

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

# **Konzeptentwicklung für einen zukunftsfähigen und gesellschaftlich konsensfähigen Mastschweinestall unter Einbeziehung der Ansprüche an Tiergerechtigkeit, Tiergesundheit, Klimaschutz, Umweltschutz und Arbeitsplatzqualität**

Aktenzeichen: 91017/12

ABSCHLUSSBERICHT

## Berichterstattung

Helmut Georg Döhler, Susanne Döhler

DöhlerAgrar Unternehmensberatung

Schlossweg 7

96190 Untermerzbach

Dezember 2020

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>91017/12</b>	Referat	<b>36</b>	Fördersumme	<b>79.730,00 €</b>
----	-----------------	---------	-----------	-------------	--------------------

<b>Antragstitel</b>	<b>Konzeptentwicklung für einen zukunftsfähigen und gesellschaftlich konsensfähigen Mastschweinestall unter Einbeziehung der Ansprüche an Tierwohl, Tiergesundheit, Umweltschutz und Arbeitsplatzqualität</b>
---------------------	---

<b>Stichworte</b>	Gülleloser Stall, Mastschweine, tiergerechte Haltung, Kot-Harn-Trennung, Urinstabilisierung, Nährstoffrückgewinnung, Schweinetoilette, Minderung Ammoniak-, Geruchs- und Methanemissionen
-------------------	---

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
	April 2017	Dezember 2020	

Zwischenberichte	November 2018
------------------	---------------

<b>Bewilligungsempfänger</b>	DöhlerAgrar Schlossweg 7 96190 Untermerzbach	Tel	09533 921101
		Fax	
		<b>Projektleitung</b> Helmut Döhler	
		<b>Bearbeiter</b> Helmut Döhler	

**Kooperationspartner**

**Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Schweinehaltung wird in Deutschland überwiegend auf vollperforierten Böden in vollklimatisierten Ställen betrieben. Die entstehende Gülle wird unter dem Stall gelagert (Gülle Keller) oder über Kanäle und Leitungen in einen außenliegenden Güllebehälter verbracht und nach entsprechender Lagerzeit von dort auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausgebracht.

Die bisherigen Haltungssysteme in vollklimatisierten Ställen mit Güllesystem sind durch hohe Ammoniak- und Methanemissionen im Stall und im Lager, sowie durch weitergehende Ammoniak- und Lachgasemissionen nach der Ausbringung der Gülle gekennzeichnet. Vor allem Methan- und Lachgasemissionen werden u. a. durch die Vermischung von Kot und Harn (sowie Futter- und Einstreuresten) zu Gülle hervorgerufen. In der Gülle wird der mit dem Urin ausgeschiedene Harnstoff hydrolysiert und in Ammoniak, Kohlendioxid und Wasser umgewandelt, dazu ist der Kontakt mit dem im Kot befindlichen Enzym Urease erforderlich. Die Methanemissionen im Stall und im Lager entstehen durch den weitgehend anaeroben Abbau der im Kot vorhandenen organischen Substanz. Verbunden mit dem Abbau organischer Substanz sind Faulgerüche, die über die Abluft in die Umgebung emittiert werden.

Auch die Festmistsysteme für die Haltung von Schweinen emittieren bereits im Stall, aber auch im Lager erhebliche Mengen an Ammoniak, Methan und Lachgas. Zudem stehen Festmistsysteme nicht immer im Einklang mit den thermoregulatorischen Bedürfnissen der Tiere, da diese in der wärmeren Jahreszeit kühlende Buchtenelemente statt warmer Mistmatratzen bevorzugen. Volleingestreuete Systeme und besonders Tiefstallssysteme bieten den Tieren jedoch keine Alternative, die ihren Ansprüchen gerecht wird.

Zielsetzung des DBU Vorhabens war daher die Entwicklung eines Schweinehaltungssystems, welches einerseits umwelterhebliche und klimarelevante Emissionen drastisch reduziert und dabei andererseits durch

eine besonders tiergerechte Haltung gesellschaftspolitischen Ansprüchen an eine moderne Tierhaltung genügt.

Mit den bisherigen Entwicklungen für die Haltungssysteme auf Grundlage von Flüssig- oder Festmistverfahren können diese Ansprüche nicht erfüllt werden.

### **Ergebnisse**

Das neu entwickelte Verfahren basiert daher auf der Trennung von Kot und Harn bereits im Stall mithilfe eines optimierten und automatisierten Unterflur-Mistschiebersystems und perspektivisch eines automatisierten Oberflur-Kotsammelsystems, welches zusätzlich zum Unterflursystem optional eingesetzt werden kann. Der Kot (ggfs. versetzt mit Einstreuresten) wird nicht wie üblich gelagert, sondern sofort weiterverarbeitet und dient entweder als Gärsubstrat für Biogasanlagen oder wird über Karbonisierungs- bzw. Trocknungsverfahren stabilisiert.

Der abgetrennte Harn wird schnell aus dem Stall ausgeräumt und darüber hinaus bereits im Stall mit Kalkhydrat, Schwefelsäure oder synthetischen Substanzen soweit stabilisiert, dass über eine Blockierung der Ureaseaktivität die Bildung von Ammonium und Ammoniak und die daraus folgende Ammoniakemission weitestgehend verhindert wird. Außerhalb des Stalles werden verbliebene Feststoffe vom Urin abgetrennt, der Urin wird stabilisiert und in das Urinlager überführt. Als weitere Verfahrensstufe können die Urinnährstoffe durch gezielte Fällungsreaktionen aus der Flüssigkeit entfernt und optional der Urin mittels Membran- oder Eindampftechnik aufkonzentriert werden, so dass Brauchwasser oder vorflutfähiges Wasser entsteht.

Die Haltung der Mastschweine erfolgt in einem Außenklimastall, der mit dem Kot- und Harnbehandlungssystem kompatibel ist und um mehrere baulich-technische Komponenten weiterentwickelt wurde. Der Stall ist gekennzeichnet durch eine symmetrische und isolierte Satteldachkonstruktion (wahlweise Flachdachkonstruktion) von ca. 23 m Breite mit Außenklimabedingungen durch offene Seitenwände mit Windschutznetzen. Die 11 m langen und 2,5 m breiten, weitgehend planbefestigten Buchten weisen gebäudemittig einen gekapselten und klimatisierten Komfortbereich auf (beheizbar im Winter und kühlbar im Sommer), in dem Stroh als Beschäftigungsmaterial sowie Raufutter vollautomatisiert zugegeben werden kann. Der perforierte („Toiletten“-) Bereich zum Absetzen von Kot und Harn befindet sich jeweils am Rand der Bucht an den Gebäudeaußenwänden. Dazwischen ist die Aktivitäts- und Fresszone mit Automaten für Konzentrat- und Raufutter sowie mit Beschäftigungselementen angeordnet.

In diesem „Stall ohne Mist und Gülle (StoMuG)“ wird durch die Behandlungskaskaden von Kot und Harn die Entstehung von Gülle und Mist verhindert. Damit einhergehend werden Emissionsminderungen im Vergleich zu vollperforierten und klimatisierten Haltungssystemen von Ammoniak um mindestens 70 %, Methan, durch die weitgehende Verhinderung von Faulungsprozessen, um 90 % sowie Geruch um 50-70 % erwartet.

### **Fazit**

Das System vereint die Merkmale einer besonders tiergerechten Haltung mit den Anforderungen an hohe Umweltschutzansprüche. Emissionen aller relevanten Gase werden signifikant und drastisch auf ein Niveau reduziert, wie es bisher nur mit Abluftreinigung erreichbar ist. Gleichzeitig wird den Tieren umfangreiches Platzangebot (zur Ausbildung von Funktionsbereichen) mit Zugang zur Außenluft und Umweltreizen gewährt. Kühlen und Aufwärmen kann bedarfsgerecht in der gekapselten Innenbucht erfolgen, daher legen die Tiere keine emissionsträchtigen Exkrementsohlen an.

Somit ermöglicht das Gesamtsystem bei der Haltung von Mastschweinen erstmals das Aufbrechen des Konflikts zwischen Tierwohl/Tiergesundheit und Umweltschutz: Emissionen werden gemindert bei gleichzeitiger Deckung der Ansprüche an das Tierwohl. Das System kann auch für die Ferkelaufzucht und die Haltung von Sauen fortentwickelt werden.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

*Die Ergebnisse dieses Projektes wurden wie folgt präsentiert:*

- IBE Ingenieurbüro Dr. Eckhof GmbH, 15. Informationsveranstaltung, Der Schweinestall ohne Mist und Gülle – mit geringen Emissionen und tiergerecht, 04.04.2019, Berlin
- DLG-Fachtagung 2019 – Nachhaltige Schweinehaltung – Indikatoren und Stallbaulösungen für Umweltwirkungen und Tiergerechtheit, Der Schweinestall ohne Mist und Gülle: Ein Konzept zur Auflösung des Zielkonflikts zwischen Emissionsminderung und Tiergerechtheit?, 19.06.2019, Frankfurt
- 131. VDLUFA Kongress, Tierwohlstall ohne Mist und Gülle mit Ammoniak-Niedrigstemissionen – Konzept und erste Ergebnisse zur emissionsarmen Behandlung der Exkremente, 10.-13.09.2019, Gießen
- Deutsche Umwelthilfe, Fachgespräch Tier- und Immissionsschutz vereinbaren; Tierwohlstall mit Niedrigstemissionen – Konzeptstudie und erste Ergebnisse, 22.01.2020, Berlin
- UN Task Force on Reactive Nitrogen (TFRN)/Expert Panel on Mitigating Agricultural Nitrogen (EPMAN): High animal comfort and low emissions in a new housing system for pigs – conceptual study and first results from pilot farms and laboratory experiments, 02.10.2019, Brüssel
- Konferenz der International Nitrogen Initiative (INI), High animal comfort and low emissions in a new housing system for pigs - conceptual study and first results from pilot farms and laboratory experiments, 03. – 07.05.2020, Berlin – wegen Corona Pandemie auf 2021 verschoben
- Eurotier 2018

### *Bisherige Veröffentlichungen*

- 131. VDLUFA Kongress, Tierwohlstall ohne Mist und Gülle mit Ammoniak-Niedrigstemissionen – Konzept und erste Ergebnisse zur emissionsarmen Behandlung der Exkremente, 10. –13.09.2019, Gießen
- DLG Mitteilungen 9/2019, Wie lassen sich Kot und Harn trennen?

## Inhalt

Tabellenverzeichnis .....	3
Abbildungsverzeichnis .....	3
Abkürzungsverzeichnis .....	5
1 Ausgangslage / Einleitung .....	10
1.1 Viehbestände und deren Entwicklung in Deutschland .....	10
1.2 Mit der Tierhaltung und Güllewirtschaft verbundene Umweltprobleme .....	10
2 Projektziele .....	13
3 Fachlich-technischer Hintergrund .....	14
3.1 Maßnahmen zur Emissionsminderung bei der Haltung von Mastschweinen .....	14
3.2 Ställe mit freier Lüftung und getrennter Ableitung von Urin .....	16
3.3 Kühlsysteme für freigelüftete Ställe.....	17
3.4 Kot-Harn Trennung als Emissionsminderungsmaßnahme.....	17
3.5 Eigenschaften von Kot und Urin von Schweinen im Vergleich zum Humanbereich.....	18
3.6 Stabilisierung und Nährstoffrückgewinnung von getrennt gesammeltem Urin - Ergebnisse aus dem Humanbereich .....	22
3.6.1 Stabilisierung von Harnstoff .....	22
3.6.2 Verfahren zur Aufkonzentration (Volumenreduzierung) .....	23
3.6.3 P-Rückgewinnung .....	24
3.6.4 N-Rückgewinnung.....	25
4 Beschreibung des neu entwickelten Systems zur emissionsarmen Haltung von Mastschweinen und zur weitergehenden Behandlung der Exkremete .....	25
4.1 Vorgehen bei der Auswahl und Entwicklung des Stallsystems.....	25
4.2 Die wichtigsten Komponenten des Haltungssystems .....	26
4.3 Anpassungen und Weiterentwicklungen des Stallsystems Nature-Line im Rahmen des DBU-Projekts.....	29
4.4 Komponenten der Kot-Harn-Trennung sowie der Weiterverarbeitung der Exkremete	31
4.4.1 Berechnung der Ausscheidung von Kot und Harn.....	31
4.4.2 Möglichkeiten der praktischen Umsetzung der Kot-Harn-Trennung und der Exkrementaufbereitung.....	32
4.5 Einsatzmöglichkeiten des Stall-, Kot-Harn-Trenn- und Urinbehandlungssystems .....	38
5 Tierwohlkomponenten.....	39

6	Energiebedarf für Heizung und Kühlung und Energiebereitstellung über Photovoltaik ...	39
7	Ökonomie .....	42
8	Problematik Genehmigungsverfahren .....	46
9	Innovationen und deren Potenziale für die Mastschweinehaltung.....	47
10	Forschungs- und Entwicklungsbedarf .....	48
11	Schutzrechte.....	50
12	Vorträge, Veröffentlichungen, Öffentlichkeitsarbeit .....	50
13	Folgeprojekte.....	51
14	Danksagung .....	51
15	Literatur.....	51

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strategien zur Minderung der Ammoniakemissionen in der Mastschweinehaltung .....	14
Tabelle 2: Mengen an erfasstem Kot und Urin mit verschiedenen Trennsystemen .....	18
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von Schweineurin .....	20
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von Schweinekot (Frischsubstanz) .....	21
Tabelle 5: Kalkulatorische Anfallmengen und Gehalte an Kot und Harn.....	32
Tabelle 6: Investitionsbedarf nach Baugruppen .....	44
Tabelle 7: Leistung, Kosten, Erfolgsgrößen (Ferkel 70 € / SG 1,80 €) .....	45

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt Stallgebäude mit Trauf-First-Lüftung – Innenliegend der gekapselte, beheiz- und kühlbare Komfortbereich mit Gleichdrucklüftung und Lüftungsclappen. Kühlung über Unterflurgrube und Kühlkissen/Coolpad. Windschutznetze zur Klimaregulation. ....	26
Abbildung 2: Querschnitt Stallgebäude mit Flachdach (alternativ zu Abb. 1) – Innenliegend der gekapselte, beheiz- und kühlbare Komfortbereich mit Gleichdrucklüftung und Lüftungsclappen. Kühlung über Unterflurgrube und Kühlkissen/Coolpad. Windschutznetze zur Klimaregulation. ....	27
Abbildung 3: Grundriss Stallgebäude- innenliegender Komfortbereich mit verstellbarer Buchtenwand zur Anpassung an das Tierwachstum, außen umlaufender Treib- und Kontrollgang. Überdacht und nicht klimatisiert sind Aktivitäts-/Fressbereich und Mistenbereich .....	28
Abbildung 4: Grundriss der Bucht mit klimatisierbarer Komfort- sowie Fress-, Aktivitäts- und Mistenzone.....	28
Abbildung 5: Gekapselte und temperierte Komfortzone mit Stroheintrag.....	29
Abbildung 6: Temperierte Zone mit Luftzuführung über Gitterrosten.....	30
Abbildung 7: Vibrationsschieber .....	33
Abbildung 8: Querschnitt des Ausräum- und Stabilisierungssystems für Kot und Harn mit Mistschieber, Rückspüleleitung und Sprühleitung zur Stabilisierung von Urin.....	33
Abbildung 9: Prinzipskizze des Exkrement-Behandlungssystems mit Trennsystemen, Wechselcontainer für Kot, Reaktionsbehälter und Zwischenlager für Urin .....	34
Abbildung 10: Schema zur Beschreibung des Grundprinzips des Exkrement-Behandlungssystems.....	35
Abbildung 11: Prinzipskizze zur Urinstabilisierung und Weiterbehandlung.....	37
Abbildung 12: System zur oberflächigen Sammlung von Kot .....	37
Abbildung 13: Errechnetes monatliches Stromerzeugungsprofil einer auf dem Konzeptstall installierten Photovoltaikanlage mit 1500 m <sup>2</sup> Modulfläche .....	41

