

UN ECE-Luftreinhaltekonvention – Task Force on Reactive Nitrogen

Systematische Kosten-Nutzen-Analyse
von Minderungsmaßnahmen für Ammoniak-
emissionen in der Landwirtschaft für
nationale Kostenabschätzungen

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ
UND REAKTORSICHERHEIT – INTERNATIONALE
ZUSAMMENARBEIT AUF DEM UMWELTGEBIET

Forschungskennzahl 312 01 287
UBA-FB 001527

UN ECE-Luftreinhaltekonvention – Task Force on Reactive Nitrogen

**Systematische Kosten-Nutzen-Analyse von
Minderungsmaßnahmen für Ammoniakemis-
sionen in der Landwirtschaft für nationale
Kostenabschätzungen**

von

Helmut Döhler (Projektleitung)

Brigitte Eurich-Menden

Regina Rößler

Robert Vandr 

Sebastian Wulf

Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft (KTBL) e.V.

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4206.html>
verfügbar. Hier finden Sie auch eine englische Version.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung
der Studie: Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft (KTBL) e.V.
Bartningstraße 49
64289 Darmstadt

Abschlussdatum: Juni 2011

Herausgeber: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet II 4.3-D Wirkungen von Luftverunreinigungen auf terrestrische
Ökosysteme
Gabriele Wechsung

Dessau-Roßlau, November 2011

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001527	2.	3.
4. Titel des Berichts Systematische Kosten-Nutzen-Analyse von Minderungsmaßnahmen für Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft für nationale Kostenabschätzungen		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Döhler Helmut, Eurich-Menden Brigitte, Rößler Regina, Vandr� Robert, Wulf Sebastian	8. Abschlussdatum 30.4.2011	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) e.V. Bartningstra�e 49 64289 Darmstadt	9. Veröffentlichungsdatum 11/2011	
	10. UFOPLAN-Nr. FKZ 312 01 287	
	11. Seitenzahl 36	
	12. Literaturangaben 17	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	13. Tabellen und Diagramme 20	
	14. Abbildungen 14	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Zusammenfassung		
<p>Im Rahmen des Vorhabens wurde die Methodik zur Ermittlung der Kosten zur Minderung von landwirtschaftlichen Ammoniakemissionen aktualisiert und die Kosten ausgewählter, für Deutschland geeigneter und repräsentativer Minderungsmaßnahmen neu berechnet. Die Minderungskosten werden aus dem Verhältnis der Mehrkosten für die Minderungsmaßnahme und der Minderemission im Vergleich zu einem Referenzsystem ermittelt.</p> <p>Durch die proteinangepasste Fütterung in der Schweinemast sinken in der Regel die Futterkosten, so dass negative Minderungskosten entstehen (-3,5 bis -13,5 €/kg NH₃ je nach Referenzsystem). Schweinemast in Au�enklmast�llen verursacht im Vergleich zu zwangsbelüfteten Ställen Minderungskosten von 9,2 €/kg NH₃. Dieser Betrag kann jedoch nicht immer alleine der Ammoniak-Emissionsminderung zugerechnet werden (Allokation), da Au�enklmast�lle in der Regel zur Verbesserung des Tierwohls und der Tiergesundheit errichtet werden. Ein- und mehrstufige Abluftreinigung in zwangsbelüfteten Schweinemastst�llen sind eine technisch effektive, aber kostenintensive Minderungsmaßnahme (4,6-8,6 €/kg NH₃).</p> <p>Bei festen Abdeckungen von Schweineg�llelagern (Betondecke, Zelt) mit hohem Investitionsbedarf, jedoch langer Haltbarkeit entstehen moderate Minderungskosten (1,1-2,5 €/kg NH₃). Schwimmende Abdeckungen (Folien, Perlite....) sind mit Minderungskosten von 0,3 bis 0,9 €/kg NH₃ (Schweineg�l-</p>		

le) annähernd kostenneutral, wenn der Düngerwert des konservierten Stickstoffs eingerechnet wird. Bei Rindergülle sind die Minderungskosten der Abdeckung von Güllebehältern erheblich höher, da die natürliche Schwimmdecke die Emissionen per se verringert (1,3 bis 12 €/kg NH₃).

Bei der Ausbringung von Rinder- und Schweinegülle ist bei geringen jährlichen Verfahrensleistungen (1000-3000 m³/a) nur die absetzige Einarbeitung kosteneffektiv (0,6-0,8 €/kg NH₃). Bei hohen Verfahrensleistungen und geteilten Ausbringverfahren kann die direkte Einarbeitung noch effektiver sein (0,4-0,5 €/kg NH₃). Bei hohen Verfahrensleistungen liegen die Kosten der Emissionsminderung für die Minderungsmaßnahmen Schleppschlauch, Schleppschuh, Schlitztechnik und Güllegrubber nur noch bei 0,3 bis 0,5 €/kg NH₃ und sind bei Einbeziehung des Düngerwertes kostenneutral.

Für die Einarbeitung und Urease-Hemmung bei der Harnstoffdüngeranwendung wurden hohe bzw. moderate Minderungskosten ermittelt (3,6-5,7 bzw. 0,5-1,1 €/kg NH₃). Allerdings besteht eine hohe Unsicherheit bezüglich der tatsächlichen Emissionen aus Harnstoff.

Die Berechnungen wurden jeweils isoliert für einzelne Verfahrensschritte der tierischen Erzeugung (Fütterung, Stall, Lager, Ausbringung) durchgeführt. Die Emissionsminderung in einem Verfahrensschritt beeinflusst die Menge des Stickstoffs in den darauf Folgenden. Dieser Zusammenhang wird mit Minderungseffekten und Minderungskosten exemplarisch für ein Schweinemastverfahren dargestellt.

17. Schlagwörter

Ammoniak, Emissionen, Minderungskosten, Tierhaltung, Wirtschaftsdünger, Harnstoff, Schweinegülle, Rindergülle, Fütterung, Stall, Lagerung, Ausbringung

18. Preis

19.

20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001527	2.	3.
4. Report Title Systematic Cost-Benefit Analysis of Mitigation Measures for Agricultural Ammonia Emissions, Supporting National Costing Analysis		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Döhler Helmut, Eurich-Menden Brigitte, Rößler Regina, Vandr� Robert, Wulf Sebastian		8. Report Date 30.4.2011
6. Performing Organisation (Name, Address) Association for Technology and Structures in Agriculture (KTBL) Bartningstra�e 49 D-64289 Darmstadt Germany		9. Publication Date 11/2011
		10. UFOPLAN-Ref. No. FKZ 312 01 287
		11. No. of Pages 34
7. Funding Agency (Name, Address) Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency) Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau		12. No. of Reference 17
		13. No. of Tables, Diagrams 20
		14. No. of Figures 14
15. Supplementary Notes		
16. Abstract		
<p>In this project, the methods for the determination of the expenses for the reduction of agricultural ammonia emissions were updated, and the costs of selected, representative mitigation measures suitable for Germany's agriculture were newly calculated. The reduction costs are determined based on the ratio of the extra costs for the reduction measure and the emission reduction in comparison with a reference system.</p> <p>Protein-adapted feeding in pig fattening generally leads to lower expenses for feedstuff, which provides negative reduction costs (- € 3.5 to - € 13.5 per kg of NH₃ depending on the reference system). Pig fattening in naturally ventilated housing causes reduction costs of € 9.2 per kg of NH₃ as compared with forced-ventilated animal houses. However, this amount cannot always be exclusively attributed to ammonia emission reduction (allocation) because naturally ventilated houses are generally built for the improvement of animal welfare and animal health. Single and multiple-stage air purification techniques in forced-ventilated pig fattening houses are a technically efficient, though cost-</p>		

intensive reduction measure (€4,6 - €8,6 per kg of NH₃).

Solid covers for pig slurry stores (concrete ceiling, tent) are characterized by high investment expenses and a long service life causes moderate reduction costs (€ 1.1 - € 2.5 per kg of NH₃). Floating covers (plastic sheet, granules) are almost cost-neutral given reduction costs of € 0.3 to € 0.9 per kg of NH₃ (pig slurry) if the fertilizer value of the conserved nitrogen is included in the calculation. Cattle slurry requires significantly higher extra costs for the covering of slurry stores because the natural floating cover itself reduces emissions (€ 1.3 to € 12 per kg of NH₃).

If annual spreading performances are low (1,000 to 3,000 m³/a), only promptly incorporation of cattle and pig slurry is cost-effective. If spreading performances are high, the costs of emission reduction for the techniques trailing hose, trailing shoe, slot injector, and slurry cultivator only range between € 0.3 and € 0.5 per kg of NH₃. In this case these techniques are cost-neutral if the fertilizer value is considered.

High or moderate mitigation costs (€ 3.6 - € 5.7 and € 0.5 - € 1.1 per kg of NH₃) were determined for incorporation and urease inhibition during urea fertilizer application. However, there is great insecurity with regard to actual emissions from urea.

The calculations were carried out separately for individual operation steps in animal production (feeding, animal house, store, spreading). Emission reduction in one operation step influences the quantity of nitrogen in the following steps. This context including reduction effects and reduction costs is shown using a pig fattening technique as an example

17. Keywords

Ammonia, emissions, mitigation costs, livestock housing, animal manure, urea, pig slurry, cattle slurry, feeding, animal house, storage, distribution

18. Price

19.

20.

Inhalt

1	EINLEITUNG	2
2	AMMONIAKMINDERUNGSMAßNAHMEN IN DER LANDWIRTSCHAFT	2
2.1	FÜTTERUNG	3
2.2	HALTUNG	3
2.3	WIRTSCHAFTSDÜNGERLAGERUNG	4
2.4	WIRTSCHAFTSDÜNGERAUSBRINGUNG	5
2.5	HARNSTOFF ALS STICKSTOFFDÜNGER	7
3	METHODIK	7
3.1	ZIELSETZUNG UND ANFORDERUNGEN	7
3.2	ANWENDUNGSBEREICH, VORGEHEN UND SYSTEMGRENZEN	8
3.3	KOSTEN	8
3.4	AMMONIAK-EMISSIONSMINDERUNG	9
4	MINDERUNGSKOSTEN: FÜTTERUNG	10
4.1	TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER VERFAHREN	11
4.2	STICKSTOFFAUSSCHIEDUNGEN UND EMISSIONSFAKTOREN	14
4.3	KOSTEN DER FÜTTERUNG UND EMISSIONSMINDERUNG	15
5	MINDERUNGSKOSTEN: HALTUNG	16
5.1	TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER VERFAHREN	17
5.2	KOSTEN DER HALTUNG UND DER EMISSIONSMINDERUNG	17
5.3	SENSITIVITÄTEN DER BERECHNUNG	18
6	MINDERUNGSKOSTEN: ABLUFTREINIGUNG	18
6.1	TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER VERFAHREN	19
6.2	KOSTEN DER ABLUFTREINIGUNG UND DER EMISSIONSMINDERUNG	20
6.3	SENSITIVITÄTEN DER BERECHNUNG	21
7	MINDERUNGSKOSTEN: GÜLLELAGERUNG	22
7.1	TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER VERFAHREN	23
7.2	EMISSIONSMINDERUNG UND DÜNGERWERT	24
7.3	KOSTEN DER LAGERABDECKUNG UND DER EMISSIONSMINDERUNG	25
7.4	SENSITIVITÄTEN DER BERECHNUNG	27
8	MINDERUNGSKOSTEN: GÜLLEAUSBRINGUNG	28
8.1	TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER VERFAHREN	29
8.2	EMISSIONSMINDERUNG UND DÜNGERWERT	31
8.3	KOSTEN DER AUSBRINGUNG UND DER EMISSIONSMINDERUNG	32
9	MINDERUNGSKOSTEN: HARNSTOFF	34
9.1	VERFAHREN	34
9.2	MINDERUNGSKOSTEN	34
10	MINDERUNGSKOSTEN IN DER VERFAHRENSKETTE	35
11	LITERATUR	37

1 Einleitung

Mit der Unterzeichnung des Göteborg-Protokolls 1999 und der NEC-Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und Rates in 2001 hat sich Deutschland dazu verpflichtet, eine nationale Höchstgrenze für die Emissionen von Ammoniak (NH_3) von 550 kt pro Jahr einzuhalten und ab dem Jahr 2010 nicht mehr zu überschreiten. Die aktuelle Prognose geht jedoch davon aus, dass diese Emissionshöchstgrenze ohne zusätzliche Maßnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen nicht unterschritten werden kann (OSTERBURG et al., 2010). Für die Minderung von Ammoniakemissionen steht ein breites Spektrum an Maßnahmen im Bereich der Tierhaltung und der Wirtschaftsdüngerlagerung und -ausbringung zur Verfügung. Diese sind in Hinblick auf ihre Eignung, Wirksamkeit und Kosten sehr unterschiedlich zu bewerten. In Anlehnung an das UN/ECE Guidance Document und Anhang XI des Göteborg-Protokolls wurde eine Übersicht über Maßnahmen, ihr Minderungspotenzial und ihre Eignung erstellt (Kapitel 2).

Die Berechnung von Minderungskosten gehört nicht zu den Berichtspflichten der Vertragsstaaten, ist jedoch für volks- und betriebswirtschaftliche Aspekte im Rahmen von nationalen und internationalen Szenarien für die Politikberatung essentiell. Die letzten nationalen Berechnungen von Kosten für die Minderung von Ammoniakemissionen wurden im UBA/BMELV Vorhaben 1999 – 2002 vom KTBL durchgeführt. Die Methodik war jedoch nicht mit internationalen Gremien abgestimmt und stützte sich in vielen Bereichen auf Schätzungen. Somit sind die Ergebnisse bisher nicht mit denen anderer Vertragsstaaten vergleichbar. Ziel des o.g. Vorhabens ist es, die Methodik zur Ermittlung von Minderungskosten gemäß internationaler Abstimmung (EUROPEAN COMMISSION, 2003, UN/ECE, 2007) zu aktualisieren, um die Transparenz und innere Konsistenz zu erhöhen und den Vergleich auf internationaler Ebene zu ermöglichen. Die Methodik beinhaltet neben Kostenberechnungen auch die Berechnung von Nutzen-Effekten (z. B. Einsparung von Düngemitteln, Futtermitteln oder Arbeitsgängen) (Kapitel 3).

Die Kosten für ausgewählte, für Deutschland geeignete Maßnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen in den Aktivitätsbereichen Fütterung, Stall, Lager und Ausbringung wurden mithilfe der entwickelten Methodik neu berechnet. Die aktuellen Minderungskosten und eine kurze technische Beschreibung der Minderungsmaßnahmen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Je früher in der Verfahrenskette eine Minderung von Ammoniakemissionen erfolgt, desto höher können Verluste in den nachfolgenden Stufen der Verfahrenskette ausfallen. So führt z.B. die Minderung von NH_3 -Verlusten im Stall zu einem erhöhten Gehalt an Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) im Lager und damit zu einem erhöhten Verlustrisiko in dieser Verfahrensstufe. Ohne weitere Minderungsmaßnahmen beim Lager, z.B. durch eine Abdeckung des Güllelagers mit Schwimmfolie, gehen im Stall konservierte N-Mengen daher teilweise nachträglich verloren. Umgekehrt ist eine Investition in eine emissionsmindernde Gülleausbringungstechnik dann besonders effizient, wenn bereits bei der Güllelagerung Minderungsmaßnahmen ergriffen wurden, da die Gülle dann mehr $\text{NH}_4\text{-N}$ enthält. Daher ist es wichtig, die Wirksamkeit und Effizienz von Minderungsmaßnahmen für die gesamte Verfahrenskette zu betrachten. Für ausgewählte Kombinationen einzelner Verfahrensstufen wurde dies in Kapitel 10 geprüft.

2 Ammoniakminderungsmaßnahmen in der Landwirtschaft

Im Rahmen dieses Vorhabens werden verfahrenstechnische und organisatorische Maßnahmen für die Minderung von Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung sowie bei der Anwendung von Harnstoffdünger betrachtet.

In Anlehnung an das UN/ECE Guidance Document, Anhang IX des Göteborg-Protokolls und das BVT-Referenzdokument (BREF) „Intensive Rearing of Poultry and Pigs“ (European Commission 2003) werden in Tabelle 1 die wichtigsten Maßnahmen im Bereich der Tierhaltung aufgelistet und bezüglich ihrer Wirksamkeit und Eignung für die Praxis beurteilt.

