kreisebene in den Jahren 2015/17; 2016 resp. 2016/18 (eigene Darstellung ausgewählter Ergebnisse der Strukturdatenanalyse)







1 = Münsterland, 2 = Vechta-Cloppenburg, 3 = Ostwürttemberg/Mittelfranken, 4 = Allgäu, 5 = Südostbayern

Quelle: eigene Darstellung, JLU Gießen