Abbildung 14: Strombedarf für die Heizung und für die Kühlung über Wärmepumpen in Abhängigkeit der durchschnittlichen Aufenthaltshäufigkeit der Tiere im Komfortbereich (das grüne Oval markiert das vermutete, durchschnittliche Lastprofil über den Jahresverlauf) .....	42
Abbildung 15: Erfolgsgrößen, Kostendeckung und anzustrebende Gewinne für den StoMuG bei variierenden Verkaufspreisen im BZ Mastschweine, 1500 MP, (Ferkel 70 €/ SG 1,8 €/ Lohn 20 €/h) .....	46

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AKH</b>	Arbeitskraftstunde
<b>AZB</b>	Arbeitszeitbedarf
<b>B</b>	Belgien
<b>BGA</b>	Biogasanlage
<b>BMEL</b>	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
<b>BVT</b>	Best verfügbare Technik
<b>BZ</b>	Betriebszweig
<b>Ca</b>	Calcium
<b>CSB</b>	Chemischer Sauerstoffbedarf
<b>DK</b>	Dänemark
<b>DLG</b>	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>EKfL</b>	Einzelkostenfreie Leistung
<b>et al.</b>	et alii, et aliae und andere
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>g</b>	Gramm
<b>GIRL</b>	Geruchsimmissions-Richtlinie
<b>GL</b>	Gleichung
<b>GVE</b>	Großvieheinheiten
<b>h</b>	Stunde
<b>ha</b>	Hektar
<b>HAP</b>	Hydroxylapatit
<b>HTC</b>	Hydrothermale Karbonisierung
<b>K</b>	Kalium
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>KTBL</b>	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
<b>kWh</b>	Kilowattstunde
<b>l</b>	Liter
<b>LF</b>	Landwirtschaftliche Nutzfläche
<b>LG</b>	Lebendgewicht
<b>m</b>	Meter
<b>Mg</b>	Magnesium
<b>Mio</b>	Millionen
<b>MP</b>	Mastplatz
<b>m<sup>2</sup></b>	Quadratmeter
<b>m<sup>3</sup></b>	Kubikmeter
<b>N</b>	Stickstoff
<b>NfE</b>	Stickstofffreie Extraktstoffe
<b>NL</b>	Niederlande
<b>OCP</b>	Octakalziumphosphat
<b>OM</b>	organische Masse
<b>P</b>	Phosphor
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>RL</b>	Richtlinie

<b>SG</b>	Schlachtgewicht
<b>spezif.</b>	spezifisch
<b>StoMuG</b>	Stall ohne Mist und Gülle
<b>t</b>	Tonnen
<b>TM</b>	Trockenmasse
<b>TP</b>	Tierplatz
<b>u. a.</b>	unter anderem
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
<b>VQ</b>	Verdauungsquotient
<b>W</b>	Watt
<b>WBA</b>	Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz
<b>XA</b>	Rohasche
<b>z. B.</b>	zum Beispiel

## Zusammenfassung

Schweinehaltung wird in Deutschland überwiegend auf vollperforierten Böden in vollklimatisierten Ställen betrieben. Die entstehende Gülle wird unter dem Stall gelagert (Gülle Keller) oder über Kanäle und Leitungen in einen außenliegenden Güllebehälter verbracht und nach entsprechender Lagerzeit von dort auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausgebracht.

Die bisherigen Haltungssysteme in vollklimatisierten Ställen mit Güllesystem sind durch hohe Ammoniak- und Methanemissionen im Stall und im Lager, sowie durch weitergehende Ammoniak- und Lachgasemissionen nach der Ausbringung der Gülle gekennzeichnet. Vor allem Methan- und Lachgasemissionen werden u. a. durch die Vermischung von Kot und Harn (sowie Futter- und Einstreuresten) zu Gülle hervorgerufen. In der Gülle wird der mit dem Urin ausgeschiedene Harnstoff hydrolysiert und in Ammoniak, Kohlendioxid und Wasser umgewandelt, dazu ist der Kontakt mit dem im Kot befindlichen Enzym Urease erforderlich. Die Methanemissionen im Stall und im Lager entstehen durch den weitgehend anaeroben Abbau der im Kot vorhandenen organischen Substanz. Verbunden mit dem Abbau organischer Substanz sind Faulgerüche, die über die Abluft in die Umgebung emittiert werden.

Auch die Festmistssysteme für die Haltung von Schweinen emittieren bereits im Stall, aber auch im Lager erhebliche Mengen an Ammoniak, Methan und Lachgas. Zudem stehen Festmistssysteme nicht immer im Einklang mit den thermoregulatorischen Bedürfnissen der Tiere, da diese in der wärmeren Jahreszeit kühlende Buchtenelemente statt warmer Mistmatratzen bevorzugen. Volleingestreuete Systeme und besonders Tiefstallsysteme bieten den Tieren jedoch hierzu keine Alternative, die ihren Ansprüchen gerecht wird.

Zielsetzung des DBU Vorhabens war daher die Entwicklung eines Schweinehaltungssystems, welches einerseits umwelterhebliche und klimarelevante Emissionen drastisch reduziert und dabei andererseits durch eine besonders tiergerechte Haltung gesellschaftspolitischen Ansprüchen an eine moderne Tierhaltung genügt.

Mit den bisherigen Entwicklungen für die Haltungssysteme auf Grundlage von Flüssig- oder Festmistverfahren können nach Auffassung des Verfassers diese Ansprüche nicht erfüllt werden (siehe auch Wahmhoff 2012).

Das neu entwickelte Verfahren basiert daher auf der Trennung von Kot und Harn bereits im Stall mithilfe eines optimierten und automatisierten Unterflur-Mistschiebersystems und eines automatisierten Oberflur-Kotsammelsystems, welches zusätzlich zum Unterflursystem optional eingesetzt werden kann. Der Kot (ggfs. versetzt mit Einstreuresten) wird nicht wie üblich gelagert, sondern wird sofort weiterverarbeitet und dient entweder als Gärsubstrat für Biogasanlagen oder wird über Karbonisierungs- bzw. Trocknungsverfahren stabilisiert.

Der abgetrennte Harn wird schnell aus dem Stall ausgeräumt und darüber hinaus bereits im Stall mit Kalkhydrat, Schwefelsäure oder synthetischen Substanzen soweit stabilisiert, dass über eine Blockierung der Ureaseaktivität die Bildung von Ammonium und Ammoniak und die daraus folgende Ammoniakemission weitestgehend verhindert wird. Außerhalb des Stalles werden verbliebene Feststoffe vom Urin abgetrennt, der Urin wird stabilisiert und in das Urinlager überführt. Als weitere Verfahrensstufe können die Urinnährstoffe durch gezielte Fällungsreaktionen aus der Flüssigkeit entfernt und optional der Urin mittels Membran- oder Eindampftechnik aufkonzentriert werden, so dass Brauchwasser oder vorflutfähiges Wasser entsteht.

Die Haltung der Mastschweine erfolgt in einem Außenklimastall, der mit dem Kot- und Harnbehandlungssystem kompatibel ist und um mehrere baulich-technische Komponenten weiterentwickelt wurde. Der Stall ist gekennzeichnet durch eine symmetrische und isolierte

Satteldachkonstruktion (wahlweise Flachdachkonstruktion) von ca. 23 m Breite mit Außenklimabedingungen durch offene Seitenwände mit Windschutznetzen. Die 11 m langen und 2,5 m breiten, weitgehend planbefestigten Buchten weisen gebäudemittig einen gekapselten und klimatisierten Komfortbereich auf (beheizbar im Winter und kühlbar im Sommer), in dem Stroh als Beschäftigungsmaterial sowie Raufutter vollautomatisiert zugegeben werden kann. Der perforierte (Toiletten-) Bereich zum Absetzen von Kot und Harn befindet sich jeweils am Rand der Bucht an den Gebäudeaußenwänden. Dazwischen ist die Aktivitäts- und Fresszone mit Automaten für Konzentrat- und Raufutter sowie mit Beschäftigungselementen angeordnet.

In diesem „Stall ohne Mist und Gülle (StoMuG)“ wird durch die Behandlungskaskaden von Kot und Harn die Entstehung von Gülle und Mist verhindert. Damit einhergehend werden Emissionsminderungen im Vergleich zu vollperforierten und klimatisierten Haltungssystemen von Ammoniak um mindestens 70 %, Methan, durch die weitgehende Verhinderung von Faulungsprozessen, um 90 % sowie Geruch um 50-70 % erwartet.

Das System vereint die Merkmale einer besonders tiergerechten Haltung mit den Anforderungen an hohe Umweltschutzansprüche. Emissionen aller relevanten Gase werden signifikant und drastisch auf ein Niveau reduziert, wie es bisher nur mit Abluftreinigung erreichbar ist. Gleichzeitig wird den Tieren umfangreiches Platzangebot (zur Ausbildung von Funktionsbereichen) mit Zugang zur Außenluft und Umweltreizen gewährt. Kühlen und Aufwärmen kann bedarfsgerecht in der gekapselten Innenbucht erfolgen, daher legen die Tiere keine emissionsträchtigen Exkrementsohlen an.

Somit ermöglicht das Gesamtsystem bei der Haltung von Mastschweinen erstmals das Aufbrechen des Konflikts zwischen Tierwohl/Tiergesundheit und Umweltschutz: Emissionen werden drastisch gemindert bei gleichzeitiger Deckung der Ansprüche an das Tierwohl. Das System kann auch für die Ferkelaufzucht und die Haltung von Sauen fortentwickelt werden.

## Summary

In Germany, pig rearing is predominantly practised with fully perforated pens in climatically controlled buildings. Any slurry generated is then stored underneath the slats (slurry deep pit) or transferred via channels and pipes to an external slurry tank and, after an appropriate storage period, spread from there on agricultural land.

The existing housing systems in climatically controlled buildings with slurry systems are characterised by high ammonia and methane emissions both in the building and in the storage facility, as well as by further ammonia and nitrous oxide emissions following the spreading of the slurry in the field. Methane and nitrous oxide emissions in particular are caused, among other things, by mixing of manure and urine (and feed / bedding residues), resulting in liquid or solid manures. Urea excreted with urine is hydrolysed in the slurry and converted into ammonia, carbon dioxide and water. This requires contact with the enzyme urease present in the faeces. The methane emissions in the pig rearing and in the storage facilities are caused by the largely anaerobic decomposition of the organic matter that is present in the manure. The decomposition of organic matter is accompanied by malodours, which are emitted into the environment via the exhaust air.

Littered or solid manure systems for housing pigs also emit considerable amounts of ammonia, methane and nitrous oxide already in the house, but also in the store. In addition, farmyard manure systems are not always in line with the thermoregulatory requirements of the animals, as they prefer cooling elements in pens instead of warm farmyard beddings during the warmer season. Fully bedded systems and especially deep litter systems do not offer an alternative.

The objective of the DBU project was therefore the elaboration of a new pig housing system which on the one hand drastically reduces environmentally and climate-related emissions and on the other hand meets the sociopolitical expectations of an animal-friendly livestock rearing system.

According to the authors' opinion, these requirements cannot be met with the present concepts for housing systems based on the currently practised liquid or solid manure systems (see also Wahmhoff 2012).

The innovative system is therefore based on an inhouse segregation of faeces and urine using an optimised and automatised underfloor manure scraper system and an automatised abovefloor dung collection system, which is optionally available in addition to the underfloor system. The faeces (eventually mixed with litter residues) will not be stored as usual, but will be processed immediately and either serve as fermentation substrate for biogas plants or will be stabilized by composting, carbonisation resp. drying processes.

The separated urine is quickly removed from the house and, in addition, is stabilised in the house with hydrated lime, sulphuric acid or synthetic agents to such an extent that the formation of ammonium and ammonia and the resulting ammonia emission is prevented as far as possible by blocking the urease activity. Outside the stable, remaining solids are separated from the urine, the urine is stabilised and transferred to the urine storage tank. As a further process stage, the urine nutrients may be removed from the liquid by specific precipitation reactions and optionally the urine may be concentrated by means of membrane or evaporation technology to produce process water or dischargeable water.

The fattening pigs are kept in an outdoor climate house, which is compatible with the faeces and urine segregation system and has been further developed by adding several constructional and technical devices. The barn is characterised by a symmetrical and insulated saddle roof construction (optionally flat roof construction) of approx. 23 m width with outdoor climate conditions through open side walls with wind protection netting.

The 11 m long and 2.5 m wide, largely paved (nonperforated) pens include an encapsulated and air-conditioned comfort area in the middle of the building (heatable in winter and coolable in summer), in which straw can be added fully automatically as manipulable material and roughage. The perforated (toilet) area for settling faeces and urine is located at the edge of the pen at the exterior walls of the building. The activity and feeding area with automatic feeders for concentrate and roughage as well as manipulable elements is located in between.

In this "swinehouse without solid or liquid manure (StoMuG)" the processing cascades of faeces and urine prevent the formation of slurry, farmyard manure and liquid seepage. In comparison to fully perforated and climatically controlled housing systems, mitigation of ammonia emissions by at least 70 %, of methane by 90 % due to the prevention of digestion processes and of odour by 50-70 % is expected.

The system combines the attributes of very animal friendly livestock rearing with the requirements of high environmental protection goals. Emissions of all relevant gases are significantly and drastically reduced to a level that could previously only be achieved with exhaust air purification. At the same time, the animals are offered an extended range of space (for the formation of functional areas) with access to fresh air and environmental stimulants. Cooling and warming up can take place in the encapsulated interior compartment, therefore the animals do not create high-emission excrement wallows in the hot season.

Thus, this system for keeping fattening pigs enables the conflict between animal welfare/animal health and environmental protection to be resolved for the first time: emissions are drastically reduced while at the same time animal welfare requirements are met. The system may also be adapted for piglet and sow rearing.

## 1 Ausgangslage / Einleitung

### 1.1 Viehbestände und deren Entwicklung in Deutschland

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland ca. 26 Mio. Schweine und 11,8 Mio. Rinder gehalten. Seit den frühen 1990er Jahren vermindern sich die Rinderbestände kontinuierlich von 16 Mio. auf 13 Mio. im Jahr 2009 (Schultheiß et al. 2010), im Jahr 2019 waren es noch 11,8 Mio. Die Zahl der Schweine stieg zunächst zwischen 1995 und 2009 um 12 % auf 27 Mio. an und unterliegt seitdem leichten Schwankungen mit einem Trend zur Abnahme (26 Mio. in 2019).

Auf Bundeslandebene wuchsen die Viehbestände in Regionen mit hohen Viehbestandsdichten weiter an bei gleichzeitiger Verringerung der Anzahl der viehhaltenden Betriebe. Die Zahl der Schweinehalter in Deutschland hat sich besonders dramatisch verändert, mittlerweile haben 40 % der Mastbetriebe Bestände von mehr als 1 000 Schweinen und 78 % der Mastschweine befinden sich in dieser Größenklasse. In der Betriebsgrößenklasse mit mehr als 5 000 Tieren befinden sich 2 % aller schweinehaltenden Betriebe und 20 % der Tiere. In den Regionen mit geringen Viehbeständen kam es wiederum zum Viehbestandsabbau. Die hohen Viehbestände konzentrieren sich auf wenige Regionen in Deutschland. Vor allem im Nordwesten (Weser Ems-Region, Münsterland ...) und im Süden von Bayern und Baden-Württemberg gibt es Landkreise mit Viehbeständen von bis zu 3,6 GVE/ha. In den übrigen Regionen Deutschlands liegen die Viehbestandsdichten überwiegend zwischen 0,3 und 0,9 GVE/ha.