2.1 Fütterung

Die Höhe der Stickstoffausscheidungen über Kot und Harn hängt linear von der Aufnahme von Stickstoff (Rohprotein) mit der Nahrung ab. Etwa 65 % des aufgenommenen Stickstoffs werden bei Schweinen nicht für den Ansatz verwertet und ausgeschieden. Durch eine bedarfsgerechte Fütterung kann eine Überversorgung der Tiere mit Rohprotein verringert und somit die Stickstoffausscheidungen und Ammoniakemissionen reduziert werden. Eine Anpassung der Rohproteinversorgung an den Bedarf der Tiere während der Mast ermöglicht die Mehrphasenfütterung. Durch die Zulage von Lysin und ggf. anderer essentieller Aminosäuren ist es möglich, den Rohproteingehalt im Futter noch weiter zu reduzieren, ohne Leistungseinbußen (Wachstum, Schlachtkörperqualität, Fleischbeschaffenheit) bei den Tieren in Kauf nehmen zu müssen. Für die Mehrphasenfütterung sprechen neben Umwelt- auch Kosten- und Tiergesundheitsgründe. Durch die Reduzierung des Rohproteingehalts von der Anfangs- bis zur Endmast werden Futterkosten eingespart. Die Höhe der Einsparung hängt vom Umfang des Aminosäureinsatzes und dem Marktpreis der Futtermittelkomponenten ab. Die Reduzierung des Rohproteingehalts erfolgt über eine Reduzierung des Anteils teurer Eiweißkomponenten (Sojaextraktionsschrot) im Endmastfutter, das ca. zwei Drittel des Futters in der gesamten Mast ausmacht. Bei der Multiphasenfütterung negativ zu bewerten sind ein höherer technischer und organisatorischer Aufwand.

2.2 Haltung

Verfahrensauswahl

Voraussetzung für die Berechnung von NH_3 -Minderungskosten sind ausreichende Datengrundlagen. Minderungsmaßnahmen in der Rinder- und Legehennenhaltung müssen aus diesem Grund zunächst zurückgestellt werden. In beiden Bereichen fehlen gesicherte Ergebnisse zu den Auswirkungen verschiedener Haltungsformen auf die Ammoniakemissionen. Die Höhe der zu realisierenden Ammoniak-Emissionsminderung durch den Bau emissionsarmer Ställe hängt im Wesentlichen von der Art der bestehenden Haltungssysteme ab. In Deutschland findet bei Rindern und Geflügel eine Entwicklung von bisher verbreiteten emissionsarmen Haltungssystemen hin zu Haltungsformen mit höheren Ammoniakemissionen statt. Bei Milchvieh ist der Laufstall am weitesten verbreitet, während die emissionsarme Haltungsform der Anbindehaltung aus Gründen des Tierschutzes weiter an Bedeutung verliert. Die konventionelle Käfighaltung von Geflügel ist in Deutschland seit Anfang 2010 verboten, was zu Veränderungen in der Haltungsstruktur bei den Legehennen geführt hat. Die Nutzung ausgestalteter Käfige, die nach europäischem Recht unbefristet möglich ist, ist in Deutschland nur noch befristet in bestehenden Anlagen erlaubt. Solche Käfige sind jedoch im „Leitfaden über Techniken zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen“ der UNECE als Referenzsystem für die Bewertung von Verfahren definiert.

Schweinemast: Außenklimastall

Für Außenklimaställe sind wärmegeämmte oder eingestreute Liege- und Ruhebereiche charakteristisch. Außenklimaställe werden mit Ausnahme des Tiefstreustalls gegenüber zwangsgelüfteten Ställen mit Vollspaltenboden als emissionsärmer eingestuft, da die geringeren Temperaturen im Außenklimastall zu einem verringerten Ammoniakemissionspotenzial führen (Minderung ca. 35 %). Auch im Hinblick auf den Energiebedarf sind Außenklimaställe günstiger zu bewerten als zwangsgelüftete Ställe, da auf Lüftung und Heizung verzichtet werden kann. Negativ zu bewerten sind ein höherer Arbeitsaufwand durch erschwerte Reinigungs- und Desinfektionsmöglichkeiten und ein größerer Reparaturbedarf. Außenklimaställe sind nur als Neubau zu realisieren. Motivation für den Bau ist in der Regel das Tierwohl.

Abluftreinigung

Abluftreinigungsanlagen stellen eine End-of-Pipe-Technik für die Minderung von Ammoniakemissionen dar. Sie sind im UN/ECE Guidance Document als Kategorie-1-Maßnahme definiert, gehören jedoch bisher nicht zum Stand der Technik emissionsarmer Tierhaltungssysteme (EUROPEAN COMMISSION, 2003).

Angeboten werden Biofilter, Rieselbettreaktoren (Bio-Wäscher), Chemo-Wäscher und kombinierte Verfahren (zwei oder drei-stufig). Für die einstreulose Schweinehaltung wurden bislang ein Biofiltersystem, drei Rieselbettreaktoren und jeweils zwei zwei- und dreistufige Anlagen nach dem Cloppenburg-Leitfaden bzw. dem DLG-Prüfrahen zertifiziert. Ein weiterer, einstufiger Chemo-Wäscher mit Vorbedüsung bestand den DLG-Signum-Test in der Kurzzeit-Geflügelmast mit Einstreu. Biofilter werden hauptsächlich für die Geruchsminderung eingesetzt und nach den Prüfkriterien der DLG zur alleinigen Ammoniakabscheidung in der Tierhaltung als nicht geeignet eingestuft. Für die Kostenberechnungen wurden daher Rieselbettreaktoren und mehrstufige Anlagen berücksichtigt.

Das Minderungspotenzial von Rieselbettreaktoren liegt bei 70 %, während das von mehrstufigen Anlagen bei 90 % und darüber liegen kann. Die Wirksamkeit der NH_3 -Abscheidung ist abhängig von einer regelmäßigen Wartung der Anlagen, was die fixen Anlagenkosten erhöht. Bei Einsatz von Säure zur pH-Regulierung ist ein zusätzliches Lager für das säurehaltige Waschwasser notwendig. Direkt vor der Ausbringung kann das Waschwasser mit der Gülle vermischt werden. Durch die Erhöhung der auszubringenden Güllemenge steigen die Ausbringkosten.

Die Abluftreinigung ist grundsätzlich nur bei Ställen mit Zwangslüftung einsetzbar, da die Abluft aus den Ställen gesammelt und mit Ventilatoren durch die Reinigungsanlage geleitet werden muss. Haltungssysteme mit freier Lüftung, wie offene Laufställe für Rinder, lassen sich nicht mit einem Abluftfilter ausrüsten. Hauptanwendungsbereich ist daher die Schweinehaltung. Für die Geflügelhaltung bestehen noch kaum Praxiserfahrungen, hier bestehen vor allem Probleme mit der hohen Staubbelastung, die einen dauerhaften Betrieb von Abluftreinigungsanlagen erschwert. Abluftreinigungsanlagen lassen sich bei Neubauten und als Nachrüstungen realisieren und sind mit hohen Investitionskosten verbunden. In der Praxis werden Abluftreinigungsanlagen daher häufig nur gebaut, wenn andere Maßnahmen, z.B. Fütterung und Entmistung, nicht ausreichen, um den Immissionsschutz zu gewährleisten.

2.3 Wirtschaftsdüngerlagerung

Ammoniakverluste aus Güllelagern können durch eine Abdeckung offener Lager minimiert werden. Es wird zwischen natürlichen und künstlichen Abdeckungen unterschieden.

Die einfachste und kostengünstigste Form der Güllelagerabdeckung sind **natürliche Schwimmdecken**. Diese bilden sich hauptsächlich auf Rindergülle, aber auch bei faser- und trockensubstanzreicher Schweinegülle. Das Minderungspotenzial liegt bei Rindergülle zwischen 30 und 80 % und bei Schweinegülle zwischen 20 und 70 %.

Ein höherer Minderungseffekt von bis zu 90 % wird durch eine künstliche **Abdeckung mit Strohhäckseln** realisiert. Die Strohecke muss jedoch mindestens 10 cm mächtig sein. Die Wirksamkeit beider Abdeckungsvarianten (natürliche Schwimmdecke und Strohhäcksel) ist bei Betrieben mit häufiger Gülleausbringung eingeschränkt, da die natürliche Schwimmdecke bzw. die Strohschicht beim Aufrühren der Gülle zwischenzeitlich oder dauerhaft verloren gehen. Strohecken müssen nach dem Aufrühren erneuert werden.

Materialverluste sind bei **Granulaten** geringer als beim Stroh. Sie schwimmen kurze Zeit nach dem Rühren der Gülle wieder auf und werden daher nur zu einem geringen Maß mit ausgebracht. Ein Ausgleich des Materialverlustes ist jedoch auch hier notwendig. Emissionsverluste werden um 80 bis 90 Prozent gemindert.

Schwimmfolien weisen ebenfalls ein Minderungspotenzial von 80 bis 90 % auf. Ihr Vorteil liegt in einem geringen Wartungsaufwand. Niederschlagswasser muss in die unterliegende Gülle abgeleitet oder abgepumpt werden.

Das höchste Minderungspotenzial mit bis zu 95 % haben **Schwimmkörper** und **feste Abdeckungen** wie eine Betondecke, ein Zeltdach oder eine Abdeckung aus Kunststoff. Schwimmkörper sind jedoch nur für flüssige Schweinegülle ohne natürliche Schwimmdecke geeignet. Beim Rühren und Ansaugen der Gülle muss darauf geachtet werden, dass Schwimmkörper nicht mit angesaugt werden, um Verluste, Verstopfungen und Beschädigungen zu vermeiden. Feste Abdeckungen haben die längste Lebensdauer mit geringem Wartungsaufwand. Ein weiterer Vorteil gegenüber anderen Abdeckungsarten ist, dass der Eintrag von Regenwasser verhindert wird. Ein Zeltdach ist jedoch aufgrund der statischen Belastung nicht für alle Güllebehälter geeignet.

2.4 Wirtschaftsdüngerausbringung

Ammoniakverluste bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern können durch Einsatz emissionsmindernder Techniken und organisatorische Maßnahmen gesenkt werden. Stand der Technik sind neben dem herkömmlichen Breitverteiler auch Schleppschlauch- und Schleppschuhverteiler sowie Schlitztechniken. Die Maßnahmen zielen dabei auf eine Reduzierung der emittierenden Oberfläche und eine Verkürzung der Verweilzeit der Gülle auf dem Boden ab.

Beim **Schleppschlauch** wird die Gülle durch Schläuche in Streifen auf dem Boden abgelegt. Die NH_3 -Verluste können gegenüber dem Breitverteiler ohne direkte Einarbeitung besonders in wachsenden Pflanzenbeständen und bei Ausbringung dünnflüssiger Gülle verringert werden. Die Wirkung bei hoher Trockenmasse ist gering, da die Güllestreifen eintrocknen können, ohne in den Boden einzudringen.

Der **Schleppschuhverteiler** ist eine Weiterentwicklung des Schleppschlauchs zur Anwendung auf dem Grünland. Die Gülle wird auch hier über ein System von Schläuchen verteilt, an deren Ende jedoch eine „schuhförmige“ Verstärkung sitzt. Diese drückt den Pflanzenbestand zur Seite und verteilt die Gülle auf den Boden, wodurch Verschmutzungen des Pflanzenbestands verhindert und eine Einarbeitung in den oberen Bodenbereich (0-3 cm) ermöglicht werden. Wie beim Schleppschlauchverteiler ist das Minderungspotenzial für Schweinegülle größer als bei Rindergülle, da Schweinegülle fließfähiger ist.

Schlitztechniken haben ein noch höheres Minderungspotenzial für Ammoniakverluste als Schleppschlauch- und Schleppschuhverteiler (Annahme: 60 % für Rinder- und Schweinegülle). Sie ist für die Ausbringung auf Grünland und in wachsende Ackerkulturen geeignet. Durch die Applikation über Schlitzscheiben, in die die Gülle ausgebracht wird, werden Verschmutzungen des Pflanzenbestandes vermieden; jedoch wird hierdurch die Grasnarbe verletzt. Neuere Schlitztechniken versuchen dies durch eine flachere Schlitztiefe zu minimieren. Der Zugkraftbedarf bedingt geringere Arbeitsbreiten.

Die Anwendbarkeit von Schleppschlauch- und Schleppschuhverteiler sowie Schlitztechniken wird durch eine geringe Hangtauglichkeit und Wendigkeit eingeschränkt.

Das höchste Minderungspotenzial für NH_3 -Emissionen besitzt der **Güllegrubber** (90 %). Die hohe Minderung wird durch direkte Einarbeitung der Gülle in den Boden erreicht. Der Grubber ist nur für unbewachsene Flächen geeignet. Durch die direkte Bearbeitung des Bodens wird im Vergleich zu anderen Verfahren, die die Gülle nicht in den Boden absetzen, eine Zugmaschine mit größerer Leistung benötigt.

Die Einarbeitung kann auch mit herkömmlichen Bodenbearbeitungsgeräten absetzig nach der Ausbringung durchgeführt werden. Die Ausbringung erfolgt mit dem Breitverteiler, die Einarbeitung erfolgt kurz nach der Ausbringung. Die möglichst schnelle Einarbeitung ist umso wichtiger, je dickflüssiger die Gülle und je höher die Temperaturen sind. Bei Einarbeitung innerhalb von einer Stunde entspricht das Minderungspotenzial annähernd dem Güllegrubber. Es sinkt deutlich, wenn die Einarbeitung innerhalb von 4 Stunden nach Ausbringung erfolgt (70 bzw. 50 % für Schweine- und Rindergülle).

Eine weitere Minderungsmaßnahme bei der Ausbringung ist das **Verdünnen** von Flüssigmist. Verglichen mit Schweinegülle hat Rindergülle einen höheren Trockensubstanzgehalt, wodurch die Fließfähigkeit der Gülle herabgesetzt ist. Dies verhindert ein schnelles Abfließen der Gülle von Pflanzenteilen und ein schnelles Eindringen in den Boden. Durch Homogenisieren und Verdünnen kann die Fließfähigkeit von

Rindergülle erhöht und ein schnelleres Eindringen in den Boden gewährleistet werden. Die Schlagkraft der Ausbringung wird mit der Verdünnung gemindert und die Kosten entsprechend erhöht.

Tabelle 1: Ammoniakminderungsmaßnahmen in der Tierhaltung

Ort der Emissionsminderung	Referenzsystem	Minderungsmaßnahme	Tierart	Minde-rungspotenzial (%)	Wirksamkeit/Anwendbarkeit
Fütterung	Einphasenfütterung	Mehrphasenfütterung (Zwei-, Drei- und Multiphasenfütterung) mit Rohproteinanpassung	Schwein	10-30	Aminosäuresupplementierung notwendig, um Leistungseinbußen zu vermeiden; bei Zwei- bzw. Dreiphasenfütterung technischer Aufwand gering, bei der Multiphasenfütterung gesteigerter technischer und organisatorischer Aufwand, hohe Investitionen
Haltung	Zwangsgelüfteter Stall, Vollspalten	Außenklimastall	Schwein	35	Nur bei Neubau geeignet, höherer Arbeitsaufwand kompensiert durch geringe Energiekosten, Motivation i.d.R. Tierwohl
	Ohne Abluftreinigung	Abluftreinigung	Schwein	70-90	Voraussetzung: Zentrale Abluftführung. Zusätzlicher Lagerbehälter bei Säureeinsatz notwendig, höherer Ausbringungsaufwand, Wirksamkeit der NH ₃ -Abscheidung abhängig von Anlagentyp und Wartung
Lagerung	Offener Lagerbehälter	Natürliche Schwimmdecke	Schwein Rind	20-70 30-80	Verminderte Wirksamkeit in Betrieben mit häufiger Gülleausbringung
		Strohhäcksel	Schwein / Rind	70-90	Verminderte Wirksamkeit in Betrieben mit häufiger Gülleausbringung
		Granulate	Schwein / Rind	80-90	Ausgleich von Materialverlusten notwendig
		Schwimmfolie	Schwein / Rind	80-90	Geringer Wartungsaufwand
		Schwimmkörper	Schwein	> 90	Einsatz nur bei Schweinegülle ohne Schwimmdecke, besondere Sorgfalt beim Homogenisieren und beim Absaugen der Gülle erforderlich
		Feste Abdeckung (Zeltdach, Beton, Kunststoff)	Schwein / Rind	85-95	Geringer Wartungsaufwand, kein Regenwassereintrag, längste Nutzungsdauer; nicht jeder Behälter für Zeltdach geeignet (Statik)
Ausbringung	Breitverteiler ohne Einarbeitung	Schleppschlauch	Schwein / Rind	30/20	Auf Grünland keine Verletzung der Grasnarbe. Nur geringe Wirkung bei unbearbeiteten Boden und hoher Trockenmasse, geringe Hangtauglichkeit
		Schleppschuh	Schwein / Rind	50/40	Für wachsende Pflanzenbestände und Grünland, vermeidet Verschmutzungen des Pflanzenbestandes; Verletzungen der Grasnarbe, geringe Hangtauglichkeit
		Schlitz (Scheiben)	Schwein / Rind	60	Für wachsende Bestände und Grünland, keine Verschmutzungen des Pflanzen-

				bestandes. Geringere Arbeitsbreiten (6 - 9 m), geringe Hangtauglichkeit, Verletzungen der Grasnarben möglich
Grubber	Schwein / Rind	90		Nicht für Grünland und wachsende Pflanzenbestände
Vollständige Einarbeitung innerhalb 1 Stunde	Schwein / Rind	90		Nicht für wachsende Bestände, erhöhte Anforderungen an die Arbeitsorganisation
Vollständige Einarbeitung innerhalb 4 Stunden	Schwein / Rind	70/50		Nicht für wachsende Bestände, Anforderungen an die Arbeitsorganisation
Verdünnung 1:1	Rind	50		Zur besseren Infiltration bei hoher TM, höhere Ausbringkosten durch verminderte Schlagkraft. Erhöhung des Risikos von Bodenschäden durch das Befahren

Quellen: DÖHLER ET AL. 2002; EURICH-MENDEN ET AL. 2011; IBK 2008

2.5 Harnstoff als Stickstoffdünger

Harnstoff ist bei der Anwendung von Mineraldüngern die bedeutendste Quelle für NH_3 -Emissionen. Harnstoff wird im Boden durch das Enzym Urease hydrolytisch zu Ammonium umgesetzt. Hierbei wird zugleich der pH-Wert im Boden erhöht, dies fördert die NH_3 -Bildung und -Freisetzung. Wie bei den Wirtschaftsdüngern ist insbesondere die Einarbeitung des Harnstoffs in den Boden geeignet, um die NH_3 -Verluste zu vermindern. Daneben kann der Einsatz von Ureaseinhibitoren wie z.B. N-(n-butyl) Thiophosphorsäuretriamid (NBTPT, „Agrotain“) die Umsetzung des Harnstoffs verzögern und damit die Infiltration in den Boden vor der Umsetzung fördern.