Erhebungen des Statistischen Bundesamtes und eigenen Recherchen zufolge (Schultheiß et al. 2010) werden mehr als 90 % der Schweine in strohlosen Stallsystemen gehalten, der Anteil der Rinder in strohlosen Systemen ist etwas geringer. Von den insgesamt in Deutschland anfallenden 224 Mio. t Wirtschaftsdünger entfallen auf Rindergülle etwa 107 Mio. t, auf Schweinegülle 30 Mio. t, auf Gärreste und sonstige flüssige Wirtschaftsdünger 67 Mio. t und auf Festmiste 20 Mio. t (Destatis, 2015). Die Ammoniakemissionen der Schweinehaltung machen etwa 19 % der landwirtschaftlichen Emissionen aus, gemessen am Wirtschaftsdüngeranfall trägt also die Schweinehaltung überproportional zu den nationalen Emissionen bei.

### 1.2 Mit der Tierhaltung und Güllewirtschaft verbundene Umweltprobleme

#### Stickstoff-Überschüsse und Ansätze zur Minderung

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen bezeichnet die zu hohen Einträge von Stickstoffverbindungen als eines der großen ungelösten Umweltprobleme unserer Zeit. Das Thema würde eine ähnliche Brisanz wie der Klimawandel und der Verlust der Biodiversität besitzen, zumal es mit diesen Großthemen der Umweltpolitik eng verwoben ist. Im Sondergutachten „Stickstoff - Lösungsansätze für ein drängendes Umweltproblem“ (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2015) erfolgt eine gesamthafte Bestandsaufnahme der Stickstoffproblematik und es werden Handlungsvorschläge für die Landwirtschaft, den Gewässerschutz, den Naturschutz, die Luftreinhaltung und den Verkehrssektor entwickelt. Insgesamt empfiehlt der SRU eine hochrangige und besser integrierte Behandlung des Themas in Bund und Ländern.

Nach Häußermann et al. (2019) umfasst die N-Zufuhr zur landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) in Deutschland im Mittel der Jahre 2015 bis 2017 insgesamt 226 kg N/ha LF, wovon 104 kg N/ha LF mit Mineraldüngung und 89 kg N/ha LF mit Wirtschaftsdüngern (Gülle, Mist, Jauche, Gärreste) ausgebracht werden. Dem steht eine Abfuhr mit Ernteprodukten von 149 kg N/ha LF entgegen, woraus ein Überschuss der N-Flächenbilanz von 78 kg N/ha LF resultiert. Die Spannweite der N-Flächenbilanzüberschüsse der Kreise (Mittel 2015 bis 2017) reicht von 26 kg N/ha LF bis 162 kg N/ha LF. Für 84 Kreisregionen (entsprechend 30 % der LF) wird ein Überschuss  $\leq 55$  kg N/ha LF berechnet,

In 58 Kreisregionen welche durch hohe Viehbestandsdichten und/oder intensive Biogaswirtschaft (23 % der LF) gekennzeichnet sind, beträgt der Überschuss über 100 kg N/ha LF. Für eine Reihe von Minderungsoptionen wurde die potenzielle Reduktion des N-Flächenbilanzüberschusses in den Kreisen berechnet. Wirksamste Maßnahme wäre demnach eine Verbesserung der Ausnutzung des N aus Wirtschaftsdüngern von 60 % auf 80 %, wodurch der Überschuss in Deutschland insgesamt durchschnittlich um 15,6 kg N/ha LF sinken würde, auf die Hot-Spot-Regionen mit hohen Anteilen an organischen Düngern übertragen, können dort Verringerungen der Überschüsse von 30 kg/ha und mehr erreicht werden.

Die Auswertungen von Bach et al. (2019) zeigen zudem, dass trotz regulatorischer Eingriffe und umfangreicher Forschungsaktivitäten die Stickstoff-Überschüsse in den letzten 3 Jahrzehnten nicht oder nur geringfügig verändert werden konnten. Insbesondere die Effizienz der Tierhaltung mit deren Leittechnologie „Flüssigmistwirtschaft“ hat nur bedingt Fortschritte hinsichtlich der N-Effizienz gemacht (Döhler 2019).

Die oben beschriebenen Erkenntnisse einbeziehend, muss hinterfragt werden, ob sich bei den gegenwärtigen Stall- und Wirtschaftsdüngertechnologien die Verlustquellen im Stall, bei der Lagerung, dem Transport oder der Ausbringung zufriedenstellend beseitigen lassen und ob nach der Güllagerung ein Produkt zur Verfügung steht, das aus Sicht der Pflanzenernährung geeignet ist, passende Nährstoffverhältnisse und hohe Nutzungseffizienzen zur Verfügung zu stellen. Die Tatsache, dass bei der gängigen Managementpraxis im Stall und bei der Lagerung bereits 40 % des ausgeschiedenen N über den Ammoniak-Emissionspfad verloren gegangen sind und der für die unmittelbare Düngungswirkung weniger wertvolle organisch gebundene N im Verhältnis in der Gülle zunimmt, muss ein Überdenken der derzeitigen Form der Güllewirtschaft nach sich ziehen.

### **Emissionspfade und Umweltwirkungen reaktiver Stickstoffverbindungen**

Nicht von Pflanzen aufgenommene reaktive Stickstoffverbindungen unterliegen aufgrund ihrer einfachen Transformierbarkeit und ihrer hohen Mobilität der Gefahr, auf verschiedenen Austragswegen in die Umwelt zu gelangen:

- Auswaschung von Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) ins Grundwasser
- Austrag von Nitrat durch Erosion und Auswaschung in Oberflächengewässer
- Gasförmige Entbindung von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) in die Atmosphäre.

Durch die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen werden natürliche Stoffkreisläufe und Ökosystembeziehungen empfindlich gestört. Die Nitratgehalte des Grundwassers steigen, was zu einer Minderung der Qualität des Trinkwassers führt. Es kommt zu Eutrophierungen und Versauerungen von Ökosystemen und damit einhergehend zur Verminderung der biologischen Vielfalt. Weiterhin führen erhöhte Emissionen von Lachgas zu einer zusätzlichen Verschärfung des Klimawandels. Zudem sind gasförmige Stickstoffverbindungen Vorläuferstoffe von bodennahem Ozon und sekundären Feinstäuben und damit ein Risiko für die menschliche Gesundheit. Erhöhte Ammoniak- und Ozonkonzentrationen in der Atmosphäre können zu Schädigungen empfindlicher Pflanzen führen. In die Atmosphäre eingetragenes Ammoniak gelangt über nasse und trockene Deposition wieder in terrestrische oder aquatische Ökosysteme. Unabhängig vom Niveau der Stickstoffzufuhr verändert sich die Zusammensetzung der Biozöosen. Die an nährstoffarme Bedingungen angepassten Pflanzenarten werden von nitrophilen Arten verdrängt. Damit verringert sich auch die Vielfalt der daran gebundenen Tierarten. In einer breit angelegten Auswertung verschiedener wissenschaftlicher Experimente und Felderhebungen haben Stevens et al. (2004) errechnet, dass mit steigender Stickstoffdeposition die Zahl an Pflanzenarten in den untersuchten

Flächen um eine Art je 2,5 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr abnimmt. Bezogen auf die durchschnittliche europäische Stickstoffdeposition entspricht dies einem Rückgang des Artenreichtums um 23 %.

### **Lösungsansätze zur Verringerung des Stickstoffsaldos**

Nach Wahmhoff 2012 sind nur solche Lösungen nachhaltig, die ohne Minderung der Flächenerträge erreichbar sind, denn zusätzlicher Flächenbedarf führt zu einem verstärkten Landnutzungswandel und damit zu anderen, vielschichtigen Umweltproblemen. Die Erzeugung von reaktivem Stickstoff im Pflanzenbau über die symbiotische N-Bindung kann daher keine flächendeckende Lösung bieten. Vielmehr ist eine Gesamtbetrachtung der Stickstoffkaskaden notwendig, die letztlich dazu führen muss, eine Vielzahl von Maßnahmen zu ergreifen, welche bei möglichst optimaler Versorgung der Pflanzen die unerwünschten Stickstoffverluste minimieren. In der Studie „The European Nitrogen Assessment“ (Sutton et al. 2011, Oenema et al. 2011) werden hierfür die Minderungsmaßnahmen in der Tierhaltung und der Wirtschaftsdünger als prioritär herausgestellt

### **Phosphoreinträge**

Neben dem Beitrag zur N-Problematik sind aus Gründen des Umweltschutzes und des Ressourcenschutzes Phosphoreinträge in Böden durch die moderne Tierhaltung zu berücksichtigen, denn Phosphor ist ein nicht erneuerbarer Rohstoff. Nach aktuellem Kenntnisstand wurden die globalen Phosphatreserven auf 67 Milliarden Tonnen geschätzt, bei gleichbleibender Förderung können diese den weltweiten Bedarf über 320 Jahre decken (BGR, 2013). Die Landwirtschaft ist daher allein aus Gründen des Ressourcenschutzes gefordert, unnötige P-Einträge in Böden und Gewässer zu minimieren, darüber hinaus müssen Überversorgungen vermieden werden, um Austräge in Grund- und Oberflächengewässer gering zu halten.

### **Klimaschutz**

Auch Klimaschutzaspekte müssen in die Überlegungen für zukünftige Strategien mit einbezogen werden. Ein Mastschweineplatz erzeugt nach Groenestein et al. (2012) etwa 5,8 bis 7,7 kg Methan und etwa 0,02 kg Lachgas im Stall und bei der Güllelagerung. Zwar sind die Klimagasemissionen im Vergleich zur Haltung von Rindern vergleichsweise gering, im Gegensatz zur Haltung von Wiederkäuern (deren Methanemissionen hpts. Verdauungsvorgängen zuzuordnen sind) ließen diese sich aber durch angepasstes Wirtschaftsdüngermanagement signifikant mindern.

### **Tierschutz**

Unabhängig von den Umwelt-, Ressourcen- und Klimaschutzanforderungen sind die zunehmenden gesellschaftspolitischen Forderungen an eine Veränderung der Haltung von Nutztieren zu sehen, die jedoch in die Neuentwicklung von Stallsystemen mindestens gleichwertig einzubeziehen sind. Der Wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik des BMEL hat in seinem Gutachten „Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung“ für den Bereich des Tierschutzes folgende wichtige Punkte als Leitlinien für die Entwicklung einer zukunftsfähigen Nutztierhaltung gefordert.

- Zugang zu verschiedenen Klimazonen wie dem Außenklima
- mehrere Funktionsbereiche in den Ställen mit verschiedenen Bodenbelägen,
- mehr artgemäßes Beschäftigungsmaterial,
- ausreichend Platz für jedes Tier,
- Verzicht auf Amputationen,
- Eigenkontrollen der Betriebe anhand von Tierwohlintikatoren,

- deutlich reduzierter Arzneimitteleinsatz,
- verbesserter Bildungsstand der Tierhalter/-pfleger (Sachkundenachweis),
- ein Monitoringsystem, in dem systematische Daten zum Tierschutz in der Landwirtschaft erfasst werden,
- Verringerung der Nährstoffausträge durch eine engagierte Reform der Düngegesetzgebung.

## 2 Projektziele

Zentrales Ziel des Vorhabens ist es, mit der Entwicklung eines Stallsystems die Ammoniakemissionen im Stall zu vermindern auf das Niveau von Ställen mit Abluftreinigungsverfahren, was einer Reduktion von mindestens 70 % gegenüber herkömmlichen, klimatisierten und vollperforierten Systemen entspricht. Zudem sollen Methan- und Lachgasemissionen signifikant gemindert werden.

Die weiteren Vorüberlegungen berücksichtigend, dass Flüssig- und Festmistverfahren auch zukünftig unbefriedigende Nährstoffeffizienzen aufweisen werden, sollen in diesem Stallsystem weder Gülle noch Mist entstehen (Stall ohne Mist und Gülle; StoMuG). Auch in den der Stallhaltung folgenden Prozessen soll eine Trennung der Ausscheidungen konsequent beibehalten und eine weitergehende Behandlung der Fraktionen ermöglicht werden. Dadurch wird die Kontrolle der Emissionen im Stall und dem Stall nachfolgend ermöglicht, so dass die Stickstoffverluste in der gesamten Prozesskette bis zur Aufnahme durch Kulturpflanzen weitestgehend unterbunden werden.

Ein weiteres Ziel ist die Berücksichtigung und Einhaltung von Tierwohlkriterien, so dass das Stallsystem unter Einbeziehung der Ansprüche an Tiergerechtigkeit, Tiergesundheit, Klimaschutz, Umweltschutz, Ressourcenschutz und Arbeitsplatzqualität eine gesellschaftlich konsensfähige und langfristig zukunftsfähige Form der Tierhaltung repräsentiert. Hierzu zählen die Kriterien erhöhter Platzbedarf, Einhaltung des Tierschutzgesetzes bzgl. Amputationen, weitgehender Verzicht auf Tierarzneimittel, Auslauf mit Zugang zu Frischluft und Sonnenlicht, organische Einstreu, Wühlmöglichkeit, Raufutterangebot, Gruppenfütterung, sonstiges Beschäftigungsmaterial.

### 3 Fachlich-technischer Hintergrund

#### 3.1 Maßnahmen zur Emissionsminderung bei der Haltung von Mastschweinen

Obwohl die Rinderhaltung in Deutschland, Europa und weltweit bei Weitem die höchsten Ammoniakemissionen verursacht, wurden in Europa besonders für Güllesysteme der Mastschweinehaltung Strategien zur Minderung der Ammoniakemissionen entwickelt (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Strategien zur Minderung der Ammoniakemissionen in der Mastschweinehaltung**

Minderungstechnik	Maßnahme	Minderungseffekt
Minderung N-Ausscheidung durch angepasste Fütterung	Mit angepasster Fütterung wird die Proteinzufuhr an den Bedarf der unterschiedlichen Leistungsstufen angepasst. Durch die Phasenfütterung wird der Proteingehalt im Futter fortwährend durch Veränderung der Futterkomponenten und durch Zugabe von essentiellen Aminosäuren angepasst (bis hin zur täglichen Anpassung).	10-40 %
Ausgasung vermindern	Durch regelmäßige und mehrmalige Entfernung der Gülle während der Haltungsperiode (Wechselstausystem, Vakuumsystem, Unterflurschieber, Spülung)	5-20 %
	Verringerung der Stalltemperatur durch kühle Zuluft (über Erdwärmetauscher, Kühlaggregate)	ca. 10 %
	Durch die Reduzierung von emittierenden Flächen im Güllekanal, z. B. Teilspaltenböden, getrennte gülle- und wasserführende Kanäle, durchlässige schwimmende Abdeckungen im Güllekanal, Kühlsysteme für Gülle im Güllekanal (Kühlleitungen, Kühlrippen) ...	20-60 %
	Durch Offenstallsysteme (bedingt durch niedrigere durchschnittliche Temperaturen und kleinere emittierende Oberflächen / Emissionsminderung nur, wenn Funktionsbereiche eingehalten werden)	33 %
	Durch Behandlung der Gülle (Güllezusätze) wie pH-Wert Absenkung durch Ansäuerung, mineralische oder organische Sorptionsträger, biologische Wirkstoffe	60 -70 % (nur Säure)
Abfangen von Ammoniak nach dessen Ausgasen	Durch die Verwendung von Abluftreinigungssystemen (in der Reihenfolge ihrer Effizienz: Chemowäscher, mehrstufige Bio-Chemowäscher, Biowäscher, Biofilter)	40 % Biofilter bis 90 % Chemowäscher
<b>Weitere Minderungstechniken</b>		
Blockierung der Ammoniakentstehung	Durch die Hemmung des Enzyms Urease, welches die Umwandlung des im Urin ausgeschiedenen Harnstoffs zu Ammoniak induziert (synthetische Ureaseinhibitoren)	ca. 60 %
	Durch Trennung von Kot und Harn im Stall	20-40 %

Zur Minderung von Ammoniakemissionen wurden in den vergangenen Jahrzehnten vor allem für Güllesysteme vielfältige Techniken entwickelt (Santonja et al., 2017). Neben den sehr effizienten Verfahren zur Anpassung der Eiweißernährung an den aktuellen Leistungsbedarf durch Phasenfütterungsverfahren, handelt es sich hierbei um Verfahren zur Reduzierung der emittierenden Oberfläche (Teilperforierung, Güllekanäle mit angeschrägten Wänden, Abtrennung von

Fäkalbereichen für Sauen), Systeme zur Güllekühlung, zur Güllespülung sowie zur Neutralisierung der Gülle und Bindung des Ammonium. Mit den genannten Systemen sind Minderungen von maximal 40-60 % der Emissionen möglich. Sie verbessern allerdings die Haltungsbedingungen nicht oder nur wenig. Höhere Emissionsminderungen werden erreicht durch die Abluftreinigungsverfahren, die je nach Ausführung 40-90 % geringere Emissionen zur Folge haben. Trotz der hohen Kosten für die Abluftreinigung haben sich diese Verfahren bisher am stärksten durchgesetzt, vor allem deshalb, weil sie keine Änderungen an den bestehenden Haltungssystemen erfordern. Auch die Abluftreinigungsverfahren liefern keinen Beitrag zur Verbesserung des Tierwohls.

Alle genannten Minderungsoptionen bergen jedoch den Nachteil, dass zwar Emissionen im Stall vermieden werden können, trotzdem die entstehende Gülle im Lager und bei der Ausbringung weiterhin hohes Emissionspotenzial aufweist. Abgesehen von den Luftwäschersystemen reichen die bisher verfügbaren Techniken für die Einhaltung der ambitionierten Luftreinhalte- Minderungsziele (EU-NEC- Richtlinie/Minderungsziele 2030) Deutschlands nicht aus. Lediglich durch die Ansäuerung von Gülle erfolgt eine Stabilisierung der Gülle bzw. des Güllestickstoffs, welche zur Verringerung des Emissionspotenzials über die gesamte Prozesskette (Lagerung aber besonders Ausbringung) bis zur Nutzung der Nährelemente im Pflanzenbau beiträgt.

Während vor allem in den Niederlanden, Dänemark und Belgien umfangreiche Implementierungen von vielen der genannten Techniken vorangetrieben wurden (Santonja et al., 2017), haben sich in Deutschland lediglich die Fütterungssysteme und in den letzten beiden Jahrzehnten -vor allem in Nordwestdeutschland- die Abluftreinigungssysteme durchgesetzt. Andere Minderungsmaßnahmen wie die Verkleinerung der Güllekanäle (NL, B, DK), die Ansäuerung von Gülle (DK) oder die Güllekühlung (NL, DK) spielen in Deutschland bisher keine Rolle.

In Deutschland wurden in den letzten beiden Jahrzehnten diverse Außenklimastallsysteme für Schweine entwickelt, die die Ausbildung von Funktionsbereichen (Liegen, Ruhen; Fressen, Bewegung, Beschäftigung; Misten) in den Buchten ermöglichen und die Emissionen mindern helfen sollen. Diese Techniken wurden zuletzt in Verbindung mit Unterflurschieber (oder Unterflurbandsystemen) für die Ausräumung von Kot und Harn weiterentwickelt, für letztere wurde eine moderate Minderung der Emissionen nachgewiesen. Insgesamt wird Außenklimahaltungssystemen ein Potenzial zur Emissionsminderung von bis zu 33 % zugesprochen, genauere Untersuchungen stehen hier noch aus.

Weiterhin sind in den letzten Jahren Pilotuntersuchungen zur Kot-Harn-Trennung im Stall erfolgt und Pilotställe mit Kot-Harn-Trennung errichtet worden, um in erster Linie Geruchsemissionen zu minimieren. Bei richtiger Betriebsweise (häufiges Räumen und schnelles Entfernen des Urins sind mit diesen Systemen Emissionsminderungen von 20-40 % gegenüber vollperforierten und zwangsgelüfteten Ställen möglich, die Effizienz der Trennung und die zuverlässige Abführung aus dem Stall vorausgesetzt. Nachteilig wirken sich bei diesen Systemen aus, dass sie ausnahmslos die getrennten Fraktionen nach Verlassen des Stalls wieder zu einem Güllegemisch zusammenführen, somit erneut Faulungsprozesse mit entsprechenden Emissionen induziert werden.

Gezielt zur Minderung von Ammoniakemissionen wurde in Deutschland ein synthetischer Ureasehemmstoff entwickelt, der die Ureaseaktivität und somit die Hydrolyse von Harnstoff zu Ammoniak, CO<sub>2</sub> und Wasser im Stall unterbinden soll. Der Minderungseffekt beträgt für Schweinestallungen auf Flüssigmistbasis ca. 50-60 %, der Wirkstoff ist noch nicht zur Anwendung in der Praxis freigegeben (SKWP, 2020).

Somit entsprechen die bisher entwickelten und praktizierten Stall- und Haltungssysteme für Mastschweine nur bedingt den Anforderungen an eine umweltverträgliche Tierhaltung. Da es für Festmistssysteme kaum Minderungstechnologien gibt, sind sowohl Güllesysteme als auch Festmistssysteme gekennzeichnet durch hohe Ammoniakemissionen im Stall, im Lager und nach der Ausbringung der entstandenen Wirtschaftsdünger. Luftwäscher/-filter sind zwar in ihrer

Reinigungsleistung mittlerweile auf sehr gutem Niveau und wirken am Standort der Anlage emissionsbegrenzend, jedoch sind die Gesamtemissionen über die Verfahrenskette in die Umwelt nicht oder kaum geringer. Bei Festmistverfahren (eingeschlossen Kompoststallverfahren) treten zusätzlich schwer beherrschbare Lachgasemissionen auf.

### 3.2 Ställe mit freier Lüftung und getrennter Ableitung von Urin

Ställe mit Kot-Harn-Trennung stellen im weiteren Sinn ein traditionelles Haltungssystem dar. Die meisten traditionellen Ställe für Rinder und Schweine basierten auf einem eingestreuten Haltungsverfahren, welches eine schnelle Ableitung des Urins zum Ziel hatte. Der Urin wurde in der Regel außerhalb des Stalles, häufig in einer geschlossenen Grube gelagert. Denn bereits Mitte des 19. Jahrhunderts wies der Agrikulturchemiker Carl Sprengel (1839) in seiner „Lehre vom Dünger“ darauf hin, dass das im Urin enthaltene Ammoniumcarbonat „Luftgestalt annimmt“, wenn „man Urin zu lange faulen lässt“.

In der Regel waren bis in die 1970er Jahre die Haltungssysteme in der Schweinehaltung durch Funktionsbereiche charakterisiert, wie in der dänischen Zweiflächenbucht. Aus Kosten- und Arbeitswirtschafts-Gründen wurden die traditionellen Haltungssysteme verdrängt und durch die vollperforierten Güllesysteme ersetzt. Zunächst waren in den 1960er und 70er Jahren noch Unterflurschieber verbaut worden, danach wurden ausschließlich Güllekanäle, Wechselstauverfahren oder Güllekeller gebaut. In den 1990er Jahren entstanden erneut Haltungssysteme mit planbefestigten Bereichen auf Festmistbasis mit freier Lüftung, auch solche mit nur teilweise eingestreuten Bereichen (z. B. dem Schrägbodenstall, dessen Design an traditionellen Verfahren aus dem frühen 20. Jahrhundert mit gepflasterten Schrägböden mit Urinrinnen ausgerichtet wurde). Weiterentwicklungen stellten die Kistenställe und Pigportställe zum Ende des vergangenen Jahrtausends dar. Bei den Systemen hat sich gezeigt, dass die Tiere den Mistbereich am besten in Längsbuchten und in kleineren Gruppen einhalten.

Quadratische oder rechteckige Buchten mit geringem Breite-/Tiefe-Verhältnis stellten sich in niederländischen Versuchen eher als nachteilig heraus. Dagegen zeigte sich dort im Rahmen des Starplus-Stallkonzepts, dass Längsbuchten mit außenliegendem Mistbereich das Reinlichkeitsverhalten der Tiere fördern (Verdoes, WUR Wageningen, 2017).

Unabhängig vom Entmistungsverfahren selbst tritt bei all diesen Systemen immer wieder das Problem der Verschmutzung der Liegeflächen mit Kot und Harn durch die Tiere auf, insbesondere bei hohen Temperaturen, bei stickigen Bedingungen und im letzten Drittel der Mastperiode. Die Tiere nutzen dann den eigentlichen „Wohlfühlbereich“ durch das Anlegen von Exkrementsohlen. Die Geruchs- und Ammoniakemissionen können bei dieser Art von „Fehlnutzung“ des planbefestigten Liegebereichs deutlich höher ausfallen als in ordnungsgemäß betriebenen Vollspaltensystemen mit Zwangslüftung. Die potenziellen, emissionsmindernden Vorteile der strukturierten Stall- und Buchtensysteme werden so ins Gegenteil verkehrt und die durch die Fehlstellen freigesetzten Schadgase (Ammoniak, Methan, Kohlendioxid) führen auch vermehrt zu Erkrankungen der Atemwege bei den Nutztieren. Die Gefahr für Schädigungen der Atemwege besteht darüber hinaus auch für Arbeitskräfte, zusätzlich entsteht erheblicher Arbeitsaufwand zur Reinigung der Buchten, was für Landwirte ein ausreichendes Argument für den Verzicht auf solche Systeme darstellt.

### 3.3 Kühlsysteme für freigelüftete Ställe

Für eine hohe Funktionssicherheit eines Stallsystems mit kleiner Mistenzone muss ein „Wohlfühlbereich“, der räumlich deutlich abgesetzt ist, in der Bucht eingerichtet werden. Dieser Wohlfühlbereich muss sowohl immer über ausreichend Frischluft verfügen als auch der Thermoregulation der Schweine dienen, er muss daher sowohl beheizbar als auch kühlbar sein. Aus den Erfahrungen vergangener Jahrzehnte ist die effektive Kühlung der Komfortzone im Sommer von überragender Bedeutung für das Tierverhalten bezüglich des Absetzens von Exkrementen, da stickige Luft und Hitze das Anlegen von „Exkrementenstühlen“ begünstigen. Solche baulich-technischen Lösungen wurden bislang nicht entwickelt.

Für die Kühlung von Ställen stehen diverse Systeme zur Verfügung, diese sind Abluft-Luftwärmetauscher, Erdwärmetauscher, Flächenkühler und Evaporationskühler, die alle für vollklimatisierte Ställe erprobt wurden. Da in „klassischen“ Außenklimaställen die Kühlung vorzugsweise im Komfortbereich stattfinden muss, kommen nur Verfahren infrage, die punktgenaue Kühlung ermöglichen. Denkbar sind sowohl Flächenkühlungen (über Fußboden oder an den Wänden angebrachte Kühlplatten) als auch Zuluftkanäle, die gekühlte Frischluft in den Komfortbereich zuströmen. Flächenkühlungen sind nicht für diesen Zweck geeignet, da sie für die schnell wechselnden Ansprüche an die Thermoregulation der Tiere zu träge sind. Zudem ist mit Kondensationseffekten zu rechnen, die nasse Bodenfläche wiederum verleitet die Tiere zum Absetzen von Exkrementen. Auch Kühlplatten an den Wänden verursachen Kondensation, die zur Vernässung der Bodenflächen führen kann. Daher sind zur Kühlung der Komfortzone nur Zuluft-Kühlungsverfahren geeignet. Die Kühlung kann sowohl über Wärmetauscher (z. B. Erdwärmetauscher, Abluftwärmetauscher) als auch Evaporationsverfahren (Kühlkissen) erfolgen.

### 3.4 Kot-Harn Trennung als Emissionsminderungsmaßnahme

Die Kot-Harn-Trennung im engeren Sinn zum Ersatz von Güllesystemen wurde in Deutschland bereits 1987 (Heinlein et al.) thematisiert. Die Autoren sahen Vorteile bei der pflanzenbaulichen Verwertung der Fraktionen Kot und Harn je nach Einsatzzweck. International (NL, Kanada, USA, F) finden sich vermehrt Berichte seit dem Jahrtausendwechsel. Demnach sind die wichtigsten Verfahren zur Kot-Harn-Trennung V-förmige Schieber und seitlich geneigte Bandsysteme, die unter dem perforierten Bereich der Ställe installiert werden. Aarnink et al. (2013) berichten für solche Systeme über Emissionsminderungen für Ammoniak, Methan und Geruch von 70 %. Von Harmon et al. (2014) wird bezüglich der V-förmigen Schiebersysteme auf die Bedeutung der geschlitzten Abflussrinne hingewiesen, die eine schnelle Entfernung des Urins ermöglicht, insgesamt schätzen die Autoren den Emissionsminderungseffekt der Kot-Harn-Trennung auf etwa 40-80 % ein. Die Ausräumperioden werden nicht explizit quantifiziert, jedoch kann aus eigenen Beobachtungen verschiedener Systeme geschlossen werden, dass häufiges Ausräumen (mindestens 6-mal täglich oder häufiger) für eine effiziente Emissionsminderung erforderlich ist. Alternativ sind Systeme bekannt, die einen freien und schnellen Abfluss aus dem Stall ermöglichen. Diese Voraussetzungen erfüllt das System Remmert (2018), bei dem ein perforierter Rollboden mit Kotabstreifer für eine effiziente Kot-Harn-Trennung sorgt und eine schnelle Harnableitung über ein Kanalsystem ermöglicht wird.

Kroodsmas (1987) berichtet über Versuche aus den Niederlanden mit perforierten Polyethylenbändern mit Abstreifbürsten unter Vollspaltenböden. In Deutschland hat das mittlerweile nicht mehr existente Unternehmen FarmerAutomatic diesen Ansatz aufgegriffen mit der Zielsetzung der Gewinnung von getrocknetem Kot als Pyrolyse-Brennstoff. In einem Pilotstall wurde der Kot Unterflur auf perforierten Kotbändern gesammelt, Urin über Schwerkraftsysteme unterhalb der Bänder abgeführt. Zu langsames Ausräumen des Urins führte zu wahrnehmbaren Ammoniakemissionen.