3 Methodik

3.1 Zielsetzung und Anforderungen

Die systematische Kostenanalyse von Maßnahmen zur Verringerung von Ammoniakemissionen dient der nationalen und internationalen Abstimmung von Minderungsmaßnahmen. Damit die ermittelten Minderungskosten als Basisdaten für diese Abstimmung valide sind, muss eine einheitliche Berechnungsmethodik zugrunde liegen, die den folgenden Anforderungen genügt (DÖHLER et al., 2002 S. 30 ff.):

- Praxisnähe: Die Berechnungen müssen wesentliche in der landwirtschaftlichen Praxis angewandte Verfahren abbilden.
- Universalität und Flexibilität: Die Methodik muss auf regional und nach Betriebstyp und -größe unterschiedliche Praktiken und Verfahren anwendbar sein. Die betrachteten Systemgrenzen müssen gegebenenfalls erweiterbar sein, sodass alle für die NH_3 -Emissionen wesentlichen Verfahren und ihre Kosten berücksichtigt werden.
- Transparenz: Einheitspreise, berücksichtigte Verfahrenskomponenten und Rechenwege müssen explizit sein.
- Vergleichbarkeit: Randannahmen, Einheiten, Bezugsgrößen und Algorithmen müssen vereinheitlicht werden, soweit die übrigen Forderungen dies zulassen.

3.2 Anwendungsbereich, Vorgehen und Systemgrenzen

Im Bereich der landwirtschaftlichen Tierhaltung werden bei der Ermittlung von Ammoniak-Minderungskosten die folgenden Verfahren berücksichtigt: Fütterung, Haltung, Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger.

Zu jedem Verfahren gehören spezifische Minderungsmaßnahmen (Kapitel 2). Die Minderungskosten werden als Maßnahmekosten pro Minderung der NH_3 -Emission bestimmt (€/kg NH_3). Maßnahmekosten und Ammoniak-Emissionsminderung werden als Differenz zu den entsprechenden Werten des Verfahrens ohne Anwendung der Minderungsmaßnahme (Referenzsystem) bestimmt. Maßnahmekosten und Ammoniakminderung werden je nach Verfahren pro Tier (Fütterung), pro Tierplatz (Haltung) oder pro Volumen bzw. Gewicht der wirtschaftseigenen Dünger (Lagerung) angegeben (European Commission, 2003, S. 330, Tab.7.7).

Der Einfluss vorgeschalteter Verfahren auf die Minderungskosten des betrachteten Verfahrens kann über die Randannahmen integriert werden, zum Beispiel die je nach Fütterung anfallende $\text{NH}_4\text{-N}$ -Menge je Tierplatz bei der Berechnung der Minderungskosten von Maßnahmen zum Haltungsverfahren. Die Berechnungsmodelle sind so aufgebaut, dass Verfahrensketten abgebildet werden können. Dies bedeutet, dass die Höhe der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachten und ggf. die Volumina an Gülle, die aus einer Verfahrens- oder Maßnahmenkombination resultieren, als Eingangsgröße für das Folgeverfahren zur Verfügung stehen.

3.3 Kosten

Zur Bestimmung der Minderungskosten werden als Maßnahmekosten sämtliche Mehraufwendungen eines Betriebes, die mit einer Minderungsmaßnahme zusammenhängen, summiert. Da sich die Maßnahmekosten aus der Differenz der Verfahrenskosten ohne und mit der Anwendung der Maßnahme ergeben, müssen alle abweichenden Kostenpunkte auch für das Referenzsystem dargestellt werden. Wenn Verfahrensschritte neben der Ammoniakminderung weiteren Verfahrenszwecken dienen, müssen die Kosten anteilig den verschiedenen Zwecken zugerechnet werden (Allokation).

Den Mehraufwendungen können Kosteneinsparungen, die sich aus der Maßnahme ergeben, gegenüberstehen. Solche Minderkosten werden, soweit sie direkt durch die Maßnahme verursacht werden, gesondert ausgewiesen. Sie werden jedoch nur dann mit den Mehraufwendungen verrechnet, wenn sie ursächlich mit der Ammoniakminderung zusammenhängen.

Tabelle 2 listet die in Frage kommenden Kostenarten auf (UN/ECE, 2007, S.4, Tabelle 1; European Commission, 2003, S. 331, Tabelle 7.8).

Tabelle 2: Kostenkategorien bei der Berechnung der Maßnahmekosten auf Jahresbasis (€/a).

Kostenart	Beispiele; Anmerkungen
A) Fixkosten	
Investitionen: Zeitabhängige Abschreibung	z. B. Chargenmischer für Futteranmischung, frei belüfteter Stall, Anlage zur Abluftreinigung, Zeltdach für Güllelager, Güllegrubber; Lineare Abschreibung des gebundenen Kapitals; Kapitalkosten (Lineare Abschreibung plus Zinsen) können alternativ als regelmäßige Annuität berechnet werden.
Zinskosten	linear und konstant
Versicherung	anteilig bezogen auf die Investition
Wartung, Gebäude-Instandhaltung und -reparatur	anteilig bezogen auf die Investition
B) Variable Kosten	
Investitionen: Leistungsabhängige Abschreibung	Anwendung bei Maschinen, deren Wertminderung bei hoher Jahresleistung überwiegend durch Verschleiß bewirkt wird (z.B. Gülleausbringungsgerät eines Lohnunternehmers), oder bei denen der Einsatz für die Minderungsmaßnahme nur einen geringen Anteil der Jahresleistung ausmacht (z.B. Traktor)
Reparaturen	nur bei Maschinen und Anlagen; Gebäudereparatur zählt zu den Fixkosten; in der Regel anteilig bezogen auf die Investition
Arbeitskosten	Änderungen durch gestiegenen/verminderten Arbeitskraftbedarf (z.B. zusätzlicher Fahrer bei der absetzigen Gülleausbringung)
Betriebsstoffe und -mittel, Futtermittel	z.B. Kraft- und Schmierstoffe für Maschinen; Mastfutter
C) Sonstige	
Indirekte Folgekosten	z.B.: verringerte Verdunstung aus Güllelagern mit schwimmenden Abdeckungen erhöht das auszubringende Volumen
Indirekte Kostenersparnis	z.B.: NH ₃ -Emissionsminderung erhöht den N-Gehalt wirtschaftseigener Dünger und verringert somit die Mineraldüngerkosten

3.4 Ammoniak-Emissionsminderung

Die Minderung von Ammoniakemissionen wird als Differenz der Emission des Verfahrens ohne Minderungsmaßnahme (Referenzsystem) und des Verfahrens mit verringerter Emission bestimmt. Für die Emission des Referenzsystems werden Emissionsfaktoren aus der Nationalen Emissions-Berichterstattung verwendet (HAENEL et al., 2010) oder aus der Literatur abgeleitet. Soweit möglich werden nicht absolute, sondern relative Emissionsfaktoren verwendet, die auf den Gehalt an NH₄-N und/oder die emittierende Oberfläche bezogen sind (Tabelle 3). Bei Verwendung relativer Emissionsfaktoren können Änderungen der Bezugsgrößen (z. B. N-Fluss, Oberfläche) in den Berechnungen abgebildet werden.

Die Minderung der Emissionen durch eine Maßnahme wird anteilig oder durch einen eigenen Emissionsfaktor bezogen auf die Referenzemission angegeben.

Tabelle 3: NH₃-Emissionsfaktoren für Referenzverfahren

Emissionsfaktor	Einheit	Anwendungsbereich	Quelle; Bemerkungen
3	kg NH ₃ -N/(TP • a)	Schweinemast, zwangsbelüfteter Stall mit Vollspaltenboden	DÖHLER et al., 2002; EURICH-MENDEN et al., 2011
16	g NH ₃ -N/(m ² • a)	Schweinegülle im offenen Lager ohne natürliche Schwimmdecke	entspricht 15 % des NH ₄ -N (Emissionsinventar, Haenel et al., 2010) für einen Rundbehälter von 1000 m ³ .
3,3	g NH ₃ -N/(m ² • a)	Rindergülle im offenen Lager mit natürlicher Schwimmdecke	entspricht 15 % des NH ₄ -N (Emissionsinventar, Haenel, 2010) für einen Rundbehälter von 1000 m ³ , inkl. 70 % Minderung durch natürliche Schwimmdecke und zweimaligem Aufrühren je Jahr
25	% des NH ₄ -N	Schweinegülle, breitwürfige Ausbringung	Frühjahr, 15 °C, (DÖHLER et al., 2002)
50	% des NH ₄ -N	Rindergülle, breitwürfige Ausbringung	Frühjahr, 15 °C, (DÖHLER et al., 2002)
11,5	% des Harnstoff-N	Harnstoffdüngung, Ackerland	HAENEL et al., 2010

4 Minderungskosten: Fütterung

Die wirksamste Minderungsmaßnahme für Ammoniak im Bereich der Mastschweinehaltung ist eine reduzierte Stickstoffaufnahme über das Futter, da sowohl die Gesamtstickstoffausscheidungen als auch die Ammoniakemissionen damit deutlich herabgesetzt werden können. Dabei besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Rohproteingehalt im Futter und der Höhe der Stickstoffausscheidungen und der Ammoniakemissionen. Eine Reduzierung der Stickstoffaufnahme um einen Prozentpunkt senkt die Stickstoffausscheidung bei Mastschweinen um 10 % und die Ammoniakemissionen sinken um 10 bis 13 % (AARNINK et al., 2003; CANH et al., 1998). In der Phasenfütterung kann durch verschiedene Futterrationen mit bedarfsgerechten Rohproteingehalt und Aminosäurezusammensetzung (N-angepasste Phasenfütterung) eine reduzierte Stickstoffaufnahme erreicht werden. Da bei einer proteinreduzierten Fütterung limitierende Aminosäuren nicht in bedarfsgerechter Menge im Futterprotein enthalten sind, müssen diese ergänzend, in der Regel über das Mineralfutter, zugeführt werden.

Die Verfahren in der Fütterung können sich in der Praxis stark voneinander unterscheiden. Die entwickelte Berechnungsmethodik wird hier auf eine Auswahl von Verfahren angewandt, die nicht den Anspruch hat, für die deutschen Verhältnisse repräsentativ zu sein. Hierzu bedarf es weiterer Berechnungen mit variierten Annahmen, sowie eine Verifizierung von Annahmen und Ergebnissen durch Erhebungen in der Praxis.

Laut UNECE Guidance Document wird das Referenzsystem für die Fütterung häufig nicht klar dokumentiert und es gibt große Variationen zwischen den Ländern. Abhängig von der Höhe des Rohproteingehalts der Referenz ist laut Guidance Document jedoch eine Reduzierung des Rohproteingehalts um 2 bis 3 % möglich. Um eine Unterversorgung mit essentiellen Aminosäuren und damit Leistungseinbußen (Wachstum, Fleischqualität und -beschaffenheit) am Anfang der Mast zu verhindern, sind jedoch höhere Aminosäurezulagen notwendig. Für die Berechnungen der Minderungskosten wurden daher zwei Referenzen zum Vergleich herangezogen:

- **Referenz 1:** Einphasenfütterung mit konventionellem Futtermittel (19 % Rohproteingehalt)
- **Referenz 2:** Einphasenfütterung mit N-angepasstem Futtermittel (17,5 % Rohproteingehalt, hohe Aminosäurezulagen)

Die Einphasenmast verliert in Deutschland immer mehr an Bedeutung, während die Zwei- oder Dreiphasenmast mittlerweile Stand der Technik bei Neubauten ist und immer größere Verbreitung findet (R. WINTERSPERGER, AELF Coburg; M. WEGENAST, Beratungsdienst Schweinehaltung und Schweinezucht e.V., Sigmaringen/Boxberg, mündliche Mitteilungen 2011). Für die Berechnungen der Minderungskosten für Ammoniakemissionen wurden insgesamt drei Verfahren berücksichtigt:

- **Zweiphasen**fütterung mit einer Anpassung des Rohproteingehalts von 17,5 % (Anfangsmast) auf 15 % (Endmast) ab 70 kg Lebendgewicht, hohe Aminosäurezulagen
- **Dreiphasen**fütterung mit einer Anpassung des Rohproteingehalts von 17,5 % (Anfangsmast 30-50 kg Lebendgewicht) auf 16 % (Mittelmast 50-90 kg Lebendgewicht) und 15 % (Endmast 90 kg Lebendgewicht bis Mastende), alle hohe Aminosäurezulagen
- **Multiphasen**fütterung mit hohen Aminosäurezulagen (Anpassung des Rohproteingehalts von 17,5 % auf 14 % in 10-kg-Schritten).

Die Annahmen zur Zweiphasenfütterung entsprechen den Fütterungsempfehlungen in Bayern und decken sich ungefähr mit den Rohproteingehalten im RAM Futter, das in Niedersachsen eingesetzt wird.

Die zugrunde gelegten Futtermischungen basieren in unterschiedlichen Anteilen auf Weizen und Gerste, als Eiweißträger wurde HP-Sojaextraktionsschrot und als Staubbinder 1 % Sojaöl angenommen. Die Aminosäurezulagen erfolgen über die Mineralfutter, bei den Berechnungen wurde für die konventionelle Einphasenmast ein Mineralfutter mit 6 % Lysin und 1,5 % Methionin und für alle weiteren Fütterungsvarianten ein Mineralfutter mit 10 % Lysin, 1,5 % Methionin und 2 % Threonin zugrunde gelegt. Mineralfutter ohne Aminosäurezulagen wird in Deutschland nicht mehr handelsüblich vertrieben.

Die Berechnungen wurden exemplarisch für unterschiedliche Stallgrößen (517, 960 und 1920 Tierplätze) nach dem KTBL-Standard BAUKOST Version 2.7 (2010) durchgeführt. Es wurden zwangsgelüftete Ställe mit voll perforierten Böden angenommen, die Emissionen aus dieser Haltungsform werden mit 0,3 kg $\text{NH}_3\text{-N}$ je kg N, also 30 %, angegeben (HAENEL et al., 2010). Die Ermittlung des Wachstumsverlaufs, des Energie- und Rohproteinbedarfs erfolgte beispielhaft für Tiere mit mittleren Leistungsniveau (800 g Tageszunahmen) nach Algorithmen der Gesellschaft für Ernährungswissenschaften (GfE, 2006). Es wurde ein Stickstoffflussmodell entwickelt, mit dem basierend auf Rohproteininput, Rohproteinretention und Rohproteinausscheidungen der Stickstoffinput, die Retention von Stickstoff und die Gesamtausscheidungen an Stickstoff sowie die Stickstoffausscheidungen im Harn und Kot berechnet wurden.

Der Mastbeginn wurde mit 30 kg Lebendmasse angenommen. Bei durchschnittlich 800 g Tageszunahmen ist das Mastende mit 118 kg Lebendmasse nach einer durchschnittlichen Mastdauer von 112 Tagen erreicht; es wurde von 2,5 Mastdurchgängen je Jahr ausgegangen.

4.1 Technische Beschreibung der Verfahren

Exemplarisch für die Vielfalt der möglichen Futtertechniken wird hier eine Auswahl an Verfahren dargestellt, auf die das Berechnungsmodell angewendet wurde.

Fütterungsanlagen für Trockenfutter bestehen aus Futtersilo, Mischstation (nur Multiphasenfütterung), Futterleitung, Futterautomat und Fütterungscomputer. Das Futtermittel wird entweder direkt unter dem Futtersilo in den Futterannahmetrichter gefüllt oder über Zufuhrschnecken zum Annahmetrichter transportiert. Die Steuerung erfolgt über Handschaltung oder per Zeitschaltuhr. Über die Futterleitung läuft die Futtermischung mithilfe von Kettenförderern zu den Einlassventilen im Stall und in die Futterautomaten (Rohrbreiautomaten).