Die Kot-Harn-Trennung wird nicht im Referenz-Dokument der EU als Best Verfügbare Technik (BVT) im Rahmen der Industrie-Emissions-Richtlinie der EU geführt. Zwar sind Verfahren zum „häufigen“ Ausräumen von Kot und Harn beschrieben (Kap. 4.7.5.5 Partly slatted or fully slatted floor with a scraper for frequent manure removal; Kap. 4.7.5.15 V-shaped manure belts - in case of a partly slatted floor), jeweils auch mit Emissionsminderungseffekten, jedoch konnten sich die Mitgliedsstaaten nicht darauf einigen, dass alle Kriterien für die Identifizierung als BVT erfüllt sind (Santonja et al., 2017).

### 3.5 Eigenschaften von Kot und Urin von Schweinen im Vergleich zum Humanbereich

#### Die chemische Zusammensetzung von Schweineurin und -kot

Internationale Reviews zur Kot-Harn-Trennung in der Schweinehaltung erfolgten durch Hjorth et al., 2010, Koger et al., 2014; Lachance et al., 2005, um die Potenziale der Kot-Harn-Trennung zur Gewinnung wirksamer Dünger sowie zur Reduzierung von Ammoniak- und Methanemissionen zu erfassen. Forschungsarbeiten wurden in Kanada, den USA, den Niederlanden, Frankreich und Dänemark durchgeführt.

Die Mengen der erfassten Fraktionen an Kot und Harn variieren in Abhängigkeit vom Trennsystem. Sie liegen bei Mastschweinen (40-60 kg LG) für die feste Fraktion zwischen 0,9-1,6 kg/Schwein und Tag und für die flüssige Fraktion zwischen 1,1 – 1,8 kg/Schwein und Tag (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Mengen an erfasstem Kot und Urin mit verschiedenen Trennsystemen**

Studie	Feste Fraktion (Kot) kg/Schwein und Tag frisch	Feste Fraktion (Kot) kg/Schwein und Tag Trockenmasse	Flüssige Fraktion (Urin) kg/Schwein und Tag
<b>Alonso et al. 2010</b>			
Geneigtes Band	0,97	0,34	1,41
Konkaves Band	1,31	0,36	1,08
<b>Koger et al. 2014</b>			
Flach geneigtes Band		0,26	1,19
<b>Aarnink et al. 2007</b>			
V-förmiges Band	1,62		1,75
<b>Dufour et al. 2007</b>			
V-förmiger Schieber	0,90		1,21

Bei Schweinen finden sich 50-60 % des gesamten ausgeschiedenen Stickstoffs im Urin. Davon liegt der größte Teil in anorganischer Form als Harnstoff vor und nur ein geringer Teil als einfach abbaubare organische Stickstoffverbindungen (Jensen und Sommer, 2013). Harnstoff wird enzymatisch mittels Urease in Ammonium-N ( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ ) und Karbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) umgewandelt (Gl. 1).



Dabei erhöht sich der pH-Wert von etwa 6 auf bis zu 9, was sowohl zur Emission von Ammoniak als auch einer Fällung von Mineralien wie Phosphaten und Karbonaten führt (Udert et al. 2006). Das von Mikroorganismen ausgeschiedene Exoenzym Urease findet sich vor allem im Kot, so dass die zeitnahe Trennung von Urin und Kot in Ställen die Ammoniakemissionen deutlich senkt (Koger et al., 2014; Lachance et al., 2005). Im Kot findet sich vor allem organisch gebundener Stickstoff als nicht verdaute oder nicht sorbierte N-haltige Bestandteile des Futters oder eingebaut in Proteine.

Untersuchungen von Urin und Kot, bei einer getrennten Sammlung direkt am Tier zum Beispiel über Katheter, finden für Mastschweine zwischen 40 und 60 kg Konzentrationen von 4,6-6,0 g N/kg Urin (Jørgensen et al., 2013; Jarret et al., 2012; Fernandez, 2006, Tabelle 3). Der Wert nimmt mit Alter und steigendem Gewicht der Tiere zu, so fand Fernandez (2006) Konzentrationen von 8,1 g N/kg Urin für ausgewachsene Sauen. Die Konzentrationen von gesamt-N im Kot bewegen sich im Bereich von 7-15 g N/kg Kot für Mastschweine (Oenema et al., 2008; Jarret et al., 2012, Tabellen 3+4).

Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung von Schweineexkrementen, die mit Hilfe von Band- oder Schiebersystemen im Stall getrennt wurden, finden Gesamtstickstoffkonzentrationen im Urin und Kot, die sich in den gleichen Bereichen bewegen (Aarnink et al., 2007; Lynch et al., 2007; Pouliot et al., 2005; Landrain et al., 2009, Tabelle 3).

Der Großteil des gelösten Phosphors liegt als Orthophosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) vor. Die Konzentrationen für Mastschweine (40-115 kg) liegen im direkt gewonnenen Kot bei 4,8 bis 8 g P/kg und zwischen 2,9 und 14,5 g P/kg für Kot der mit Band- oder Schiebersystemen getrennt wurde (Tabelle 3). Für Phosphor im Urin finden sich Gehalte zwischen 0,02 und 0,7 g P/kg (Jørgensen et al., 2013; Euiso Choi, 2007) für am Tier getrennte Ausscheidungen und zwischen 0,07 und 1,1 g P/kg Urin (Aarnink et al., 2007; Koger et al., 2014; Pouliot et al., 2005; Landrain et al., 2009) bei mechanisch separierten Exkrementen (Tabelle 3).

Im Urin finden sich je nach Art der Gewinnung der Urinfraktion Kalium-Konzentrationen von 1,6 und 3,7 g K/kg (Kephart and Sherritt, 1990; Euiso Choi, 2007), bzw. zwischen 3,5 und 5 g K/kg (Tabelle 3). Die Kaliumkonzentrationen im Kot betragen zwischen 3,4 und 4,5 g K/kg (Kephart et al. 1990, Choi 2007), bzw. zwischen 5,1 und 10 g K/kg (Tabelle 4).

**Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von Schweineurin**

Quelle	Anmerkungen	Stickstoff			Phosphor		Kalium		pH
		Gesamt N		Ammonium N	g/Tag	g/kg	g/Tag	g/kg	
Urin direkt am Tier getrennt gesammelt		g/Tag	g/kg	g/kg	g/Tag	g/kg	g/Tag	g/kg	
Jorgensen et al. 2013 Dänemark	3 weibliche Mastschweine je Gruppe (Dänemark/ Vietnam/ Thailand), 40 – 60 kg	15,5/ 13,9/ 18	5,11 <sup>1</sup> / 4,61 <sup>1</sup> / 6 <sup>1</sup>		0,9/ 0,05/ 1,5	0,3 <sup>1</sup> / 0,02 <sup>1</sup> / 0,5 <sup>1</sup>			
Choi 2007 Korea	Mittelwerte ( Korea)	20	6,6 <sup>1</sup>		2,2	0,73 <sup>1</sup>	5	1,6 <sup>1</sup>	
Fernández 2006 Dänemark	Je 8 Altsauen/Jungsauen		8,1/4,2						
Jarret et al. 2012 Frankreich	5 männliche Tiere / ca. 51,5 kg	21,2	5,0	4,5					8,3
Oenema et al. 2008	Mastschweine (30 – 100 kg)		2-10						
Kephart et al. 1990 USA	216 Tiere mit ca. 23 – 38 kg						3,28	3,7	
Poulsen 2006 Dänemark	6 weibliche Tiere /Ration mit angepasstem P-Gehalt				0,5				
<b>Trennung mit Bändern oder anderen Systemen</b>									
Aarnink et al. 2007 Niederlande	72 Tiere, Beprobung bei ca. 53 kg / 82 kg / 105 kg	7,1 / 14,6 / 18,2	5,9 / 7,8 / 8,3	5,4 / 7,1 / 7,6	0,08 / 1,1 / 0,8	0,07 / 0,59 / 0,37	4,8 / 7,5/ 9,5	3,9 / 4,1 / 4,4	9,3 / 8,7 / 8,8
Koger et al. 2014 USA	80 Tiere, von 25-55 kg, 5 Durchgänge		6,9	4,8		0,2		4,6	
Lynch et al. 2007 Irland	Eber 74 kg; Futter mit niedrigem (140 g/kg)/ und hohem (200 g/kg) Rohproteingehalt	22,5 / 36,4	10,0 / 10,5						
Chan 1998 Niederlande	16 männliche Schweine (4 Gruppen à 4 Tiere), 80 - 90 kg	30,0 / 21,5/ 26,8 / 16,8	6,6 / 5,/ 6,6/ 4,9						
Pouliot et al. 2005 Kanada/USA	288 Tiere, von 18 - 112 kg in 108 Tagen, Mittelwerte über Mastperiode		6,0	5,0		1,1		5,0	
Landrain et al. 2009 Frankreich	60 Tiere, von 30 – 115 kg (98 Tage) Mittelwerte über Mastperiode		5,3	4,4		0,59		3,5	

<sup>1</sup>= berechnet mit 3l Urin/Tag (Deding et al. 2006, Choi 2007) und Dichte Urin=1,035 kg/l (<http://www.vetmed.uni-leipzig.de/ik/wmedizin/labor/diagnostik/referenzwerte/schwein.htm>)

**Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von Schweinekot (Frischsubstanz)**

Quelle	Bemerkung	N		P		K	
		g/Tag	g/kg	g/Tag	g/kg	g/Tag	g/kg
<b>Kot direkt am Tier</b>	<b>getrennt gesammelt</b>						
Jorgensen et al. 2013 <i>Dänemark</i>	3 weibliche Mastschweine je Gruppe (Dänemark/ Vietnam/ Thailand), 40 – 60 kg	8,8 / 13,8 / 10	9,8 <sup>1</sup> / 15,3 <sup>1</sup> / 11,1 <sup>1</sup>	4,4 / 4,4 / 4,4	4,8 <sup>1</sup> / 4,8 <sup>1</sup> / 4,8 <sup>1</sup>		
Choi 2007 <i>Korea</i>	Mittelwerte (Korea)	10	11,1 <sup>1</sup>	7,2	8 <sup>1</sup>	4,1	4,5 <sup>1</sup>
Jarret et al. 2012 <i>Frankreich</i>	5 männliche Tiere mit ca. 51,5 kg	7,5	11,1				
Oenema et al. 2008			7 – 15				
Kephart et al. 1990 USA	216 Tiere mit ca. 23 – 38 kg					0,79	3,4
Vu et al. 2009 Dänemark	Mastschweine 30-94 kg, 200 versch. Diäten, Mittelwerte für n=285		10,4				
Poulsen 2006 Dänemark	6 weibliche Tiere /Ration mit angepasstem P-Gehalt			5,1			
<b>Trennung mit Bändern</b>	<b>oder anderen Systemen</b>						
Aarnink et al. 2007 <i>Niederlande</i>	72 Tiere, Beprobung bei ca. 53 kg/82 kg/105 kg	21,1 / 20,8 / 20,8	12,8 / 13,1 / 12,6	4,7 / 6,3 / 6,2	2,9 / 4,0 / 3,8	8,3 / 8,7 / 8,6	5,1 / 5,5 / 5,2
Lynch et al. 2007 <i>Irland</i>	74 kg Eber; Futter mit niedrigem (140 g/kg)/ und hohem (200 g/kg) Rohproteingehalt	5,7 / 7,2	7,8 / 9,8				
Chan 1998 <i>Niederlande</i>	16 männliche Schweine (4 Gruppen à 4 Tiere), 80 – 90 kg	8,8 / 11,0 / 7,7 / 13,9	8,0 / 9,3 / 9,2 / 8,6				
Pouliot et al. 2005 <i>Kanada/USA</i>	288 Tiere, von 18 – 112 kg in 108 Tagen, Mittelwerte über Mastperiode		16,0		14,5		10,1
Landrain et al. 2009 <i>Frankreich</i>	60 Tiere, von 30 – 115 kg (98 Tage) Mittelwerte über Mastperiode		12,8		9,9		5,9

<sup>1</sup>Berechnet mit 0,9 kg Kot(frisch)/Tag (Mittelwert aus n=285 nach Vu et al. 2009)

### Vergleich mit Human-Ausscheidungen

Die Konzentrationen von Gesamt-N im menschlichen Urin liegen im Bereich von 4,7 – 8,1 g N/kg, sie sind denen von Mastschweineurin (6,0 g N/kg) sehr ähnlich. Phosphor findet sich im menschlichen Urin deutlich mehr, (zwischen 0,3 – 0,9 g P/kg) als im Schweineurin (0,4 g P/kg). Die K-Gehalte liegen im menschlichen Urin bei 0,02 – 2,4 g K/kg, also nur etwa die Hälfte dessen, was man bei Mastschweinen vorfindet (4,0 g K/kg).

Der Gehalt an Schwermetallen im menschlichen Urin ist gering, vor allem im Vergleich mit chemischen Düngern (Jönsson et al., 1997). Hinsichtlich der Konzentrationen von Hormonen, pharmazeutischen Wirkstoffen, sowie deren Abbauprodukten im Urin gibt es noch keine hinreichend systematischen Untersuchungen. Da Urin einer der Hauptaustragspfade dieser Substanzen aus dem Körper ist, besteht sowohl im Human- als auch im Nutztierbereich Bedarf für weitergehende Untersuchungen.

### 3.6 Stabilisierung und Nährstoffrückgewinnung von getrennt gesammeltem Urin - Ergebnisse aus dem Humanbereich

Die getrennte Sammlung von Urin und Kot ermöglicht eine gezielte separate Behandlung beider Fraktionen. Erkenntnisse hierzu wurden nicht im Agrarforschungsbereich, jedoch intensiv im Bereich der Trenntoiletten für den Humanbereich gewonnen. Dabei verlagert sich der Forschungsschwerpunkt aktuell hin zur möglichst vollständigen Rückgewinnung von enthaltenen Nährstoffen (Simha und Ganesapillai, 2017). Aufgrund der Analogien bezüglich der chemisch-physikalischen Eigenschaften wird von einer weitgehenden Übertragbarkeit auf Schweineurin ausgegangen. Folgende Stabilisierungs- und Behandlungsmethoden für Urin wurden im Humanbereich getestet:

#### 3.6.1 Stabilisierung von Harnstoff

Unter nicht-sterilen Lagerungsbedingungen kommt es zu einer schnellen Hydrolyse von Harnstoff zu gelöstem Ammoniak und Ammoniumionen (Gl. 1).



Die Reaktion führt zu einer Anhebung des pH-Werts von 6 / 7 auf bis zu 9, was wiederum die verstärkte Fällung von Karbonaten und Phosphaten auslösen kann (Urinsteinbildung). Zur Vermeidung negativer Effekte wie die Emission von Ammoniak und das Verstopfen von Leitungssystemen durch die Fällungsprodukte, wurden verschiedene Stabilisierungsmethoden erforscht und getestet.

Eine im Humanbereich mehrmals beschriebene Methode zur Blockierung der Harnstoffhydrolyse ist das aktive Ansäuern durch Zugabe von Säuren. Im Gegensatz zur Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Nutztierhaltungsbereich (Kaupenjohann et al. 2019) zielt die Säurezugabe nicht auf eine Stabilisierung des bereits entstandenen Ammoniums ab. Die Arbeitsergebnisse zeigen, dass eine Senkung des pH-Werts unter 4 den Harnstoff über mehrere hundert Tage stabilisieren kann (Hellström et al., 1999). Ebenso effizient ist dies durch Zugabe von Laugen möglich. In Laborversuchen wurde durch die Zugabe von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zu frischem Urin ein pH-Wert von 11 eingestellt und damit die Hydrolyse erfolgreich unterbunden (Randall et al., 2016). Laugen sind einfach zu handhaben, müssen nur einmalig zugesetzt werden und bieten die Möglichkeit simultan Hydroxylapatit zur Phosphorrückgewinnung auszufällen. Zu beachten ist dabei die Temperaturempfindlichkeit des Sättigungs-pH-Werts, da dieser bei Temperaturen unter 14 °C höher als pH 13 ist und damit die Schwelle zur chemischen Hydrolyse von Harnstoff erreicht werden kann (Randall et al., 2016). Auch Breßler (1994) hat die stabilisierenden Effekte von Säuren und Laugen bei Zusatz zu Rindergülle experimentell nachgewiesen.

Die biologische Oxidation (oder Nitrifizierung bzw. Teil-Nitrifizierung) ist eine weitere Möglichkeit zur Verminderung von Stickstoffverlusten in die Atmosphäre. Als Nitrifikation bezeichnet man die bakterielle Oxidation von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) bzw. Ammonium-Ionen ( $\text{NH}_4^+$ ) zu Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) in zwei Teilprozessen (Gl. 2+3).



Die Nitrifikation ist mit einer Produktion von Säure (Gl. 4) verbunden. Der pH-Wert wird abgesenkt, wenn die gebildete Säure nicht neutralisiert wird. Da Nitrifizierer nur im neutralen bis leicht alkalischen Bereich aktiv sind, wird nur ein Teil des Ammoniums/Ammoniaks vollständig in Nitrat umgewandelt (Autoinhibition). Im teilnitrifizierten Urin befindet sich meist eine Mischung aus Ammoniumnitrit und Ammoniumnitrat. Ein Nebeneffekt ist der parallele Abbau von leicht abbaubaren organischen Verbindungen und somit eine Reduzierung des CSB (Maurer et al., 2006). Der Prozess ist energieintensiv, da sowohl für die Nitrifikanten als auch für den Abbau organischer Substanz (die Prozesse sind verfahrenstechnisch nicht trennbar) hohe Sauerstoffmengen über eine aktive Belüftung zur Verfügung gestellt werden müssen. Mit einem Strombedarf von etwa 30-40 kWh/t oder mehr muss gerechnet werden. Stickstoffemissionen sind bei dieser biologischen Oxidation schwer kontrollierbar und sowohl in Form von Ammoniak als auch über Denitrifikation möglich. Gesamt-Stickstoffverluste von ca. 20-30 % sind realistisch.

### 3.6.2 Verfahren zur Aufkonzentration (Volumenreduzierung)

Zur Erhöhung der Nährelementkonzentration im Urin wurden sowohl Verdunstungs- (Verdampfungs-) verfahren als auch Membrantechnologien erprobt. Beide Verfahren werden seit Jahren auch bei der Gülleaufbereitung angewendet (Döhler et al., 2019). Bei der Verdunstung (Maurer et al., 2006) ist ein N-Verlust über Ammoniakausgasung zu verhindern, was über die Stabilisierung des Urins durch Ansäuern erreicht werden kann, andernfalls müssen Ammoniakabscheider genutzt werden. Die Verdampfung ist umso effizienter, je weniger fossile Wärme benötigt wird, Abwärme aus Ställen oder Biogasanlagen kann hierbei eingesetzt werden.

Im Gegensatz dazu benötigen Membranverfahren keine externe Wärme, wenn auch die Effizienz von Membranen bei höheren Temperaturen größer ist. Membranverfahren neigen beim Einsatz von Wirtschaftsdüngern zum Fouling (Verklebung der Membran durch organische Partikel oder Kleinstlebewesen) oder Scaling (Versalzung durch Erhöhung der Ionenkonzentration an der Membran). Sorgfältige Kot-Harn-Trennung, die zu einer geringen Konzentration an organischen Partikeln führt, wird wiederum eine deutliche Reduktion des Fouling im Vergleich zu Flüssigmist zur Folge haben. Weiterhin sind vibrierende Umkehrosmosemembran-Module verfügbar, die sowohl Fouling als auch Scaling wirkungsvoll verringern (Döhler, 2017). Mit Permeat-/Retentatverhältnissen von 75/25 abhängig vom Element und dem pH-Wert können Rückhaltewerte von 70-98 % erreicht werden (Maurer et al., 2006; Thörneby et al., 1999).

### 3.6.3 P-Rückgewinnung

**Struvit:** Phosphor kann aus Abwässern über die chemische Fällung als Magnesium-Ammoniumphosphat ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; MAP), auch Struvit genannt, rückgewonnen werden (Christensen and Sommer, 2013). Ein erfolgreiches P-Recycling konnte unter anderem bei der Behandlung von Schweinegülle aus Güllebehältern (Bowers and Westerman, 2005), und auch für separat gesammelten Urin gezeigt werden (Etter et al., 2011). Die Struvitfällung erfolgt bei leicht alkalischen Verhältnissen nach Gl. 5.



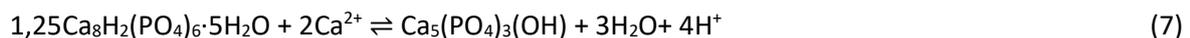
Das pH-Optimum für die Struvitfällung liegt um 9,3 (Frank, 2013). Die Fällung wird üblicherweise durch die Zugabe von Magnesium forciert. Als Mg Quelle wird  $\text{MgOH}$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  oder  $\text{MgCl}_2$  (Christensen and Sommer, 2013) verwendet.

**Kalium-Magnesium-Phosphat:** Bei der Fällung von Struvit kann es zu einer Co-Fällung von Kalium-Magnesium-Phosphat ( $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , KMP) kommen, das zur Gruppe der Struvitanaloga gezählt wird. Die Bildung erfolgt nach Gl. 6 (Gao et al., 2017).



Auch die gezielte Fällung von Kalium aus Abwässern und getrennt gesammeltem Urin als KMP wurde untersucht. Laborversuche zeigten, dass unter Zugabe von Phosphor und Magnesium im Überschuss (Molare Verhältnisse Mg:K:P= 1,8:1:1,8) und einem pH-Wert von 11 eine Kaliumreduzierung von knapp 80 % aus synthetischem Urin möglich ist (Gao et al., 2017; Xu et al., 2012). Da auch bei nur geringen Mengen an Ammoniak bevorzugt Struvit gebildet wird (Xu et al., 2015), ist eine vorherige Ammoniak-Entfernung z. B. über Strippping notwendig.

**Hydroxylapatit:** Kalzium reagiert mit Phosphat zu ortho-Kalziumphosphaten, der stabilste Vertreter davon ist Hydroxylapatit (HAP,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ). HAP wird nicht direkt gebildet, sondern über mehrere Vorstufen. Das ist in alkalischer Lösung vor allem Octakalziumphosphat (OCP,  $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), das unter Kalziumaufnahme zu HAP umgewandelt wird (Gl. 7) (Udert et al., 2003).



Abhängig von der  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen Konzentration wird die Bildung von HAP zugunsten der Struvit-Bildung gehemmt (Frank, 2013; Udert et al., 2003). Die Fällung von Phosphat mit Kalzium als HAP ist nur dann sinnvoll, wenn die Zugabe von z. B.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , vor der Hydrolyse von Harnstoff erfolgt, da sonst vor allem Kalziumkarbonat gebildet wird (Randall et al., 2016).

**Adsorption:** Über Ad- und Desorption können gelöste Verbindungen, auch in geringen Konzentrationen, aus Mischlösungen entfernt und separat rückgewonnen werden. Zur Entfernung von P aus Kläranlagen-Abwässern werden in Pilotanlagen auf ZnFeZr-basierende (Zr = Zirkonium) Sorbenten, welche auf magnetischen Partikeln platziert wurden, getestet (Drenkova-Tuhtan et al., 2017). Diese im neutralen pH-Bereich funktionierenden Materialien lassen sich durch Magnete leicht abscheiden und können mit  $\text{NaOH}$ -Lösung wiederholt regeneriert werden. Aus dieser mit P angereicherten Lösung kann der Phosphor z. B. über Struvit-Fällung rückgewonnen werden.

### 3.6.4 N-Rückgewinnung

**Ionenaustausch:** Adsorber mit einer hohen Affinität für Kationen wie Ammonium aber auch Kalium sind Klinoptilolithe, Minerale aus der Gruppe der Zeolithe (Ganrot und Dave, 2004).

Sorptionsversuche im Labor mit separat gesammeltem, gelagertem menschlichem Urin zeigten eine Rückhaltung von bis zu 97 % für  $\text{NH}_4^+$  und bis zu 99 % für  $\text{K}^+$  (Beler Baykal et al., 2009; Beler-Baykal et al., 2011). Das beladene Klinoptilolith kann als Dünger genutzt werden, darüber hinaus kann das Ammonium mittels Spülung wieder desorbiert werden (Beler Baykal et al., 2009). Auf Laborebene wurde auch eine simultane P-Rückgewinnung durch Zugabe von MgO und Fällung von Struvit erfolgreich getestet (Ganrot und Dave, 2004).

**Ammoniak-Strippung:** Über Luft- oder Dampfstrippung wird in einem physikochemischen Prozess das Ammoniak aus einer Flüssigkeit oder aus Abwasser durch den Kontakt mit durchströmender Luft in die Gasphase überführt. Das im Gas gelöste Ammoniak wird anschließend durch Absorption in starken Säuren rückgewonnen.

## 4 Beschreibung des neu entwickelten Systems zur emissionsarmen Haltung von Mastschweinen und zur weitergehenden Behandlung der Exkremente

### 4.1 Vorgehen bei der Auswahl und Entwicklung des Stallsystems

Ausgehend vom Kernziel des Vorhabens (Vermeidung von Mist und Gülle), wurde als Grundprinzip für die Entmistung ein primäres Trennverfahren für Kot und Harn gewählt. Die emittierende Oberfläche des Stallsystems muss klein sein, dementsprechend müssen in der Bucht Funktionsbereiche angeboten werden, ein möglichst sicher funktionierender Bereich zum Absetzen von Kot und Harn eingeschlossen. Wie im Kap 3.6.1 beschrieben, setzt die Hydrolyse des Urinharnstoffs innerhalb weniger Minuten nach der Ausscheidung ein, was verbunden mit einem sehr schnellen Anstieg des pH-Wertes zu potenziell hohen Ammoniakfreisetzungen führt. Die Kot-Harn-Trennung kann daher nur mit moderaten Emissionen betrieben werden, wenn Kot und Urin schnell aus dem Stall abgeführt sowie der Urinharnstoff und/oder die Hydrolyseprodukte ( $\text{NH}_3/\text{NH}_4$ ) selbst frühzeitig stabilisiert und Maßnahmen zur Emissionsminderung bei der Lagerung ergriffen werden.

Die Gruppengröße soll nicht über 30 Tiere liegen, der Kot-/Urinbereich soll sich im Außenklimabereich an den Längsseiten des Stalles befinden, Gitterabtrennungen im Mistbereich sollen Sicht- und Riechkontakt zur Nachbargruppe ermöglichen, um das Revierverhalten über Absetzen von Exkrementen an der „Reviergrenze“ zu nutzen. Das Längen/Breitenverhältnis der Buchten soll mindestens 3:1 aufweisen.

Im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Recherchen führten zu dem Ergebnis, dass die bisherigen Entwicklungen und Erfahrungen mit dem freigelüfteten Stallsystem Nature-Line von Schauer-Agrotronic (Schauer 2018) diesen Anforderungen am nächsten kommen. Daher wurde entschieden, aufbauend auf diesem Stallsystem den „Stall ohne Mist und Gülle“ zu entwickeln. Dementsprechend wurden Anpassungen und Weiterentwicklungen hinsichtlich der Anforderungen an das emissionsarme Entmistungs- und Düngerherstellungssystem vorgenommen.

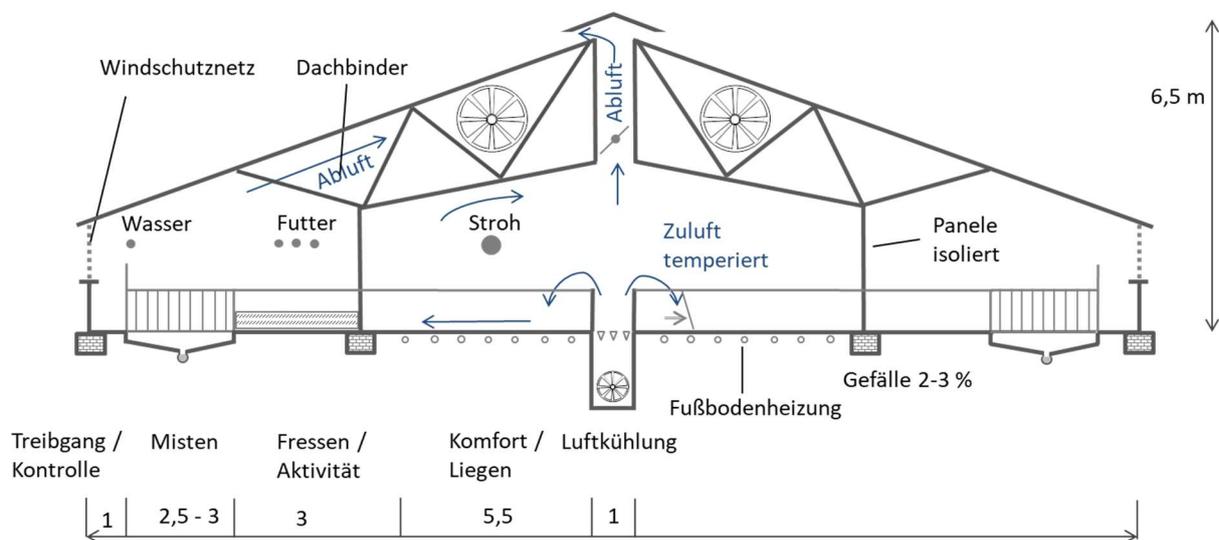
## 4.2 Die wichtigsten Komponenten des Haltungssystems

Der gekapselte, wärmedämmte und planbefestigte Innenbereich dient bei diesem Konzept als Komfortbereich. Er beinhaltet die nach oben offen gehaltenen und eingestreuten Liegebuchten. Dadurch lassen sich die Liegebuchten schnell und einfach kontrollieren. Mittig befindet sich ein Kontrollgang.