Einphasenfütterung (Referenzen)

Bei der Einphasenfütterung wird nur ein Futtermittel über die gesamte Mastdauer eingesetzt. Beim Start der Anlage beginnt die Antriebsstation mit dem Ziehen der Förderkette in der Futterleitung. Gleichzeitig

wird über eine Spirale das Futtermittel aus dem Silo und dem Aufnahmetrichter in die Futterleitung gefördert und in den Stall transportiert. Am Futterautomaten wird das Futter ausdosiert. Sobald der letzte Futterautomat gefüllt wurde, wird die Förderkette über einen Endabschalter gestoppt und das Restfutter verbleibt bis zur nächsten Fütterung in der Futterleitung (Abbildung 1). Arbeitstechnisch bringt dieses Verfahren Vorteile, ist aber gleichzeitig mit Hinblick auf Futterkosten und Bedarfsabdeckung nicht optimal.

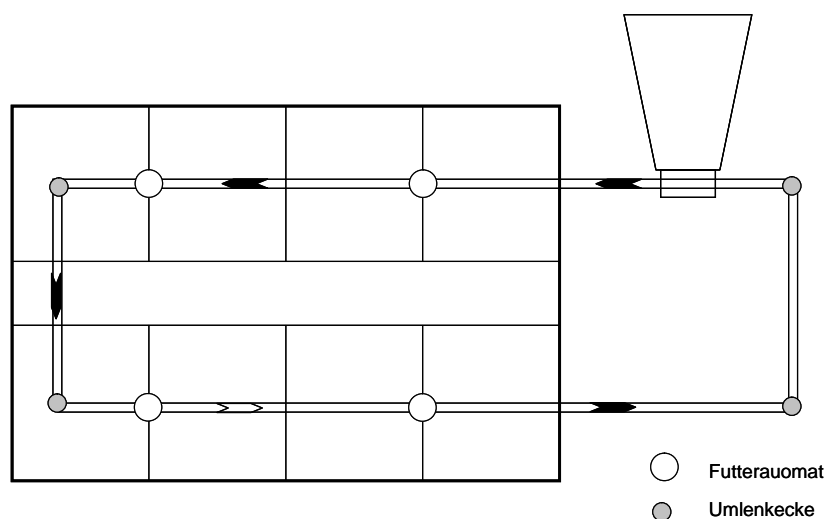


Abbildung 1: Schema des Futtertransports bei der Einphasenfütterung

Mehr- und Multiphasenfütterung

Eine bedarfsgerechte Fütterung der Mastschweine in verschiedenen Gewichtsabschnitten ist durch eine Mehr- bzw. Multiphasenfütterung möglich. Es erfolgt eine Unterteilung der Mast in verschiedene Mastabschnitte (Phasen), in denen an den jeweiligen Bedarf der Tiere angepasste Futtermischungen eingesetzt werden. Durch unterschiedliche Futtermischungen sind zusätzliche Futtersilos zur Lagerung notwendig.

Bei der Mehrphasenfütterung wird zwischen zwei Anlagenvarianten unterschieden. Bei einfacher aufgebauten Anlagen werden mehrere Futtermischungen nacheinander mit Hilfe eines motorgetriebenen Einlauftrichters in einen einzigen Kreislauf ausgetragen. Das Futter wird über elektrisch gesteuerte Übergabeventile in die Futterleitung gegeben, die das entsprechende Abteil versorgt. Ist der letzte Futterautomat gefüllt, wird das restliche Futter aus der Futterleitung zurück in das entsprechende Futtersilo transportiert, bevor die nächste Futtermischung in den Kreislauf gegeben wird. Auf diese Weise werden die Mastschweine abteilweise mit einem optimierten Futtermittel versorgt (Abbildung 2). Etwas aufwändiger ist die Phasenfütterung über zwei oder drei getrennte Kreisläufe, mit dem ein Verschleppen von Rückständen (z.B. Antibiotika) vermieden wird. Da diese Form der Phasenfütterung in Deutschland weitaus stärker verbreitet ist als die Phasenfütterung über denselben Futterkreislauf (SCHULTE-SUTRUM, 2010), wurde mit dieser Variante gerechnet.

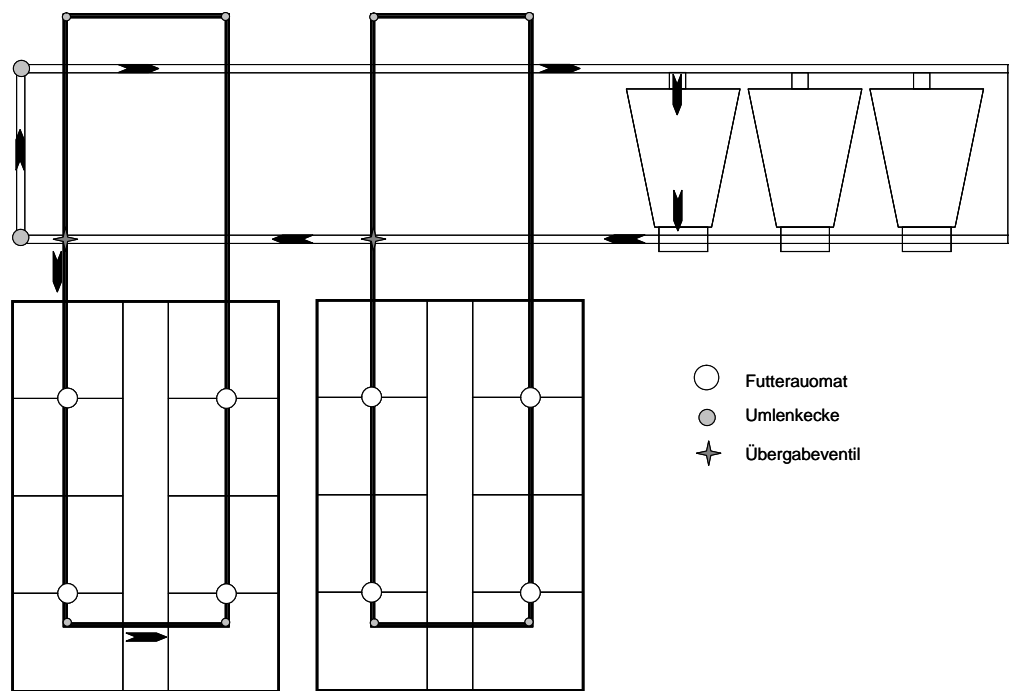


Abbildung 2: Schema des Futtertransportes bei der Mehrphasenfütterung

Unter Multiphasenfütterung versteht man eine Fütterung, mit der es im Prinzip möglich ist, sehr viele verschiedene Futtermischungen zusammenzustellen und jeweils an einem einzigen Futterautomaten zu verabreichen. Bei der Multiphasenfütterung werden die in den Silos gelagerten Einzelkomponenten oder Futtermischungen über Zufuhrschnecken in vorprogrammierten Mengenverhältnissen in einen Mischbehälter transportiert und für jeweils einen Futterautomaten gemischt. Für jedes Silo muss eine Zufuhrschnecke vorhanden sein. Der Mischvorgang ist computergesteuert. Nach dem Mischvorgang wird das Futter über eine Spirale vom Einlauftrichter zur Futterleitung und dort mit Hilfe einer Förderkette zu den Futterautomaten befördert. Die Dosierung der Futtermischung in den Futterautomaten erfolgt ebenfalls computergesteuert über automatische Ventile. Der Füllstand der Futterautomaten kann über einen Sensor ermittelt werden. Noch während des Transports einer Futtermischung zum Futterautomaten wird der nächste Mischvorgang im Mischbehälter gestartet. Nach dem Befüllen des letzten Futterautomaten schaltet sich die Fütterungsanlage automatisch über einen Endabschalter ab (Abbildung 3).

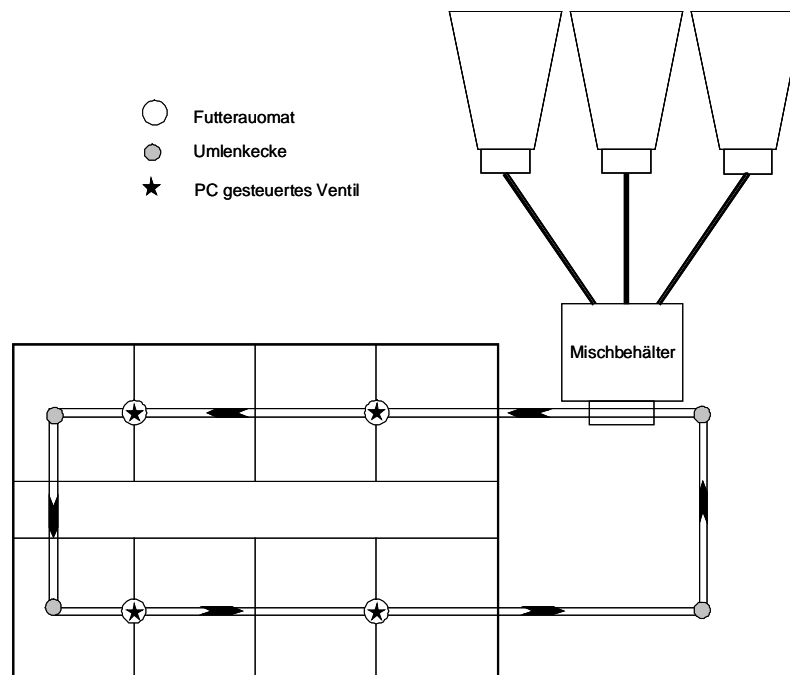


Abbildung 3: Schema der Futtermischung und des Transportes bei der Multiphasenfütterung

4.2 Stickstoffausscheidungen und Emissionsfaktoren

Die Höhe der Stickstoffausscheidungen hängt neben der durchschnittlichen Wachstumsleistung der Mastschweine von der Höhe der Rohproteinaufnahme und der Verdaulichkeit des Rohproteins ab. Den Berechnungen liegen einheitliche Wachstumsleistungen zugrunde. Unterschiede in der Höhe der Stickstoffausscheidungen resultieren somit allein aus einer veränderten Höhe der Rohproteinaufnahme und Verdaulichkeit des Rohproteins. Die Verdaulichkeit des Rohproteins variiert je nach Futterzusammensetzung zwischen 82 und 86 % und ist prinzipiell höher für Futter mit einem hohen Anteil an Sojaextraktionsschrot.

Die berechneten Stickstoffausscheidungen bei der konventionellen Einphasenmast liegen bei 12,8 kg N pro Tierplatz und Jahr (TP • a) (Tabelle 4). Das entspricht ca. 5,1 kg N pro Tier und Mastdurchgang. Die relativen N-Ausscheidungen pro Tier entsprechen mit 65 % ungefähr dem Wert nach EUROPEAN COMMISSION (2003). Eine Reduzierung des Rohproteingehalts im Futter um 1,5 Prozentpunkte über die gesamte Mastdauer resultiert in einer Reduzierung der Stickstoffausscheidungen in Höhe von 12 %. Die deutlichste Verringerung bei den Stickstoffausscheidungen bringt bereits eine Unterteilung der Mast in zwei Abschnitte, während die Dreiphasenmast verglichen mit der Zweiphasenmast kaum einen weiteren Effekt auf die Ausscheidungen und Verluste hat. Dies ist damit zu erklären, dass der angenommene Rohproteingehalt in der Anfangs- und Endmast bei der 2- und 3-Phasenfütterung gleich hoch war. So liegen die Ausscheidungen bei der Zweiphasenmast bei nur noch 9,6 kg N/(TP • a) und bei der Dreiphasenmast bei 9,5 kg N/(TP • a). Den höchsten Einspareffekt bei den betrachteten Fütterungsvarianten hat eine Multiphasenfütterung. Durch eine Reduzierung des Rohproteinanteils auf 14 % und die feinere Abstufung zwischen den einzelnen Phasen werden die N-Ausscheidungen um 30 Prozent gegenüber Referenz 1 bzw. 20 % gegenüber Referenz 2 auf 9 kg N/(TP • a) reduziert. Die Ammoniakverluste werden um 35 bzw. 26 % verringert (Tabelle 4). Die relative Emissionsminderung bei der Phasenfütterung ist höher als die relative Minderung der Stickstoffausscheidungen. Grund dafür ist eine Reduzierung des Harnstickstoffanteils an der Gesamtstickstoffausscheidung, der 79 % bei der konventionellen Einphasenfütterung bzw. 73 % bei der Zwei- und Dreiphasenmast und 72 % bei der Multiphasenmast beträgt.

Tabelle 4: Berechnete N-Ausscheidungen und NH₃-Emissionsfaktoren für unterschiedliche Fütterungsvarianten

			Konven- tionell	N-angepasst, hohe Aminosäurezulagen			
Einheit			Einphasen- mast	Einphasen- mast	Zweipha- senmast	Dreipha- senmast	Multi- phasen
Stickstoffaus- scheidung		kg N/(TP • a)	12,8	11,2	9,6	9,5	9,0
Minderung der N-Ausscheidung	Ref. 1	%	-	12	25	26	30
	Ref. 2			14	15	20	
Emissionsfaktor		kg NH ₃ /(TP • a)	3,69	3,24	2,55	2,53	2,39
Emissions- minderung	Ref. 1	%	-	12	31	31	35
	Ref. 2			21	22	26	

4.3 Kosten der Fütterung und Emissionsminderung

Die berechneten jährlichen Kosten der Fütterungsvarianten liegen zwischen 109,22 € (Multiphasenfütterung, 1920 Tierplätze) und 122,35 € (konventionelle Einphasenfütterung, 517 Tierplätze; Tabelle 5). Mit zunehmender Tierplatzzahl sinken die jährlichen Gesamtkosten. Dies ist auf die Kostendegression in den Fixkosten bei zunehmender Tierplatzzahl zurückzuführen, die bei der Multiphasenfütterung am deutlichsten ist. Bei der Multiphasenfütterung werden auch die höchsten Einsparungen an variablen Kosten realisiert: Die Futterkosten sinken stark, da teures Sojaextraktionsschrot insbesondere in der Mitte und am Ende der Mast eingespart wird, wenn am meisten Futter verbraucht wird. Durch die Reduzierung des Rohproteingehalts sinkt außerdem der Wasserbedarf der Tiere. Bei den variablen Kosten wurden nur Futterkosten und Kosten für Tränkwasser berücksichtigt.

Tabelle 5: Kosten der Fütterungsvarianten, in €/ (TP • a)

	Konventionell		N-angepasst, hohe Aminosäurezulagen			
	Tierplätze	Einphasenmast	Einphasenmast	Zweiphasenmast	Dreiphasenmast	Multiphasenmast
Jahreskosten	517	122,35	120,79	111,64	113,07	112,05
	960	121,62	120,06	110,63	111,80	109,91
	1 920	121,41	119,85	110,49	111,62	109,22
Variable Kosten	517					
	960	118,05	116,49	105,73	105,29	102,46
	1 920					
Fixkosten	517	4,30	4,30	5,91	7,77	9,59
	960	3,57	3,57	4,91	6,51	7,46
	1 920	3,35	3,35	4,77	6,33	6,76

Da in den hier berechneten Anwendungsbeispielen die Einsparungen in den variablen Kosten größer als die höheren Fixkosten der Maßnahmen sind, weisen alle Fütterungsvarianten im Vergleich zu den Referenzen negative Minderungskosten auf (Tabelle 6). Ob dies in der Praxis so der Regelfall ist, kann mit jetzigem Kenntnisstand nicht festgestellt werden. Hierfür ist eine Verifizierung von Annahmen und Ergebnissen durch Erhebungen in der Praxis notwendig.

Bereits eine N-angepasste Einphasenfütterung führt zu deutlichen Einsparungen. Am interessantesten, besonders für kleinere Betriebe ist die Zweiphasenfütterung mit einer Reduzierung des Rohproteingehalts um 15 (Anfangsmast) und 40 % (Endmast). Es sind hohe Einsparungen bei den Stickstoffausscheidungen und Ammoniakverlusten zu realisieren. Gleichzeitig wird aber der technische und organisatorische Aufwand sowie die Kosten für die Maßnahme – abhängig vom Umsetzungskonzept – für den Betrieb überschaubar. Aus den Kosteneinsparungen durch die Maßnahmen und der gleichzeitig erzielten Minderung der NH_3 -Emissionen ergeben sich negative Minderungskosten. Die Minderungskosten belaufen sich für diese Fütterungsvariante auf -9,42 bis -9,66 € je kg NH_3 (Vergleich mit konventioneller Einphasenfütterung) bzw. -13,15 bis -13,55 € je kg NH_3 (Vergleich mit N-angepasster Einphasenfütterung). Die höheren negativen Minderungskosten im Vergleich zur N-angepassten Fütterung als Referenz ergeben sich hierbei allein rechnerisch aus der deutlich geringeren Minderung der Emissionen im Vergleich zu dieser Referenz. Sie sind kein Kriterium der Vorzüglichkeit.