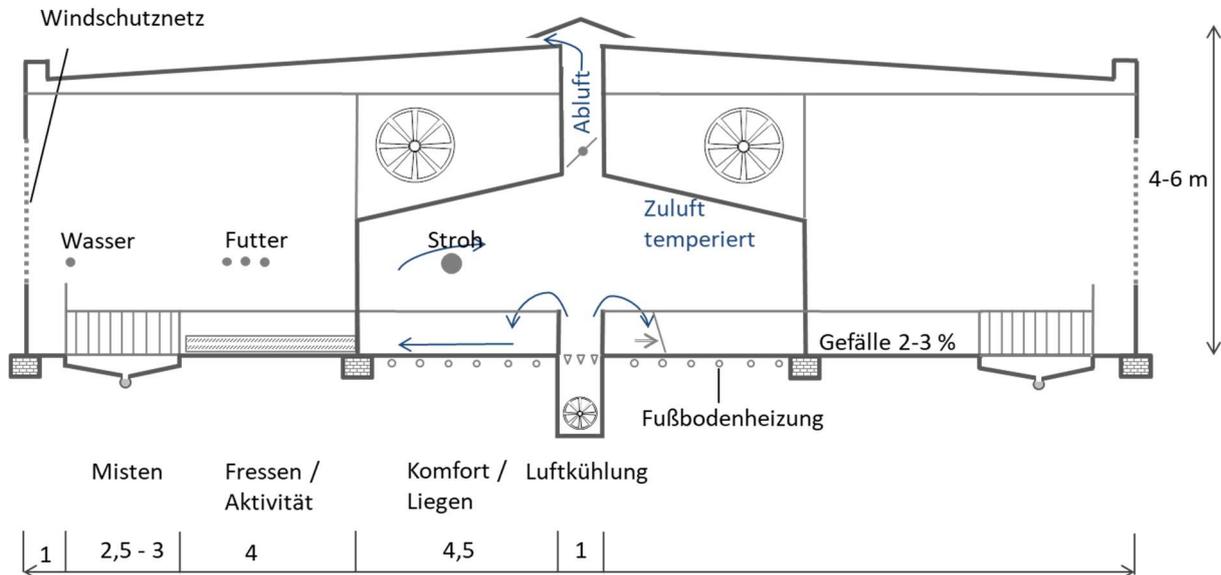
Im Komfort- und Liegebereich erfolgt die Zugabe von Einstreu mit einem vollautomatischen Einstreusystem. In einem geschlossenen Vorbau des Stalls werden Strohballen aufgelöst, das Stroh wird zerkleinert und entstaubt, und über ein Fördersystem in die Buchten verteilt. Verstellbare Buchtentrennwände sorgen dafür, dass den Tieren nur so viel Platz angeboten wird, wie sie je nach Wachstumsstadium benötigen. Durch den Komforteffekt, der durch Heizung, Kühlung, frische und staubfreie Luft entsteht, kann die Verschmutzung (Exkrementsohlen) der planbefestigten Bereiche der Bucht weitgehend vermieden werden.

Im vollüberdachten Außenbereich/Auslauf befindet sich der Aktivitäts-, Fress- und Mistenbereich, nur letzterer ist perforiert (Abbildung 1). Lateral angrenzend an den Mistenbereich befindet sich der umlaufende Treib- und Kontrollgang. Der aufgrund der Biosecurity-Maßnahmen vorgeschriebenen doppelten Umzäunung bei Auslaufställen, wird durch diesen Gang ebenfalls Rechnung getragen. Zum Schutz vor zu hohen bzw. zu niedrigen Temperaturen und damit verbundener Kondenswasserbildung, ist der Auslauf mit einem isolierten Dach ausgestattet. Zudem werden die Seitenwände speziell für die feuchtkalte Jahreszeit mit schiebbaren Windschutznetzen ausgestattet. Auf einen offenen, nicht überdachten Auslauf wird bewusst verzichtet. Denn bei hohen Außentemperaturen und Sonneneinstrahlung führt dieser zum Austrocknen der Exkremente mit potenziell höheren N-Verlusten, bei Niederschlägen zu erhöhten Flüssigkeitsmengen, die die späteren Behandlungsprozesse verkomplizieren. Als Alternative für die Satteldachkonstruktion kommt auch eine Flachdachkonstruktion infrage, welche durch die erhöhten Seitenwände höheren direkten Lichteinfall ermöglicht (Abbildungen 1 und 2). Beide Gebäudetypen können in Holzbau- oder Stahlbauweise mit Betonfundamenten ausgeführt werden.

**Abbildung 1: Querschnitt Stallgebäude mit Trauf-First-Lüftung – Innenliegend der gekapselte, beheiz- und kühlbare Komfortbereich mit Gleichdrucklüftung und Lüftungsklappen. Kühlung über Unterflurgrube und Kühlkissen/Coolpad. Windschutznetze zur Klimaregulation.**



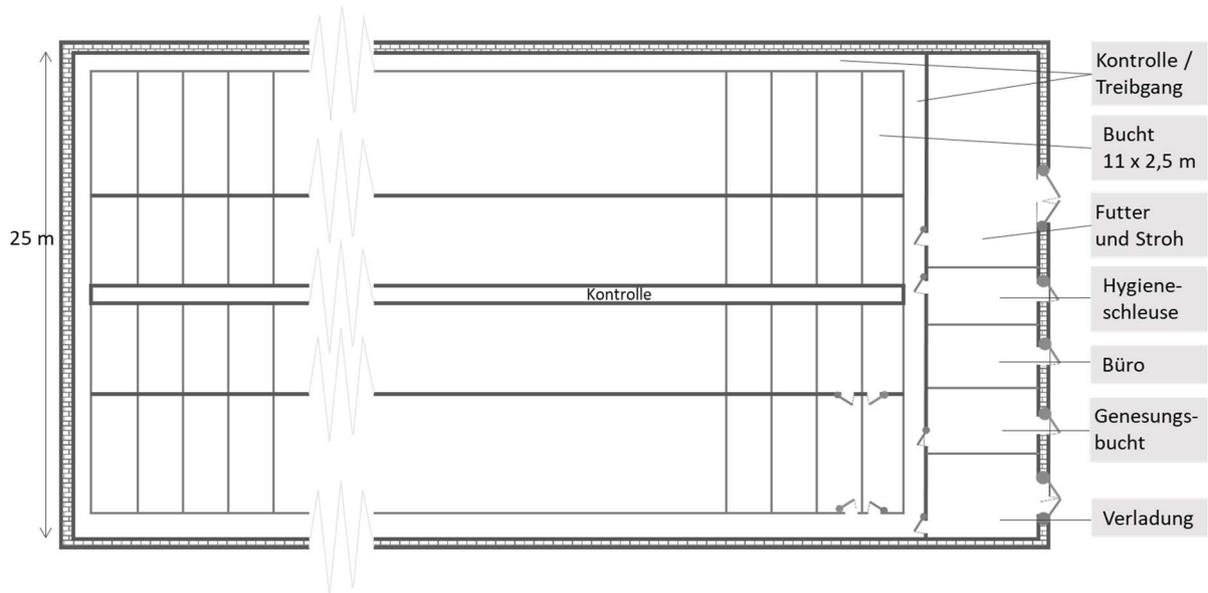
**Abbildung 2: Querschnitt Stallgebäude mit Flachdach (alternativ zu Abb. 1) – Innenliegend der gekapselte, beheiz- und kühlbare Komfortbereich mit Gleichdrucklüftung und Lüftungsclappen. Kühlung über Unterflurgrube und Kühlkissen/Coolpad. Windschutznetze zur Klimaregulation.**



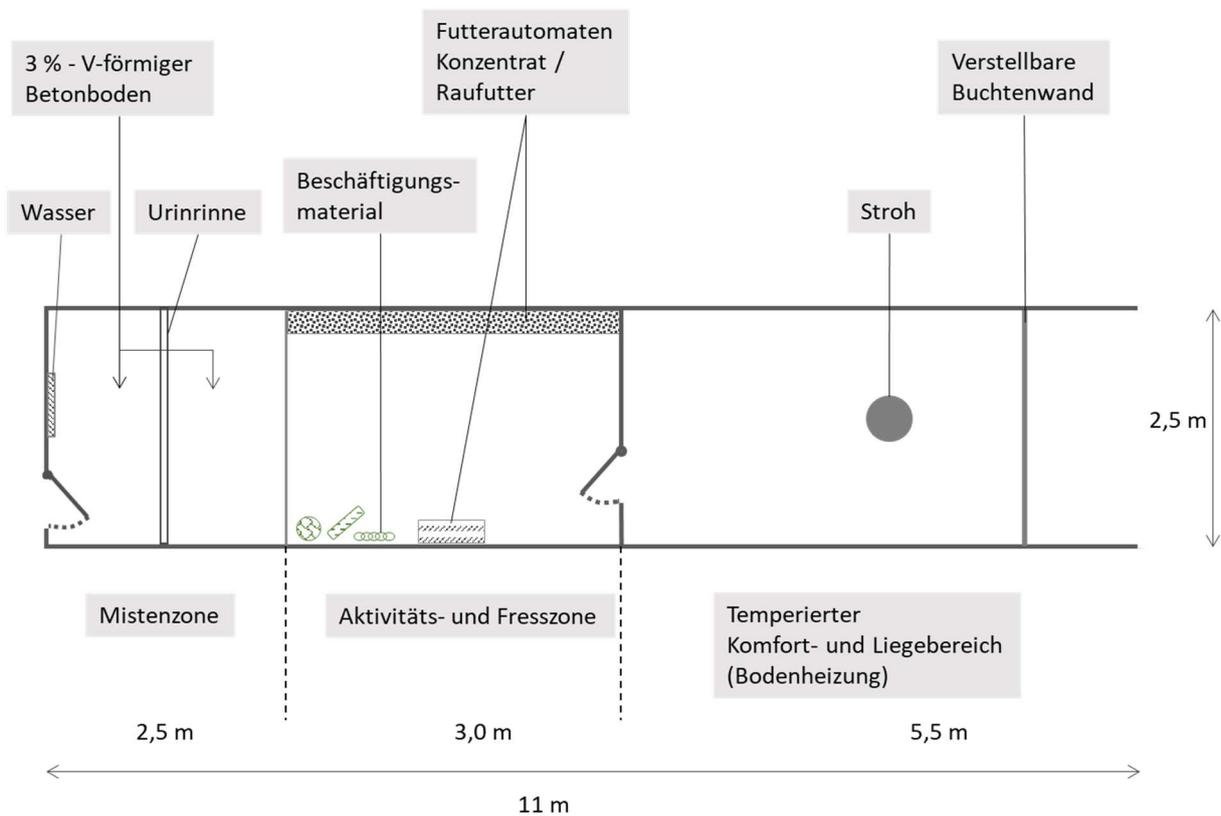
Im Aktivitäts- und Fressbereich wird beim Einstellen mit einem Tier-Fressplatzverhältnis von 1:1 gestartet, dies ergibt bei den vorgesehenen Troglängen ein Verhältnis von 2:1 im Endmastbereich. Das Schauer Spotmix-Fütterungssystem ist multiphasenfähig, und kann auch mit Langtrog-Futterautomaten (trocken oder breiförmig) oder als Flüssigfütterung eingesetzt werden. Die Breifütterung wird vorgesehen. Die Tierbesatzdichte in der Bucht ist ausgelegt auf ca. 1,1 bis 1,4 m<sup>2</sup>/Tier, was etwa 20 bis 25 Tieren pro Bucht entspricht.

Durch die Aufteilung der Bucht in schmale und tiefe Funktionsbereiche wird erreicht, dass von den Tieren überwiegend der dafür vorgesehene Bereich an den Außenwänden des Stalls zum Koten und Harnlassen aufgesucht wird. Damit werden die emittierenden Flächen klein gehalten und Handarbeit für den Landwirt minimiert. Der Mistenbereich ist mit Trenngittern, Tränkeeinrichtungen, perforiertem Boden mit darunter liegender Schieberentmistung ausgestattet (Abbildung 3 und 4).

**Abbildung 3: Grundriss Stallgebäude innenliegender Komfortbereich mit verstellbarer Buchtenwand zur Anpassung an das Tierwachstum, außen umlaufender Treib- und Kontrollgang. Überdacht und nicht klimatisiert sind Aktivitäts-/Fressbereich und Mistenbereich**



**Abbildung 4: Grundriss der Bucht mit klimatisierbarer Komfort- sowie Fress-, Aktivitäts- und Mistenzone**



Im überdachten Außenklimabereich erfolgt die Zu- und Abluftführung mittels einer Trauf-Firstlüftung. Im innenliegenden Komfortbereich ist diese mit einer temperaturgesteuerten Gleichdrucklüftung mit Zu- und Abluftklappen ausgestattet. Auch eine Zwangslüftung mit Ventilatoren ist möglich.

#### **4.3 Anpassungen und Weiterentwicklungen des Stallsystems Nature-Line im Rahmen des DBU-Projekts**

Aus langjährigen Versuchen und Praxiserfahrungen ist bekannt, dass in teilperforierten Buchten die Mistzonen von den Tieren immer dann nicht eingehalten werden, wenn a) hohe Außentemperaturen vorherrschen und die Tiere durch das Anlegen einer Suhle im eigentlichen Komfort- und Liegebereich sich Abkühlung verschaffen, b) wenn die Buchtenformen quadratisch oder annähernd quadratisch sind, c) wenn die zur Verfügung stehende Fläche pro Tier kleiner als 1 m<sup>2</sup> ist und d) wenn die Gruppengröße 30-40 Tiere übersteigt.

Daher wurde als Buchtengröße eine Längsbucht mit 11 x 2,5 m gewählt. Somit ergibt sich für ein symmetrisches Stallgebäude, mit mittig liegender Komfortzone, einer Breite von etwa 23 m, eine Mistzone von 2,5 x 2,5 m (23 % der Buchtenfläche). Zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des Trauf-First-Lüftungssystems (Dachneigung 22 %) ist eine Gebäudehöhe von 6,5 m erforderlich (Abbildung 1).

Zusätzlich zur Trauf-Firstlüftung ist für Hitzestausituationen im Sommer eine Zwangslüftung mit innenliegenden Ventilatoren vorzusehen, letztere würden auch eine Verbreiterung des Stallgebäudes und eine Verlängerung der Buchten möglich machen.

Der Komfortbereich innerhalb der gekapselten und wärmegeämmten Zone wird mit 5,5 x 2,5 m dimensioniert, so dass sich bei sehr niedrigen Temperaturen 20 Tiere im beheizbaren und klimatisierbaren Bereich aufhalten und ablegen können (Abbildung 4 und 5).

#### **Abbildung 5: Gekapselte und temperierte Komfortzone mit Stroheintrag**

---



Bild: Döhler

Zur Verhinderung der Überhitzung des Liegebereiches im Sommer und zur Verhinderung des Abkotens / Urinierens muss die Komfortzone mit einer Kühlung ausgestattet werden. Dies erfolgt mit einem derzeit bereits in einem Stall in Oberösterreich in Erprobung befindlichen Kühlungssystem, das mit im Unterflurbereich des Stalles verbauten Kühlkissen / Coolpads realisiert wird. Die Zuluftführung erfolgt über den mittig platzierten und begehbaren Unterflurkanal mit etwa 2,5 bis 3 m Tiefe (Abbildung 6), womit die Erdwärme für die Klimatisierung genutzt werden kann. Alternativ können Kühlkissen und Zuluftschächte auch im Firstbereich des Stalles installiert werden.

**Abbildung 6: Temperierte Zone mit Luftzuführung über Gitterrosten**

---



Bild: Döhler

Wie erste Erfahrungen aus dem Pilotbetrieb in den Sommermonaten 2018 zeigen, halten sich die Tiere in diesem Bereich, bei 2-4 °C niedrigeren Temperaturen im Vergleich zur Außenluft, kurze Zeit zum Abkühlen auf, um darauf wieder den Außenklimabereich aufzusuchen. Das Absetzen von Kot/Harn und das Anlegen einer Suhle wird dort somit effizient vermieden.

Das zielgenaue Absetzen von Kot und Harn könnte noch unterstützt werden durch Konditionierung der Tiere mit Belohnungssystemen. Entsprechende Systeme wären zu entwickeln.

Die Fütterung erfolgt über Breifutter-Längströge. Zur Verbesserung der Kotkonsistenz und zur Befriedigung des Wühlbedürfnisses der Tiere werden Raufuttercobs in einem eigens dafür installierten Futterautomaten zugefüttert. Die Zuteilung erfolgt ebenfalls über dasselbe Dosiersystem, lediglich Zuführleitungen und der Futterautomat müssen ergänzt werden (Abbildung 1 und 4). Raufuttercobs können alternativ über die Stroh-zuteilung beigemischt werden.