Für größere Mastanlagen mit hohen Tierkapazitäten ist aufgrund der Kostendegression und aufgrund der höheren Automatisierung und Genauigkeit der Fütterung eine Multiphasenfütterung geeignet. Die Minderungskosten liegen für einen Stall mit 1920 Tierplätzen für die Multiphasenfütterung bei -9,41 € je kg NH_3 (Vergleich zu Referenz 1) bzw. -12,46 € je kg NH_3 (Vergleich zu Referenz 2).

Tabelle 6: Emissionsminderungskosten der Fütterungsvarianten, in €/kg NH_3

	N-angepasst, hohe Aminosäurezulagen				
	Tierplätze	Einphasen- mast	Zweiphasen- mast	Dreiphasen- mast	Multipha- senmast
Emissionsminderungs- kosten, Vergleich zu Referenz 1	517		-9,42	-8,05	-7,96
	960	-3,53	-9,66	-8,51	-9,04
	1 920		-9,60	-8,48	-9,41
Emissionsminderungs- kosten, Vergleich zu Referenz 2	517	-	-13,15	-10,85	-10,25
	960	-	-13,55	-11,60	-11,89
	1 920	-	-13,45	-11,56	-12,46

5 Minderungskosten: Haltung

Außenklimaställe für Schweine haben ihren Platz in der Praxis gefunden. Steigende Anforderungen an eine artgerechten Haltung durch die Tierschutzgesetzgebung könnten die Position des Außenklimastalls in Zukunft noch weiter stärken. In ihrer Emissionswirkung werden Außenklimaställe gegenüber geschlossenen, zwangsgelüfteten Ställen als emissionsärmer eingestuft. Als Emissionsfaktoren werden bei Mastschweinen für wärme gedämmte Ställe mit Vollspaltenboden jährlich 3 kg N je Tierplatz (TP) und Jahr angegeben, entsprechend 3,6 kg NH_3 /(TP • a). Für Außenklimaställe beträgt der Faktor 2 kg N/(TP • a), ent-

sprechend 2,4 kg NH₃/(TP • a) (DÖHLER et al., 2002, EURICH-MENDEN et al., 2011). Die Höhe der tatsächlichen NH₃-Emissionen aus Ställen ist mit größeren Unsicherheiten behaftet. Die Größenordnung der Emissionen und die geringeren Verluste aus Außenklimaställen sind aber in der Literatur gut belegt (HAEUSSERMANN, 2006).

Die Emissionsminderungskosten eines Außenklimastalls gegenüber einem zwangsgelüfteten Stall wurden beispielhaft für Mastschweine mit 960 Tierplätzen berechnet.

5.1 Technische Beschreibung der Verfahren

Zwangsgelüfteter Stall (Referenz)

Als Referenz dient ein geschlossener, wärmegeämmter und zwangsgelüfteter Stall mit vollperforierten Buchten. Die Entmistung erfolgt über Flüssigmistverfahren. Die Tiere werden in Großgruppen von 40 Tieren gehalten.

Außenklimastall

Das Gebäude ist offen mit wärmegeämmter Decke nach dem Prinzip des sogenannten Nürtinger Systems. Es ist gekennzeichnet durch separate Funktionsbereiche mit plan befestigtem Liegebereich in wärmegeämmter Ruhekiste und perforiertem Laufbereich. Die Entmistung erfolgt im Flüssigmistverfahren. Die Tiere werden in Großgruppen von 60 Tieren je Bucht gehalten.

5.2 Kosten der Haltung und der Emissionsminderung

Die Schweinemast im Außenklimastall ist mit höheren Investitionen und somit höheren Fixkosten verbunden (Tabelle 7). Zudem ist der Arbeitszeitbedarf höher, beispielsweise für die Reinigung der Ruhekisten. Die damit verbundenen variablen Kosten werden aber durch die Einsparung von Energiekosten im ungeheizten Außenklimastall kompensiert, so dass diese sich für die beiden Verfahren nicht signifikant unterscheiden. In der Summe ergeben sich NH₃-Minderungskosten von 9,18 €/kg NH₃.

Hauptmotivation für die Errichtung eines Außenklimastalls ist in der Regel die artgerechte Unterbringung und die Sicherung eines guten Gesundheitsstatus. Die Emissionsminderung ist dann ein Nebeneffekt. Daher ist eine Allokation der anfallenden Kosten auf diese Zielgrößen sinnvoll. Der betrachtete Stall bietet pro Tier 0,92 m² Platz, gegenüber 0,75 m² im geschlossenen Referenzsystem. In diesem Fall wird ein geringerer Teil der Mehrkosten (hier 20 %) der Emissionsminderung zugeordnet. Dies führt zu Minderungskosten von 1,84 €/kg NH₃.

Tabelle 7: Verfahrens- und Emissionsminderungskosten

	Einheit	Referenz: Geschlossener Stall	Außenklimastall
Tierplätze	TP	960	960
Fixkosten	€/ (TP • a)	29	40
Variable Kosten	€/ (TP • a)	23	23
Maßnahmenkosten	€/ (TP • a)	-	11
N-Gutschrift ¹⁾	€/ (TP • a)	-	0,57
Emissionsfaktor	kg NH ₃ -N/(TP • a)	3	2
Emissionsminderungskosten	€/kg NH ₃	-	9,18
Emissionsminderungskosten, mit Allokation ²⁾	€/kg NH ₃	-	1,84

¹⁾ Spätere Verluste bei der Gülleausbringung eingerechnet. Die Gutschrift ist bei den Minderungskosten nicht berücksichtigt.

²⁾ Allokation: für die Emissionsminderung wurden 20 % der Mehrkosten angerechnet.

5.3 Sensitivitäten der Berechnung

Neben der oben dargestellten Allokation der Kosten, werden die unter 5.2 genannten Minderungskosten auch durch die Anrechnung des Stickstoffwertes und die Berücksichtigung von NH₃-Verlusten in den nachfolgenden Verfahren beeinflusst.

- Die Berücksichtigung des Wertes des konservierten Stickstoff senkt die Kosten um 5 %
- Die Annahme von NH₃-Verlusten in der nachfolgenden Lagerung von 15 % und der Ausbringung von 25 % führt zu einem Verlust von 36 % des in der Haltung eingesparten NH₃. Die Minderungskosten erhöhen sich hierdurch um 56 %.

6 Minderungskosten: Abluftreinigung

Die Abluftreinigung ist grundsätzlich nur bei Ställen mit Zwangslüftung einsetzbar, da die Abluft aus den Ställen gesammelt und mit Ventilatoren durch die Reinigungsanlage geleitet werden muss. Sie gehört aufgrund der hohen Kosten nicht zum Stand der Technik der emissionsarmen Intensivtierhaltung (sog. „Beste verfügbare Technik“ - BVT). In viehstarken Gebieten, die eine starke Immissionsvorbelastung aufweisen, stellen Abluftreinigungsanlagen oft die einzige Möglichkeit dar, um die Produktion auszuweiten und vorhandene Betriebsstandorte weiterzuentwickeln.

In den vorliegenden Berechnungen der Minderungskosten werden folgende Verfahren zur Abluftreinigung berücksichtigt:

- Keine Abluftreinigung (Referenz)
- Rieselbettreaktor (Bio-Wäscher)
- Mehrstufige Abluftreinigung (2- und 3-stufige Anlagen)

6.1 Technische Beschreibung der Verfahren

Entlüftung ohne Abluftreinigung (Referenz)

Als Referenzverfahren wird ein Stall mit zentraler Abluftführung ohne weitere Behandlung der Abluft angenommen. Soll eine Abluftreinigung an Ställen mit dezentraler Entlüftung installiert werden (separates Abluftsystem in jedem Abteil), sind die Minderungskosten durch den zusätzlichen Umbauebedarf höher.

Rieselbettreaktoren (Bio-Wäscher)

Bei Rieselbettreaktoren (Bio-Wäscher) wird die Abluft durch eine Packung aus Kunststofffüllkörpern geleitet, die im Gegenstrom kontinuierlich mit Wasser besprüht werden (Abbildung 4). Während der Passage durch die befeuchteten Füllkörper löst sich Ammoniak im Wasser und durch die Mikroorganismen auf den Füllkörpern werden die im Wasser gelösten Geruchsstoffe und Staub abgebaut. Durch Rieselbettreaktoren lassen sich mindestens 70 % des gasförmigen Ammoniak eliminieren.

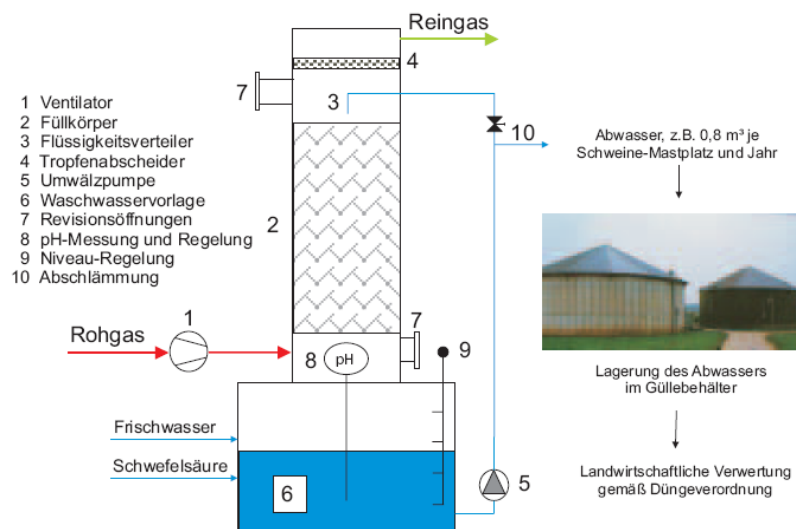


Abbildung 4: Prinzip eines Rieselbettreaktors (KTBL, 2007)

Mehrstufige Abluftreinigungsanlagen

Bis zu 90 Prozent der Emissionen lassen sich durch kombinierte Verfahren (zwei- oder dreistufig) zurückhalten. Zweistufige Abluftreinigungsanlagen bestehen aus einer chemischen Wäsche und einer nachgeordneten Wasserstufe (Chemo- und Wasserwäscher, Abbildung 5).

Wie beim Rieselbettreaktor werden im Chemowäscher Ammoniak und Staub an befeuchteten Füllkörpern in Wasser gelöst, dessen pH-Wert mit Schwefelsäure auf < 5 eingestellt wird. Danach gelangt die Abluft in die Wasserstufe, wo der Geruch gemindert wird. Bei dreistufigen Abluftreinigungsanlagen ist die Anordnung des Chemo- und Wasserwäschers umgekehrt und ein Biofilter als dritte Stufe nachgeschaltet (Abbildung 6). Zuerst durchdringt die Abluft den Wasserwäscher, wo Staub abgeschieden wird. Danach wird Ammoniak im Chemowäscher abgeschieden und zuletzt werden Restgerüche im Biofilter abgebaut.

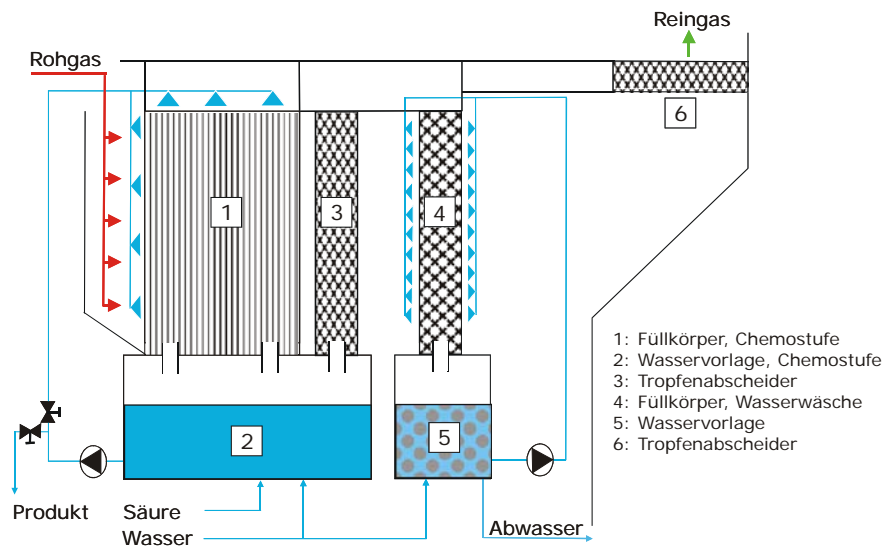


Abbildung 5: Prinzip einer zweistufigen Abluftreinigungsanlage (KTBL, 2007)

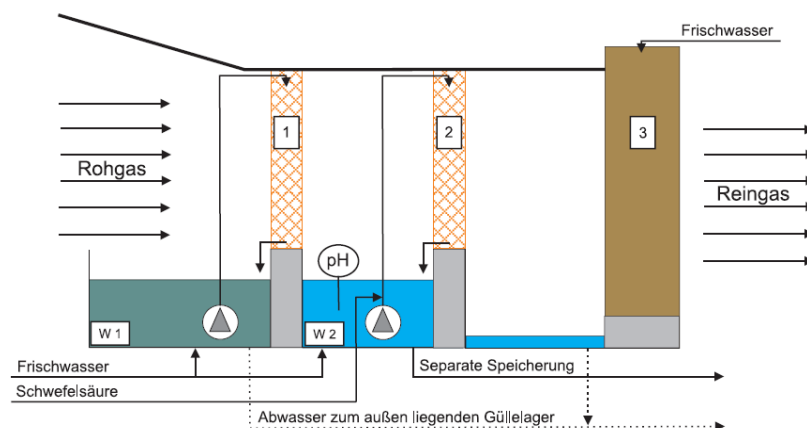


Abbildung 6: Prinzip einer dreistufigen Abluftreinigungsanlage (KTBL, 2007)

6.2 Kosten der Abluftreinigung und der Emissionsminderung

Abhängig vom Verfahren der Abluftreinigung machen die Fixkosten bei 10-jähriger Abschreibung der Investitionen etwa die Hälfte der Jahreskosten aus (43-52 %). Ein weiteres Viertel wird durch den erhöhten Energiebedarf verursacht (25-32 %). Die Kosten für zusätzlichen Arbeitsbedarf sind demgegenüber untergeordnet (2-9 %).

Für 3 Stallgrößen sind die Jahreskosten sowie die Minderungskosten der Verfahren dargestellt (Tabelle 8). Die Unterschiede der Jahres- und Minderungskosten zwischen den Verfahren sind weniger ausgeprägt als die Kostendegression mit steigender Zahl angeschlossener Tierplätze. Am kosteneffektivsten ist die dreistufige Abluftreinigungsanlage mit Minderungskosten von 4,58 €/kg NH_3 bei 2000 Tierplätzen.

Der im Waschwasser oder der Säurewäsche gebundene Stickstoff wird gemeinsam mit der Gülle ausgebracht. Hier geht ein Teil des konservierten NH_3 -Stickstoffs verloren. Dies wurde bei der Angabe des N-Wertes berücksichtigt, nicht aber bei den Minderungskosten.

Tabelle 8: Jahreskosten und Minderungskosten der Abluftreinigung

	Einheit	Tier- plätze	Einstufig Rieselbett- reaktor	Mehrstufig	
				Chemo- wäscher + Wasser- wäsche	Wasser- wäsche + Chemo- wäscher + Biofilter
Jahreskosten inkl. Gutschrift	€/TP • a)	500	22	28	23
		1 000	18	24	18
		2 000	16	21	15
Minderungs- potenzial	%		70	90	90
Minde- rungskosten	€/kg NH ₃	500	8,62	8,63	7,08
		1 000	7,18	7,32	5,47
		2 000	6,34	6,30	4,58

6.3 Sensitivitäten der Berechnung

Die Berücksichtigung des Stickstoffwertes und der NH₃-Verluste in den nachfolgenden Verfahren hätte folgende Einflüsse:

- Der Wert des in der Säure gebundenen Stickstoffs beträgt 1,20 €/TP•a) (einstufig) bzw. 1,82 €/TP•a) (mehrstufig). Die Anrechnung des N-Wertes kompensiert die in 6.2 dargestellten Kosten um 5 bis 12 %.
- Die Annahme von NH₃-Verlusten in der nachfolgenden Lagerung von 15 % und der Ausbringung von 25 % führt zu einem Verlust von 36 % des im Waschwasser gebundenen N, wenn dieses gemeinsam mit der Gülle ausgebracht wird. Die Minderungskosten erhöhen sich um 56 %.(siehe 5.3).

7 Minderungskosten: Güllelagerung

Bei den Berechnungen werden emissionsmindernde Abdeckungen für Rundbehälter und für Erdbecken berücksichtigt. Referenzsystem ist jeweils ein offenes, unabgedecktes Lager (Abbildung 7).

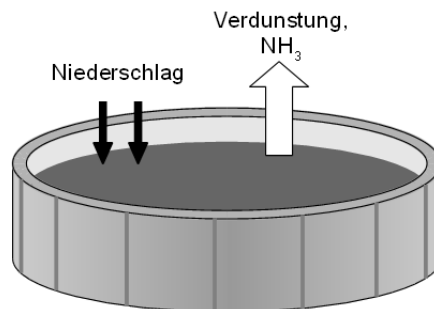


Abbildung 7: Offener Rundbehälter mit Eintrag von Niederschlag und hoher Verdunstungs- und Emissionsrate

Für die jährlichen NH_3 -Verluste der offenen Referenz-Lager wurde der im Nationalen Emissionsbericht (NIR) verwendete Emissionsfaktor von 15 % des $\text{NH}_4\text{-N}$ zugrunde gelegt (HAENEL et al., 2010). Um den Einfluss der Oberfläche auf die Emission abbilden zu können, wurde dieser Faktor unter der Annahme eines 1000 m^3 Rundlagers mit einer Oberfläche von 250 m^2 in flächenbezogene NH_3 -Quellstärken umgerechnet. Für Schweinegülle ergibt sich so eine Referenz-Emission von $16 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Bei der Rindergülle wurde darüber hinaus die mindernde Wirkung einer natürlichen Schwimmdecke berücksichtigt. Auch hier wurde die im NIR angegebene 70 %ige Minderung zugrunde gelegt, mit einem Abschlag für die Zeit ohne Schwimmdecke nach Homogenisierung und Ausbringung der Gülle. Folglich ergibt sich für die Rindergülle mit natürlicher Schwimmdecke eine Referenz-Emission von $3,3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Bezüglich der tatsächlichen NH_3 -Verluste bei der Güllelagerung bestehen weiterhin große Unsicherheiten. Die wenigen vorliegenden Messungen unter Praxisbedingungen zeigen eine große Schwankungsbreite der Emissionsraten. Sowohl die Größenordnung der hier angesetzten Werte als auch die Unterschiede zwischen Rinder- und Schweinegülle aufgrund der unterschiedlichen natürlichen Schwimmdecken entsprechen aber Literaturdaten (AMON UND FRÖHLICH, 2006; MÜLLER et al., 2006).

Berechnet wurden die Emissionsminderungskosten für Lagerkapazitäten von 500, 1 000, 3 000 und 5 000 m^3 (Rundbehälter) sowie für 7 500 m^3 (Erdlager) und die in Tabelle 9 aufgelisteten praxisrelevanten Abdeckungen.

Tabelle 9: Gülleabdeckungen

Variante	Rundbehälter	Erdlager
Referenz: offenes Lager	x	x
Betondecke	x	
Zeltdach	x	
Strohauflage	x	x
Leichtschüttungen	x	x
Schwimmkörper	x	
Schwimmfolie	x	x

7.1 Technische Beschreibung der Verfahren

Regenundurchlässige Abdeckungen

Feste, regenundurchlässige Abdeckungen (Zeltdach, Betondecke; Abbildung 8) bieten die besten Emissionsminderungen, erfordern aber auch die höchsten Investitionen. Feste Abdeckungen müssen eine Entlüftung des Lagers zulassen, um explosiven Konzentrationen von Gärgasen vorzubeugen.

Besonders dauerhaft und wartungsarm sind Abdeckungen des Güllesilos als Betondecke. Befahrbare Tiefbehälter erschließen zusätzliche Hofffläche. Die für die notwendige Tragfähigkeit zusätzlich entstehenden Kosten werden jedoch nicht den Minderungskosten zugerechnet.

Zeltdachkonstruktionen sind feste Abdeckungen mit einer Mittelstütze, die als Auflage und First dient. Auf der Mittelstütze ruht eine Zeltmembran, die mit Gurten über den Silorand abgespannt wird. Auch hier ist der Wartungsaufwand gering. Regenwasser wird wirksam vom Flüssigmist ferngehalten.

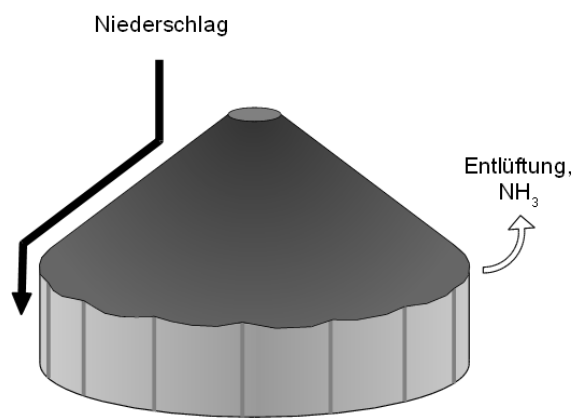


Abbildung 8: Rundbehälter mit fester Abdeckung, ohne Eintrag von Niederschlag und mit geringer Emissionsrate

Regendurchlässige, schwimmende Abdeckungen

Auf Rindergülle bildet sich anders als auf Schweinegülle in der Regel eine natürliche Schwimmdecke aus Einstreu und unverdauten Rohfasern des Futters. Um die emissionsmindernde Wirkung dieser Schwimmdecke zu verstärken oder überhaupt eine schwimmende Abdeckung zu erzeugen, werden natürliche Substrate wie Strohhäcksel, Leichtschüttungen wie Blähton und künstliche Schwimmkörper aus Kunststoff eingesetzt (Abbildung 9). Die Wirkung der Schwimmdecken hängt von deren Beschaffenheit und Dicke ab. Eine Strohhäckselauflage sollte mindestens 10 cm mächtig sein, eine Leichtschüttung (z. B. Blähton) 20 cm. Die Strohaufage wird beim Aufrühren eingemischt und bei der Gülleausbringung mit entfernt. Daher müssen Strohaufagen mehrmals jährlich teilweise oder ganz erneuert werden. Demgegenüber müssen bei Schwimmdecken aus Leichtschüttungen jedes Jahr nur geringe Verluste ersetzt werden.

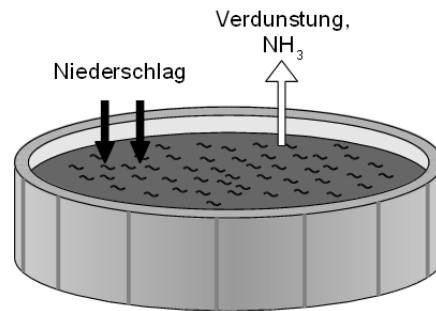


Abbildung 9: Rundbehälter mit schwimmender Abdeckung, mit Eintrag von Niederschlag und geringer Verdunstungs- und Emissionsrate

Schwimmkörper aus Kunststoff, wie das sechseckige Recyclingproduct Hexa-Cover, formieren sich auf der Gülleoberfläche zu einer geschlossenen Schwimmdecke. Sie werden bisher nur bei Schweinegülle ohne natürliche Schwimmdecke eingesetzt. Die einzelnen Rippen an den Körpern verhindern ein Übereinanderschieben der Elemente. Bei der Homogenisierung und dem Absaugen des Flüssigmistes ist besondere Sorgfalt erforderlich, um mögliche Verstopfungen oder Beschädigungen an den technischen Einrichtungen zu vermeiden.

Schwimmfolien aus Kunststoff sind entweder mit Schwimmelementen in Sandwich-Bauweise befüllt oder werden mit Schwimmern an der Oberfläche gehalten. Die Folien haben Wartungsöffnungen, die bei Bedarf, z. B. beim Homogenisieren, geöffnet werden können. Die Befüllung erfolgt unterhalb der Oberfläche.

7.2 Emissionsminderung und Düngerwert

Die Annahmen für die Emissionsreduzierung der Lagerabdeckungen entsprechen der Berechnungsgrundlage für den Nationalen Emissionsbericht (NIR, HAENEL et al., 2010). Bei der Homogenisierung und Ausbringung der Gülle werden Abdeckungen aus Stroh und Leichtschüttungen eingemischt. Hierdurch wird die emissionsmindernde Wirkung bis zur erneuten Bildung bzw. Wiederherstellung der Schwimmdecken reduziert. Dies wurde über einen Abschlag auf die in HAENEL et al., 2010 angegebenen Minderungen in Rechnung gestellt, der bei zweimaliger Gülleausbringung pro Jahr 4 % (Leichtschüttungen, Strohaufgabe) bzw. 1 % (Schwimmkörper) der in Tabelle 10 aufgelisteten Minderungen beträgt.

Demnach können Minderungen der Emissionen durch Lagerabdeckungen zwischen 75 und 90 % erwartet werden. Die Stickstoff-Gutschriften berücksichtigen die späteren Verluste bei der Ausbringung. Hierfür wurde der tatsächliche N-Wert des konservierten Stickstoffs um den Referenzwert der Ausbringungsverluste in der vorliegenden Studie von 50 % bei Rindergülle und 25 % bei Schweinegülle reduziert.

Tabelle 10: Relative NH₃-Emissionsminderung durch Gülleabdeckungen und Gutschrift für den konservierten Stickstoff

Variante	Minderung [%]	N-Gutschrift ¹⁾	
		Rindergülle [€/m ³]	Schweinegülle [€/m ³]
Betondecke	90	0,04-0,06	0,29-0,43
Zeltdach	90	0,04-0,06	0,29-0,43
Schwimmfolie	85	0,04-0,06	0,27-0,41
Leichtschüttungen	80	0,04-0,05	0,26-0,38
Schwimmkörper	85	-	0,27-0,41
Strohaufgabe	80	0,03-0,05	0,24-0,36

¹⁾ Spätere Verluste bei der Gülleausbringung eingerechnet.

7.3 Kosten der Lagerabdeckung und der Emissionsminderung

Die Jahreskosten für die Güllelagerung betragen bei der Referenz ohne Abdeckungen 1,1 (Erdbecken) bis 1,8 €/m³ (kleine Rundbehältervariante, 500 m³ nutzbare Lagerkapazität, Tabelle 11). Als Lagerdauer wurden 6 Monate angesetzt, sodass sich diese Kosten auf einen jährlichen Gülleanfall beziehen, der jeweils das Doppelte der nutzbaren Kapazität beträgt. Beim Investitionsbedarf der Rundbehälter ist ein Restvolumen von 0,5 m Tiefe und für alle Lager ein Freibord von 0,2 m berücksichtigt.

Tabelle 11: Jahreskosten der Güllelagerung

Variante	Rundbehälter nutzbare Lagerkapazität [m ³]				Erdbecken
	500	1000	3000	5000	7500
	Durchmesser [m]				Länge x Breite [m]
	13,7	17,7	27,9	35,5	75 x 25
jährliche Lagerungskosten [€/m ³ • a]					
offen (Referenz)	1,78	1,57	1,29	1,17	1,08
Betondecke	2,74	2,38	1,96	1,82	-
Zeltdach	3,67	2,74	2,00	1,74	-
Schwimmfolie	2,70	2,14	1,66	1,47	1,34
Leichtschüttung	2,03	1,73	1,43	1,30	1,23
Schwimmkörper (Hexa-Cover)	2,42	2,11	1,73	1,60	-
Stroh	2,20	1,86	1,49	1,35	1,35

Inklusive der Abdeckungen weist der 500-m³-Rundbehälter unter Zeltdach mit 3,67 €/m³ die höchsten jährlichen Lagerkosten auf. Wegen der langen Nutzungsdauer sind hier sogar die Jahreskosten mit Betondecke um 0,9 € günstiger. Mit zunehmender Lagergröße nimmt der spezifische Investitionsbedarf für

Zeltdächer aber von ca. 100 auf 46 €/m² ab, sodass bei 5000 m³ Lagerkapazität die Kosten der Betondecke unterschritten werden. Eine ähnlich steile Kostendegression zeigen die Schwimmfolien (34 €/m² bei 500 m³ Kapazität; 16 €/m² bei 5000 m³ und 11,50 €/m² auf dem Erdbecken). Bei Leichtschüttungen und Schwimmkörpern ist die Kostendegression mit steigender Fläche geringer bzw. zu vernachlässigen (Blähton: 10,20 auf 7,60 €/m²; Schwimmkörper „Hexa-Cover“: 39,50 €/m²). Die Kosten für die Aufbringung dieser langlebigen Schwimmdecken mit Frontlader und/oder Teleskoplader sind gegenüber den Materialkosten sehr gering (< 1 %). Bei den Leichtschüttungen wurde in Rechnung gestellt, dass jährlich etwa 10 % des Materials bei der Homogenisierung und Ausbringung der Gülle verloren geht und periodisch ersetzt werden muss. Dennoch ergeben sich für die Leichtschüttungen die geringsten Mehrkosten gegenüber der Lagerung ohne Abdeckung.

Eine Lagerabdeckung mit Strohhäcksel verursacht je nach Schichtdicke 0,40 bis 0,60 €/m² und damit die mit Abstand niedrigsten Materialkosten. Hier übersteigen die kalkulierten Maschinen- und Arbeitskosten für die Aufbringung mit Frontlader und Feldhäcksler die Kosten für Bergung und Bereitstellung des Strohs um das 2,6-Fache. Wegen des Verlustes der Schwimmdecke beim Homogenisieren und Ausbringen der Gülle wurden zwei Aufbringungen pro Jahr kalkuliert.

Die resultierenden Minderungskosten für NH₃-Emissionen für Rinder- und Schweinegülle sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgelistet. Der Unterschied in den Minderungskosten zwischen der Lagerung von Rindergülle und Schweinegülle ist deutlich. Mit 1,3 bis 12 €/kg NH₃ liegen die Minderungskosten bei Rindergülle mit natürlicher Schwimmdecke um das 5-Fache über denjenigen bei Schweinegülle ohne Schwimmdecke (0,26–2,5 €/kg NH₃). Diese Unterschiede in den Minderungskosten beruhen auf den Referenzemissionen. Für Rindergülle, die meist eine Schwimmdecke aufweist, wurden diese Emissionen mit 3,3 g/(m² • d) angenommen. Schweinegülle bildet in der Regel keine emissionsmindernde natürliche Schwimmdecke aus, daher sind hier die Referenzemissionen mit 16 g/(m² • d) deutlich höher. Die Minderungsmaßnahmen führen daher bei Schweinegülle zu einer deutlich stärkeren Reduzierung der NH₃-Emissionen und sind somit kosteneffektiver.

Leichtschüttungen stellen die kosteneffektivste Form der Abdeckung dar, bei kleineren Lagern gefolgt von Stroh und Schwimmkörpern. Trotz hoher Investitionskosten sind Leichtschüttungen und Schwimmkörper durch ihre lange Haltbarkeit und geringen Aufwendungen für Reparatur und Unterhaltung für die Emissionsminderung bei der Lagerung kostengünstig. Bei den großen Lagervarianten holen Zeltdächer und Schwimmfolien durch ihre starke Kostendegression auf, bleiben aber vergleichsweise teure Minderungsmaßnahmen, wenn wie hier die Gutschriften für Regenwasser und N nicht eingerechnet werden (siehe Kapitel 7.4). Schwimmdecken aus Strohhäcksel stellen vor allem bei Behältern eine Alternative dar, die ohne größeren technischen Aufwand nicht mit festen Abdeckungen versehen werden können. Wenn N-Wert und Kosten für die Ausbringung von Regenwasser eingerechnet werden, weisen sie höhere Minderungskosten auf als Schwimmkörper. Sie haben jedoch den Vorteil, auf vielen landwirtschaftlichen Betrieben leicht verfügbar und mit einem geringen Investitionsbedarf verbunden zu sein.

Tabelle 12: Emissionsminderungskosten für Rindergülle

Variante	Rundbehälter nutzbare Lagerkapazität [m³]				Erdbecken
	500	1 000	3 000	5 000	7 500
	Minderungskosten [€/kg NH₃]				
Betondecke	6,16	6,16	6,16	-	-
Zeltdach	12,07	8,90	6,55	5,38	-
Schwimmfolie	6,26	4,62	3,58	2,96	2,09
Leichtschüttung	1,76	1,38	1,38	1,34	1,30
Stroh	3,12	2,59	2,12	2,00	2,35

Tabelle 13: Emissionsminderungskosten für Schweinegülle

Variante	Rundbehälter nutzbare Lagerkapazität [m ³]				Erdbecken
	500	1 000	3 000	5 000	7 500
	Minderungskosten [€/kg NH ₃]				
Betondecke	1,25	1,25	1,25	-	-
Zeltdach	2,45	1,81	1,33	1,09	-
Schwimmfolie	1,27	0,94	0,73	0,60	0,42
Leichtschüttung	0,36	0,28	0,28	0,27	0,26
Schwimmkörper (Hexacover)	0,88	0,88	0,88	0,88	-
Stroh	0,63	0,53	0,43	0,41	0,48

7.4 Sensitivitäten der Berechnung

Bei den Minderungskosten wurde der Wert des konservierten Stickstoffs nicht angerechnet (Tabelle 10). Bei der Rindergülle, für die vergleichsweise geringe Referenzemissionen angenommen wurden, macht dieser Wert nur 2 bis 3 % der Lagerkosten aus. Bei der Schweinegülle mit höheren Referenzemissionen sind es dagegen 15 bis 25 %. Die Annahme von NH₃-Verlusten in der nachfolgenden Ausbringung von 25 % für Schweinegülle führt auch hier zu einer entsprechenden Erhöhung der Minderungskosten (siehe Kapitel 5.3 und 6.3).

Die Art der Abdeckung der Lagerbehälter hat Einfluss auf die Verdunstung und den Eintrag von Niederschlagswasser. Hieraus resultieren Unterschiede in den auszubringenden Güllemengen und Ausbringungskosten die in den Minderungskosten unter 6.3 nicht berücksichtigt sind. Für die schwimmenden Abdeckungen, die den Regenwassereintrag zulassen, die Verdunstung jedoch mindern, entstehen hierdurch zusätzliche Kosten von 0,17 bis 0,26 €/m³. Die festen Abdeckungen können dagegen durch Abweisung des Niederschlags einen geringen Bonus von 0,05 bis 0,08 €/m³ verbuchen.

Für Maßnahmen, die den Eintrag von Niederschlägen vollständig unterbinden, kann darüber hinaus bei Neubau des Lagers ein etwas geringeres Lagervolumen mit dadurch geringeren Baukosten angenommen werden. Dies reduziert die Lagerkosten um 5 bis 6 %.

Für Strohabdeckungen wurde in Kapitel 6.3 ein zweimaliges Aufrühren je Jahr angenommen. Nach jedem Aufrühren muss die Strohaufgabe erneuert werden. Ist eine Ausbringung und somit ein Aufrühren häufiger notwendig, erhöhen sich die Kosten.

Tabelle 14 listet die Minderungskosten für Schweinegülle auf, die sich ergeben, wenn der Wert des konservierten Stickstoffs, die Kosten für die Ausbringung von Niederschlagswasser und Kosten für den Freibord für Niederschlagswasser berücksichtigt werden. Für Stroh sind zusätzlich die Minderungskosten bei viermaliger Gülleausbringung pro Jahr dargestellt. Leichtschüttungen bleiben bei dieser Betrachtung besonders günstig und können annähernd kostenneutral eingesetzt werden. Im Vergleich zu den übrigen Abdeckungen wird die Minderung durch feste Abdeckungen deutlich günstiger. Stroh stellt bei viermaliger Aufbringung pro Jahr eine vergleichsweise teure Minderungsmaßnahme dar.

Tabelle 14: Emissionsminderungskosten für Schweinegülle unter veränderten Annahmen¹⁾

Variante	Rundbehälter nutzbare Lagerkapazität [m ³]				Erdbecken
	500	1 000	3 000	5 000	7 500
	Minderungskosten [€/kg NH ₃]				
Betondecke	0,44	0,45	0,47	-	-
Zeltdach	1,64	1,01	0,55	0,32	-
Schwimmfolie	1,07	1,29	0,52	0,40	0,22
Leichtschüttung	0,17	0,09	0,09	0,08	0,07
Schwimmkörper (Hexacover)	0,67	0,67	0,67	0,67	-
Stroh, 2 x pro Jahr	0,47	0,36	0,26	0,24	0,31
Stroh, 4 x pro Jahr	1,17	0,94	0,74	0,69	0,84

¹⁾ Wert des konservierten Stickstoffs, die Kosten für die Ausbringung von Niederschlagswasser und Kosten für den Freibord für Niederschlagswasser berücksichtigt. Stroh: zusätzlich Kosten bei viermaliger Gülleausbringung pro Jahr dargestellt.

8 Minderungskosten: Gülleausbringung

Fünf Verfahren wurden definiert, die in etwa die Spreizung der in der Praxis eingesetzten Verfahren zur Ausbringung von Gülle mit jährlichen Verfahrensleistungen von 1 000 bis 100 000 m³ widerspiegeln (Tabelle 15). Das Verfahren 1 000 m³ charakterisiert eine wirtschaftlich suboptimale einzelbetriebliche Variante mit Eigenmechanisierung. 3 000 m³ entsprechen einem etwas größeren Betrieb oder einer überbetrieblichen Gemeinschaft mehrerer kleinerer Betriebe, die das Ausbringungsgerät gemeinsam nutzen. Die Menge von 10 000 m³ rechtfertigt die Investition in eine schlagkräftigere Technik und charakterisiert eine überbetrieblichen Gemeinschaft oder einen größeren Betrieb. 30 000 und 100 000 m³ bilden den Bereich der Lohnunternehmer und Großbetriebe ab. Diese Mengen werden wirtschaftlich sinnvoll in schlagkräftigen, in Transport- und Ausbringeinheiten geteilten Verfahren ausgebracht. Die Annahmen als Grundlage für die Berechnungen werden aufgelistet. Betrachtet werden die Ausbringung von Rinder- und Schweinegülle zu Beginn der Vegetationsperiode und auf Flächen ohne oder mit niedrigem Pflanzenbestand. Bei einer Temperatur von etwa 15 °C zum Zeitpunkt der Ausbringung ist für Rindergülle für die Referenztechnik „Breitverteilung“ ein NH₃-Verlust von 50 % des Ammoniumstickstoffs und für Schweinegülle von 25 % zu erwarten.

Tabelle 15: Charakterisierung der berechneten Ausbringungsverfahren

Jährlich insgesamt ausgebrachte Güllemenge m^3/a	Verfahren	Technik-/Verfahrenskomponenten
1 000	kontinuierlich	traktorgezogener Pumptankwagen, 10 m^3
3 000	kontinuierlich	traktorgezogener Pumptankwagen, 10 m^3
10 000	kontinuierlich	traktorgezogener Pumptankwagen, 15 m^3
30 000	geteilt	Transport: traktorgezogene Pumptankwagen, 21 m^3 Ausbringung: traktorgezogener Pumptankwagen, 10 m^3
100 000	geteilt	Transport: traktorgezogene Pumptankwagen, 21 m^3 Ausbringung: Trägerfahrzeug, 21 m^3

8.1 Technische Beschreibung der Verfahren

Tankwagen und Trägerfahrzeuge

Bei den Tankwagen gibt es zwei gängige Bauarten:

- Kompressortankwagen
- Pumptankwagen

Der Kompressortankwagen saugt selbständig durch ein erzeugtes Vakuum die Gülle in den Tank. Der Pumptankwagen ist ebenfalls selbstansaugend. Wegen der Funktionssicherheit, der raschen Befüllungsleistung und der präziseren Dosierung vor allem beim Einsatz von emissionsmindernden Ausbringetechniken erhalten in der Praxis häufig Pumpentankwagen den Vorzug.

Vor allem in Regionen mit großen Schlägen setzen sich zunehmend Trägerfahrzeuge für die Gülleausbringung durch. Die Trägerfahrzeuge werden mit entsprechenden Tankbehältern und Applikationstechnik ausgerüstet. Wegen der hohen Investition sind diese Fahrzeuge nur im überbetrieblichen Einsatz sinnvoll.

Heute kommen noch überwiegend Breitverteilungssysteme (Prallblech, Gestängeverteiler, Schwenkverteiler) zum Einsatz, diese werden vor allem in Großbetrieben und im überbetrieblichen Einsatz zunehmend von emissionsarmen Verteilsystemen abgelöst.

Für eine verlustarme und zielgenaue Verteilung der Gülle kommen die folgenden Verteiltechniken zur Anwendung:

Schleppschlauchverteiler

Schleppschlauchverteiler (Abbildung 10) besitzen eine Arbeitsbreite von 6 bis 24 m, neuerdings werden auch solche mit 36 m Arbeitsbreite angeboten. Die einzelnen Ablaufschläuche sind in der Regel in einem Abstand von 20 bis 40 cm zueinander angeordnet. Die Gülle wird auf der Bodenoberfläche in etwa 5 bis 10 cm breiten Streifen ablegt.

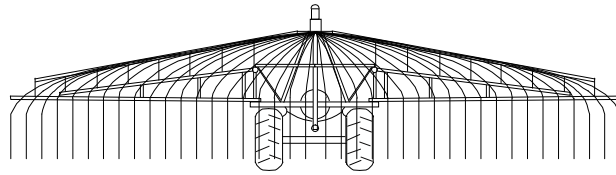


Abbildung 10: Schleppschlauchverteiler

Schleppschuhverteiler

Schleppschuhverteiler (Abbildung 11) besitzen eine Arbeitsbreite von 3 bis 12, manchmal 18 m, die einzelnen Ablaufschläuche haben in der Regel einen Abstand von 20 bis 30 cm zueinander. Am Ende des Ablaufes befinden sich spezielle Verteileinrichtungen, die üblicherweise in Form einer schuhähnlichen Verstärkung bzw. Schleifkufe ausgeführt sind und an deren Ende die Gülle abgelegt wird.

Der Verteiler wird während des Ausbringvorganges durch den Pflanzenbestand (soweit vorhanden) geschleppt. Bauartbedingt wird der Pflanzenbewuchs während des Ausbringvorganges etwas beiseite gedrückt. Die Gülleablage erfolgt in den obersten Bodenbereich (0 bis 3 cm), so dass Verschmutzungen des Pflanzenbestandes weitgehend vermieden werden.

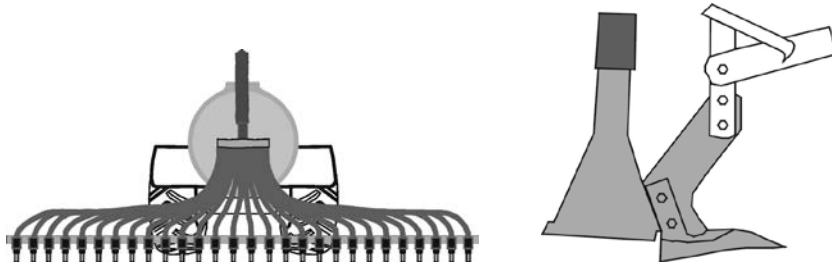


Abbildung 11: Schleppschuhverteiler

Schlitzverteiler

Typische Schlitzverteiler (Abbildung 12) besitzen eine Arbeitsbreite von 6 bis 9 m, wobei die einzelnen Ablaufschläuche in der Regel in einem Abstand von 20 bis 30 cm zueinander angeordnet sind. Die Applikation erfolgt mithilfe einer schuhähnlichen Verstärkung, der eine Schneidscheibe (bzw. ein Stahlmesser) vorweg geführt wird und die den Boden aufschneidet und an deren Ende die Gülle in den Schlitz abgelegt wird.



Abbildung 12: Schlitzverteiler

Direkteinbringung mit Grubber und absetzige Einarbeitung

Die sogenannten Güllegrubber (Abbildung 13) besitzen eine Arbeitsbreite von 3 bis 6 m, wobei die einzelnen Ablaufschläuche in der Regel in einem Abstand von 20 bis 40 cm zueinander angeordnet sind. Der Boden wird mit einem Grubberzinken bearbeitet und in dessen unmittelbarer Verlängerung die Gülle während der Bearbeitung in den Erdstrom abgelegt. Daneben gibt es auch Scheibeneggen, bei denen der Boden mit Hohlkreisen bearbeitet und der Dünger in gleicher Weise in den Erdstrom abgelegt wird. Die Einarbeitung kann auch mit herkömmlichen Bodenbearbeitungsgeräten absetzig nach der Ausbringung durchgeführt werden. Für eine effiziente Emissionsminderung ist es allerdings wichtig, dass die Einarbeitung kurz nach der Ausbringung erfolgt. Dies ist umso wichtiger, je dickflüssiger die Gülle ist und je höher die Temperaturen sind.

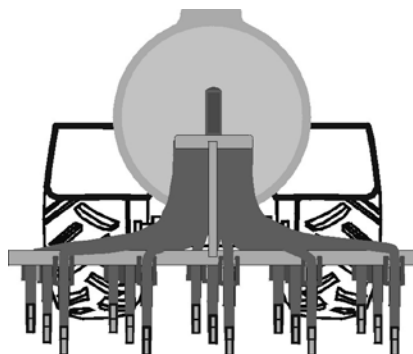


Abbildung 13: Güllegrubber

Weitere Verfahren

Ergänzend wird für Rindergülle die Verdünnung mit Wasser im Verhältnis 1:1 betrachtet.

8.2 Emissionsminderung und Düngerwert

Die Annahmen für die Emissionsreduzierung der Minderungstechniken zeigt die Tabelle 16. Gegenüber der Referenz „Breitverteiler“ beträgt die Minderung für Schleppschläuche 20 %, für Schleppschuhe 40 %, für Schlitzverfahren 60 % und für den Güllegrubber 90 %. Die daraus resultierende Stickstoffkonservierung ergibt eine Gutschrift von 0,23 bis 1,01 €/m³ Rindergülle. Eine Minderungstechnik ist dann kostenneutral, wenn die Minderungskosten gleich oder kleiner sind als der Betrag für die Gutschrift. Die Minderungseffekte sind für Schweinegülle bei Schleppschläuchen und Schleppschuhen wegen der höheren Fließfähigkeit etwas besser.

Tabelle 16: Relative NH₃-Emissionsminderung der Ausbringtechnik und Gutschrift für den konservierten Stickstoff

Variante	Rindergülle		Schweinegülle	
	Minderung %	Gutschrift €/m ³	Minderung %	Gutschrift €/m ³
Breitverteiler (Referenz)	-	-	-	-
Schleppschlauch	20	0,23	30	0,27
Schleppschuh	40	0,45	50	0,45
Schlitz (Scheiben)	60	0,68	60	0,54
Grubber	90	1,01	90	0,81
Einarbeitung innerhalb 1h	90	1,01	90	0,81
Einarbeitung innerhalb 4h	50	0,56	70	0,63
Verdünnung 1:1	50	0,56	-	-

8.3 Kosten der Ausbringung und der Emissionsminderung

Sowohl die Kosten der Ausbringung (Tabelle 17) als auch die Kosten der Emissionsminderung (Tabelle 18 und Tabelle 19) hängen signifikant von der Auslastung der Gülleapplikationstechnik und der Emissionsminderungstechnik ab.

Während das einzelbetriebliche Verfahren (1 000 m³/a) Kosten von etwa 9 €/m³ verursacht, nehmen diese bei Verfahrensleistungen von 3 000 m³/a auf etwa 4 bis 8 €/m³, bei 10 000 m³/a auf 3 bis 6,5 €/m³ und bei 100.000 m³/a auf 2,5 bis 5 €/m³ ab. Bei der Variante mit Verfahrensleistungen von 3 000 m³/a zeigt sich, dass unterschiedliche Stundenleistungen Einfluss auf die Gesamtkosten haben, die 1 bis 2 €/m³ ausmachen können. Einzelbetriebliche Verfahren haben jedoch den Vorteil, dass hiermit die besten Termine genutzt werden können. Diesen Betrieben ist es möglich, auf gute Witterungsbedingungen (feucht-kühl) oder Tageszeiten (Abendstunden) zu warten.

Die Kosten für die Emissionsminderung betragen unter den betrachteten Bedingungen für Rindergülle zwischen 0,30 und 7 €/kg NH₃ (Tabelle 18) und für Schweinegülle zwischen 0,30 und 9 €/kg NH₃ (Tabelle 19). Insgesamt sind die Emissionsminderungskosten für Schweinegülle höher als für Rindergülle; die absoluten Kosten der Emissionsminderung bleiben gleich, jedoch sind die Emissionen aus Schweinegülle geringer und damit auch der Effekt der Emissionsminderung.

Sehr kosteneffizient – auch für Einzelbetriebe mit geringer Güllemenge – ist die Einarbeitung mit einem separaten Traktor mit Einarbeitungsgerät (Grubber, Scheibenegge). Hierbei fallen – je nach Allokation der Kosten zu Bodenbearbeitung und Emissionsminderung – Kosten von deutlich unter 1 bis 1,5 €/kg NH₃ an.

Dagegen ist die Verdünnung von Rindergülle mit Wasser zwar eine wirksame, aber sehr kostenträchtige Variante, weil erhöhte Volumina transportiert und ausgebracht werden müssen.

Tabelle 17: Ausbringungskosten für Gülle

Variante	Jährliche Verfahrensleistung [m³/a]					
	1.000	3 000		10 000	30 000	100 000
	Verfahrensleistung [m³/a]					
	niedrig	hoch	niedrig	niedrig	-	-
	Ausbringungskosten					
	€/m³	€/m³	€/m³	€/m³	€/m³	€/m³
Breitverteiler (Referenz)	6,61	3,22	4,31	3,04	3,19	2,49
Schleppschlauch	8,76	3,99	5,08	3,38	3,32	2,57
Schleppschuh	9,68	4,63	5,87	4,11	4,10	-
Schlitz (Scheiben)	9,97	4,89	6,16	4,37	4,67	2,89
Grubber	10,38	5,71	7,49	4,96	5,30	3,04
Einarbeitung innerh. 1h	7,43	4,04	5,13	3,86	4,02	3,31
Einarbeitung innerh. 4h	7,10	3,71	4,80	3,53	3,69	2,98
Verdünnung 1:1	11,11	6,08	8,81	6,49	5,95	4,40

Tabelle 18: NH₃-Emissionsminderungskosten bei Rindergülle

Variante	Jährliche Verfahrensleistung [m³/a]					
	1.000	3 000		10 000	30 000	100 000
	Verfahrensleistung [m³/h]					
	niedrig	hoch	niedrig	niedrig	-	-
	Minderungskosten [€/kg NH₃]					
	€/kg	€/kg	€/kg	€/kg	€/kg	€/kg
Schleppschlauch	7,08	2,54	2,54	1,14	0,41	0,28
Schleppschuh	5,06	2,33	2,57	1,77	1,50	-
Schlitz (Scheiben)	3,70	1,83	2,04	1,47	1,63	0,44
Grubber	2,76	1,82	2,33	1,41	1,54	0,40
Einarbeitung innerh. 1h	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Einarbeitung innerh. 4h	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Verdünnung 1:1	5,93	3,77	5,93	4,55	3,63	2,52

Einzelbetriebliche Verfahren (1 000 m³/a) mit Anbaugeräten (Schleppschlauch...) eignen sich bei Kosten von etwa 3 bis 7 €/kg NH₃ nur bedingt für eine kosteneffiziente Emissionsminderung. Einzelbetriebliche Verfahren eignen sich jedoch insbesondere zur Nutzung optimaler Termine, die meist nur an wenigen Stunden eines Arbeitstages realisierbar sind.

Bei Jahresleistungen von 3 000 m³/a sind die Kosten niedriger, jedoch immer noch auf einem Niveau von etwa 2 bis 3 €/kg NH₃. Ein Kostenniveau von 1 bis 2 €/kg NH₃ wird – abgesehen von absetzigen Einarbeitungsverfahren – erst bei Verfahrensleistungen von 10 000 m³/a erreicht, das Kostenniveau der Gutschriften (Tabelle 16) erst bei Verfahrensleistungen von 100 000 m³/a.

Bei geringen jährlichen Verfahrensleistungen sind die Minderungskosten für aufwändige Techniken (Gülfeschlitz) niedriger als für den Schleppschlauch, bei hohen jährlichen Verfahrensleistungen weisen Schleppschlauchverfahren die geringsten Kosten auf.

Tabelle 19: NH₃-Emissionsminderungskosten bei Schweinegülle

Variante	Jährliche Verfahrensleistung [m³/a]					
	1.000	3 000		10 000	30 000	100 000
	Verfahrensleistung [m³/h]					
	niedrig	hoch	niedrig	niedrig	-	-
	Minderungskosten					
	€/kg	€/kg	€/kg	€/kg	€/kg	€/kg
Schleppschlauch	8,80	3,16	3,16	1,42	0,50	0,34
Schleppschuh	6,29	2,89	3,20	2,20	1,86	-
Schlitz (Scheiben)	4,60	2,28	2,53	1,82	2,02	0,55
Grubber	3,43	2,27	2,89	1,75	1,91	0,50
Einarbeitung innerh. 1h	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Einarbeitung innerh. 4h	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Verdünnung 1:1	7,37	4,69	7,37	5,65	4,52	3,13

9 Minderungskosten: Harnstoff

9.1 Verfahren

Berechnet wurden die Minderungskosten für NH_3 -Verluste aus Harnstoff bei Düngung von Grünland sowie von Silomais und Winterweizen im wachsenden Bestand. Die Höhe der N-Düngung wurde mit 108 bzw. 86 kg N/ha bei Silomais und Winterweizen als Harnstoff-Granulat angenommen. Für die NH_3 -Verluste wurden die Emissionsfaktoren des Nationalen Emissionsberichtes zugrunde gelegt (HAENEL et al., 2010) mit 12 % des Harnstoff-N auf Acker und 23 % auf Grünland. Als Minderungsmaßnahme wurden der Einsatz eines Ureaseinhibitors und bei Ackerkulturen zusätzlich die Einarbeitung des Düngers berücksichtigt.

Bei Mais wurde eine Einarbeitung mit Reihen-Rollhacke angenommen. Die Rollhacke bewirkt eine gute Durchmischung der oberflächennahen Bodenschicht, für die eine Emissionsminderung von 90 % für den bearbeiteten Flächenanteil zwischen den Maisreihen unterstellt wird. Bei einer Bearbeitung von 70 % der Gesamtfläche ergibt sich hieraus eine Minderungswirkung von 63 %.

Bei Winterweizen wurde das Striegeln als Einarbeitungsmaßnahme berücksichtigt. Da hierdurch nur eine begrenzte Durchmischung der obersten Bodenschicht erreicht wird, wurde eine Emissionsminderung von 25 % unterstellt.

Für die Emissionsminderung durch Ureaseinhibitoren wurde in Anlehnung an SCHMIDHALTER et al., 2010 für die Ackervarianten 60 % und für das Grünland 80 % angenommen.

9.2 Minderungskosten

Bezogen auf die als Harnstoff aufgebrauchte N-Menge ist die Einarbeitung mit 0,2 €/kg N bei Winterweizen und 0,3 €/kg N bei Mais um den Faktor 2 bis 3 teurer als die Anwendung von NBTPT mit 0,1 €/kg N. Dem entsprechend betragen die Minderungskosten für die Einarbeitung 4 bis 6 €/kg NH_3 , gegenüber 1,1 bzw. 0,5 €/kg NH_3 bei Anwendung von Ureaseinhibitoren auf Acker bzw. Grünland (Tabelle 20). Wenn der Wert des konservierten NH_3 berücksichtigt wird, verringern sich die Minderungskosten auf Grünland um knapp 40 %. Auf Acker würde diese N-Gutschrift nur unter 1 bis 5 % der Minderungskosten betragen.

Tabelle 20: Berechnungsergebnisse für die Emissionsminderung bei der Harnstoffanwendung

		Einarbeitung ¹⁾		Ureaseinhibitor ²⁾		
		Silomais	Winterweizen	Silomais	Winterweizen	Grünland
Mehrkosten	€/kg Harnstoff-N	0,33	0,21	0,10	0,10	0,10
Emissionsminderung	%	63	25	60	60	80
Wert des Konservierten N	€/kg Harnstoff-N	0,07	0,03	0,06	0,06	0,17
Minderungskosten	€/kg NH_3	3,62	5,72	1,14	1,14	0,45

¹⁾ Silomais: Rollhacke; Winterweizen: Striegel

²⁾ N-(n-butyl) Thiophosphorsäuretriamid (NBTPT, „Agrotain“)

Die tatsächliche Höhe der NH_3 -Emissionen aus Harnstoffdüngern wird sehr stark von Bodeneigenschaften und klimatischen Faktoren beeinflusst. Die im Emissionsinventar verwendeten Emissionsfaktoren, die den hier dargestellten Berechnungen zugrunde liegen, basieren zum Großteil auf Untersuchungen in England. Wenige Untersuchungen liegen für deutsche Standorte vor, doch diese lassen deutlich geringere Emissionsfaktoren vermuten (SCHMIDHALTER et al., 2010). Setzt man die dort genannten etwa halb so hohen Emissionsfaktoren an, führt dies zu einer Verdopplung der Minderungskosten.

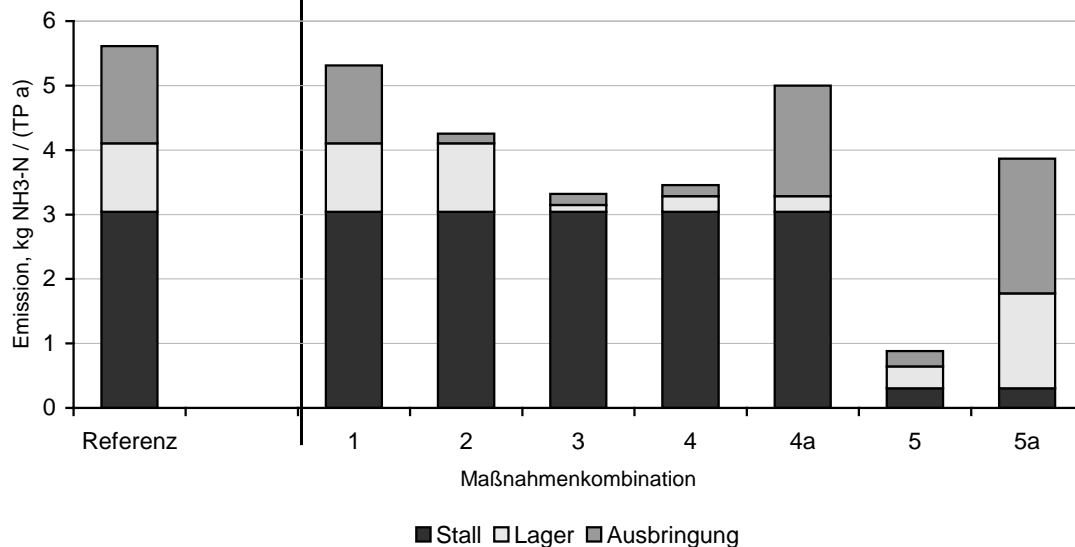
Sowohl für die Berücksichtigung der NH_3 -Emissionen aus Harnstoffdüngemitteln in den Emissionsinventaren als auch für die Abschätzung von NH_3 -Minderungskosten bei der Harnstoffdüngung besteht Forschungsbedarf.

10 Minderungskosten in der Verfahrenskette

Die oben dargestellten Berechnungen wurden jeweils isoliert für einzelne Verfahren durchgeführt. In der Regel beeinflusst jedoch die Emissionsminderung in einem Verfahren die Menge des Stickstoff im folgenden Verfahren und somit die Höhe der dort potenziell vorhandenen NH_3 -Emissionen. Werden beispielsweise die Ammoniakemissionen in einem Schweinemaststall gemindert, so gelangt mehr Ammonium in das Güllelager. Dies erhöht die Ammoniakemissionen aus dem Lager, wodurch ein Teil der Minderungswirkung im Stall wieder verloren geht, zugleich aber die Minderungsmaßnahmen im Lager kosteneffektiver werden. Um diese Wechselwirkungen abzubilden, muss die Tierhaltung als Verfahrenskette insgesamt dargestellt werden. Hierzu werden die Stickstofffrachten in den Einzelverfahren Fütterung, Haltung, Güllelagerung und -ausbringung zu einer Gesamtkette verknüpft. Als durchgehende Bezugseinheit kann etwa die N-Menge pro Tierplatz und Jahr verwendet werden. Die Minderungskosten für die Verfahrenskette errechnen sich dann als Summe der Mehrkosten je Verfahren gegenüber einer Referenz-Verfahrenskette, geteilt durch die Gesamt-Emissionsminderung. Die Gesamt-Minderung kann als Differenz aus der verbleibenden Stickstoffmenge am Ende der Verfahrenskette von Referenz- und Minderungsverfahren dargestellt werden. Abbildung 14 stellt exemplarisch Ergebnisse für eine Verfahrenskette der Schweinemast dar.

Kombiniert wurden ein Maststall mit 1 000 Tierplätzen, ein Güllelager mit 1 000 m^3 Lagervolumen und Ausbringungsverfahren für 10 000 m^3/a . Die Gülle-Einarbeitung stellt als letztes Verfahrensglied auch als Einzelmaßnahme eine kostengünstige Minderungsmaßnahme dar. Abluftreinigung und Strohabdeckung verlieren dagegen durch die nachfolgenden Verluste an Effektivität, wenn nicht auch in den folgenden Verfahrensgliedern emissionsmindernde Techniken eingesetzt werden. Durch Kombination der Maßnahmen wird eine maximale Emissionsminderung erreicht.

		1	2	3	4	4a	5	5a
NH ₃ -Minderungskosten	€/kg NH ₃	1,39	0,75	0,88	0,64	0,58	3,41	8,46
Mehrkosten	€/ (TP a)	0,51	1,23	2,45	1,67	0,44	19,58	17,91
NH ₃ -Minderung	%	5	24	41	38	11	84	31



Maßnahmenkombination

- 1 Schleppschlauch
- 2 Einarbeitung innerhalb einer Stunde
- 3 Betondecke; Einarbeitung innerhalb einer Stunde
- 4 Strohecke; Einarbeitung innerhalb einer Stunde
- 4a nur Strohecke
- 5 Abluftreinigung dreistufig; Strohecke; Einarbeitung innerhalb einer Stunde
- 5a nur Abluftreinigung dreistufig

Abbildung 14: Emissionen in der Verfahrenskette für die untersuchten Maßnahmenkombinationen. Angabe der Minderung der Ammoniakemissionen, der Mehrkosten und der resultierende Minderungskosten.

11 Literatur

- AARNINK, A.J.A.; SMITS, M.C.J.; BAKKER, G.C.M.; VERSTEGEN, M.W.A. (2003): Manipulating the diet to reduce environmental pollution from pigs. Wageningen University and Research Center Publications, unveröffentlicht
- AMON, B.; FRÖHLICH, M. (2006): Ammoniakemissionen aus frei gelüfteten Ställen und Wirtschaftsdüngerlagerstätten für Rinder. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT e.V. (KTBL) (Hrsg.): Emissionen der Tierhaltung. Messung, Beurteilung und Minderung von Gasen, Stäuben und Keimen, Darmstadt, S. 49-64
- CANH, T.T.; AARNINK, A.J.A.; SCHUTTE, J.B.; SUTTON, A.; LANGHOUT, D.J.; VERSTEGEN, M.W.A. (1998): Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing–finishing pigs. *Livestock Production Science* 56(3), S. 181-191
- DÖHLER, H.; EURICH-MENDEN, B.; DÄMMGEN, U.; OSTERBURG, B.; LÜTTICH, M.; BERGSCHMIDT, A.; BERG, W.; BRUNSCH, R. (2002): BMELV/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahr 2010. Forschungsbericht 299 42 245/02. Texte 05/02. Umweltbundesamt, Berlin
- EMEP/EEA (2010): Emission inventory guidebook 2009, updated June 2010. 4.B Animal husbandry and manure management. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009/part-b-sectoral-guidance-chapters/4-agriculture/4-b/4-b-animal-husbandry-and-manure-management.pdf>; Zugriff am 05.05.2011
- EURICH-MENDEN B.; DÖHLER H.; VAN DEN WEGHE H. (2011): Ammoniakemissionsfaktoren im landwirtschaftlichen Emissionsinventar – Teil 2: Geflügel und Mastschweine. *Landtechnik* 66(1), S. 60-63
- EUROPEAN COMMISSION (2003): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference Document on Best Available Techniques for Intensive Rearing of Poultry and Pigs (ILF). 341 S., http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/brefdownload/download_IRPP.cfm; Zugriff am 06.01.2011
- GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE (GfE) (2006): Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Schweinen. DLG Verlag, Frankfurt a.M.
- HAENEL H.D.; RÖSEMANN C.; DÄMMGEN U.; DÖHLER H.; EURICH-MENDEN B.; LAUBACH P.; MÜLLER-LINDENLAUF M.; OSTERBURG B. (2010): Berechnung der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft – Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2010 für 2008. *Landbauforschung, Sonderheft 334*, Braunschweig
- HAEUSSERMANN U. (2006): Minderungsmaßnahmen in der Mastschweinehaltung. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT e.V. (KTBL) (Hrsg.): Emissionen der Tierhaltung. Messung, Beurteilung und Minderung von Gasen, Stäuben und Keimen, Darmstadt, S. 192-210
- INTERNATIONALE BODENSEEKONFERENZ (IBK) (2008): Emissionsmindernde Gülleausbringung. IBK Positionspapier. Antrag an die Regierungen unveröffentlicht
- KTBL (2007): Abluftreinigung in der Tierhaltung, Darmstadt
- MÜLLER, H.J.; BRUNSCH, R.; BERG, W. (2006): Ammoniakemissionsmassenströme in und um Tierhaltungsanlagen. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT e.V. (KTBL) (Hrsg.): Emissionen der Tierhaltung. Messung, Beurteilung und Minderung von Gasen, Stäuben und Keimen, Darmstadt, S. 79-93
- OSTERBURG B.; RÖSEMANN C.; HAENEL H.D.; DÖHLER H.; WULF S. (2010): Bewertung von Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft zum Erreichen der Emissionsobergrenze für Ammoniakemissionen gemäß EU-NEC-Richtlinie im Jahr 2010. Unveröffentlichter Bericht zur Unterstützung der Ressortgespräche zwischen BMELV/BMU vor dem Hintergrund der EU-NEC-Richtlinie. Berichtsfassung vom 26.05.2010, Braunschweig und Darmstadt, im Mai 2010
- SCHMIDHALTER U.; SCHRAML M.; WEBER A.; GUTSER R. (2010): Ammoniakemissionen aus Mineraldüngern – Versuchsergebnisse auf mitteleuropäischen Standorten. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT e.V. (KTBL) (Hrsg.): Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden, Darmstadt, S. 92-102
- SCHULTE-SUTRUM, R. (2010): Fütterungsanlagen für Schweine – Mischen und Transportieren. DLG-Merkblatt 361
- UN/ECE (2007): Guidance Document on Control Techniques for Preventing and Abating Emissions of Ammonia. 35 S.; <http://www.unece.org/env/documents/2007/eb/wg5/WGSR40/ece.eb.air.wg.5.2007.13.e.pdf>; Zugriff am 23.09.2010