## 4.4 Komponenten der Kot-Harn-Trennung sowie der Weiterverarbeitung der Exkrememente

### 4.4.1 Berechnung der Ausscheidung von Kot und Harn

#### Methodik

Die Kot- und Harnausscheidung sowie deren stoffliche Zusammensetzung werden mechanistisch den ernährungsphysiologischen Vorgängen im Tier folgend errechnet. Der methodische Ansatz basiert auf Standardwerten und -funktionen nach DLG (2005) und KTBL (2014). Wesentliche Einflussfaktoren auf die ausgeschiedenen Mengen sind die Futtermengen, sowie deren Nährstoffgehalte und Verdaulichkeiten. Die Grundlagen der verwendeten Futtermengen sind in der DLG-Schrift „Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere“ (DLG 2005) dokumentiert.

Mit dem Tierfutter werden sowohl Rohnährstoffe (Rohasche, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, stickstofffreie Extraktstoffe) als auch für die Nährstoffbilanzierung bedeutsame Elemente wie Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) aufgenommen. Diese werden nur zum Teil in tierischen Produkten (Milch, Eier) oder der Karkasse angesetzt. Die nicht verwerteten Mineralstoffe werden ausgeschieden.

Im Gegensatz zu einer aggregierten Betrachtung der Ausscheidungen als Flüssigmist (Kot-Harn-Gemisch), ist bei der Erfassung der Ausscheidungen für den „Stall ohne Mist und Gülle“ die differenzierte Berechnung von Kot und Harn notwendig. Die kalkulatorische Allokation der Ausscheidungen in Kot und Harn erfolgt mit nährstoffbezogenen Verdaulichkeiten (Verdaulichkeitsquotient, VQ), differenziert nach den verwendeten Futtermitteln. Die Verdaulichkeitsquotienten der energiehaltigen, organischen Rohnährstoffe (Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, NfE) werden aus den DLG-Futterwerttabellen abgeleitet. Die Verdaulichkeit von Rohasche ist mit einem mittleren Wert von 40 % angesetzt, die von Phosphor am Ansatz ausgerichtet (sehr geringe Ausscheidung mit dem Harn), die von Kalium mit Durchschnittswerten von 85 % belegt (ZifoWin, 2010).

Die Ausscheidung im Kot errechnet sich somit als unverdauter Anteil des Futtermittels (Kot = Futter (100 - VQ %)). Die Trockenmasse (TM) ermittelt sich als Summe von organischer Masse (OM) + Rohasche (XA). Die Frischkotmasse wird aus der Kot-TM mit TM-Gehalten von 250 g/kg Frischkot ermittelt. Die Ausscheidung im Harn berechnet sich als Differenz aus der verdauten Menge und dem Ansatz im Tier bei TM-Gehalten von 20 g/kg Frischurin (ZifoWin, 2010).

#### Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnung der Eigenschaften von Kot und Harn zeigt die Tabelle 5. Ausgegangen wird von einer 3-phasigen Mast in einer gemischtgeschlechtlichen Gruppe mit stark reduzierter Fütterung sowie einer täglichen Zunahme von 900 g/Tag und 2,85 Durchgängen pro Jahr. Bei einem angenommenen Eintrag von 1 l Wasser (Tränkewasserverluste) pro Tierplatz (TP) und Tag sowie einer Verlagerung von 10 % des Kots in den Urin aufgrund unvollständiger Trennung der Fraktionen errechnet sich eine Urin- bzw. Kotmenge von 802/422 kg/TP und Jahr respektive von 2,2/1,2 kg/TP und Tag. Eine Urinverarbeitungsanlage für die Konzeptstallgröße wäre somit auf eine Tagesmenge von 3,3 m<sup>3</sup> auszulegen. Die errechneten Nährstoffgehalte im Urin liegen bei 10/0,44/5 kg/t für Stickstoff, Phosphor und Kalium. Die errechneten Gehalte sind mit denen der Literaturrecherche (Kap. 3.5) vergleichbar.

Tabelle 5: Kalkulatorische Anfallmengen und Gehalte an Kot und Harn

Exkrement	Masse/Anfallmenge [kg/TP]					Gehalte [g/kg]			
	FM	TM	N	P	K	TM	N	P	K
Kot	469	117	2,84	1,56	0,97	250	6,1	3,3	2,1
Harn	471	9,4	8,0	0,2	3,9	20	17	0,42	8,3
Σ	940	127	10,8	1,8	4,9				
<b>% ... von Gesamt im Harn</b>	<b>50</b>	<b>7,4</b>	<b>70,4</b>	<b>11,1</b>	<b>79,5</b>				
<b>Bei Eintrag v. 1 l Wasser pro TP und Tag durch Tränkewasserluste und 10 % Kot in das Urin-Wassergemisch</b>									
Kot	422	105	2,56	1,4	0,87	250	6,1	3,3	2,1
Jauche	802	21	8,3	0,36	4,0	26,3	10,3	0,44	5,0
<b>% ... von Gesamt im Urin-gemisch (mit Wasser und Kot)</b>		<b>16,5</b>	<b>76,9</b>	<b>20</b>	<b>81,6</b>				

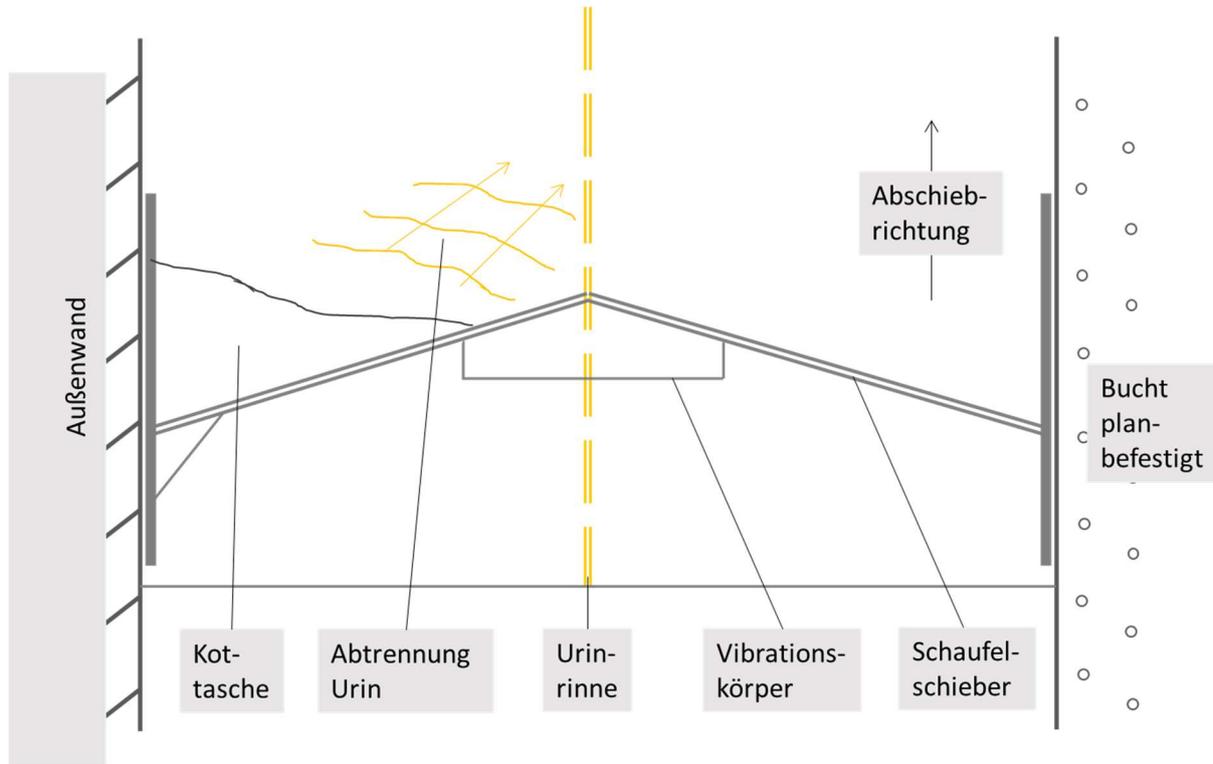
(eigene Berechnungen auf Grundlage DLG 2014/DLG 2005/ Horlacher et al. 2014/ZifoWin, 2010)

#### 4.4.2 Möglichkeiten der praktischen Umsetzung der Kot-Harn-Trennung und der Exkrementaufbereitung

##### Kot-Harn-Trennung

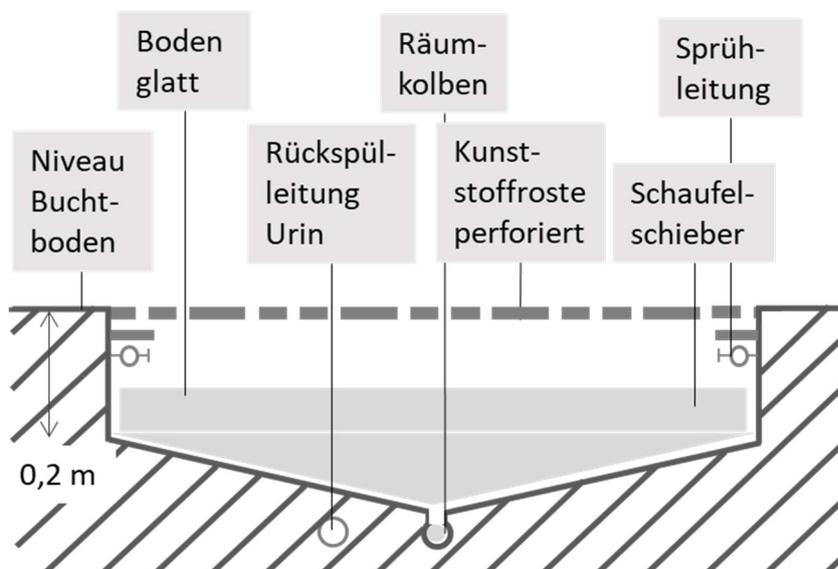
Der Mistbereich ist im Unterflurbereich mit einem weiterentwickelten Kotschieber ausgestattet, mit dem Kot und Harn effizient getrennt werden und der Urin frei in eine mittige Urinrinne ablaufen kann. Der Kotschieber wird zu diesem Zweck mit einem über einen Akkumulator betriebenen Vibrationsmodul ausgerüstet, das für die Verlagerung des Kotes in die außenliegenden Bereiche („Kottaschen“) des Schiebers sorgt und gleichzeitig eine Durchmischung von Kot und Harn verhindern helfen soll. Die betonierte und bis zu 10 % geneigte Grundfläche des Kanals wird mit Epoxidharz (alternativ Silolack) überzogen, so dass eine schnelle Dränung des Urins zur Rinne erfolgen kann. Der mit Kunststofflippen versehene Schieber räumt die Fläche sauber aus (Abbildung 7).

Abbildung 7: Vibrationsschieber



Der Entmistungsbereich ist im Unterflurbereich weiter mit einem Sprühsystem ausgerüstet, mit dem Wasser, zur schnellen Ableitung des Urins, oder Stabilisierungsflüssigkeiten auf die Schieberfläche und auf die Unterseite der Roste aufgesprüht werden können, um die Hydrolyse von Harnstoff zu blockieren (Abbildung 8).

Abbildung 8: Querschnitt des Ausräum- und Stabilisierungssystems für Kot und Harn mit Mistschieber, Rückspüleleitung und Sprühleitung zur Stabilisierung von Urin

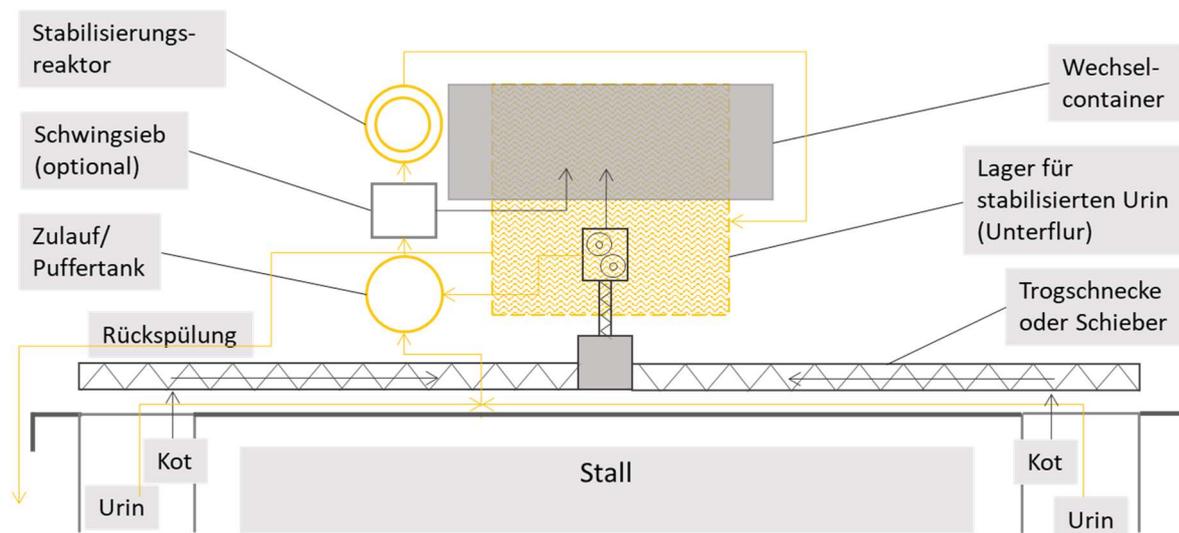


Für diese Stabilisierungsfunktion können Säuren (z.B. Schwefelsäure) oder Laugen (Kalkmilch) genutzt werden (Kap 3.6.1), jedoch auch synthetische Ureasehemmstoffe (SKWP, 2020). Auch die biologische Oxidation (Kap 3.6.1) kann potenziell eingesetzt werden. Diese wird im Rahmen des Vorhabens nicht weiter betrachtet, da der hohe Strombedarf, der temperaturempfindliche biologische Prozess und potenzielle gasförmige N-Verluste als nachteilig gegenüber der Behandlung mit Säuren oder Laugen angesehen werden.

Zur schnellen Ableitung des Urins wird zusätzlich ein Rückspülsystem (Rückspülflüssigkeit stabilisierter Urin) installiert, mit dem die mittige Urinrinne regelmäßig gespült sowie die Bildung von Staunasen aus Futter- und Kotresten zuverlässig unterbunden werden kann.

Die Fraktionen Kot und Harn werden außerhalb des Stalles getrennt erfasst (Abbildung 9). Der Kot wird über den Kotschieber zum Ende des Stalles transportiert. Von dort kann der Weitertransport zum Wechsel-/ Sammelcontainer über eine Trogschnecke oder einen Schieberkanal erfolgen. Möglich ist es jedoch auch, jeder Schieberbahn einen Kleincontainer beizustellen. Dieser kann mit mobiler Technik aufgenommen und in einen Sammelcontainer entleert werden. Der Sammelcontainer kann sich sowohl direkt am Ende des Schieberkanals befinden, jedoch auch stallmittig oder seitlich von einer Gruppe von Ställen positioniert werden. Über eine mechanische Separationstechnik können Restflüssigkeiten aus dem mit dem Schieber ausgeräumten Kot abgetrennt werden; die Flüssigkeit wird der Urinverarbeitungskaskade zugeführt (Abbildung 9). Der Mistenbereich ist mit maximal zulässig perforierten Rosten zu versehen, die sowohl Standsicherheit für die Tiere bieten als auch eine schnelle Passage des Kotes in den Schieberkanal ermöglichen.

**Abbildung 9: Prinzipskizze des Exkrement-Behandlungssystems mit Trennsystemen, Wechselcontainer für Kot, Reaktionsbehälter und Zwischenlager für Urin**



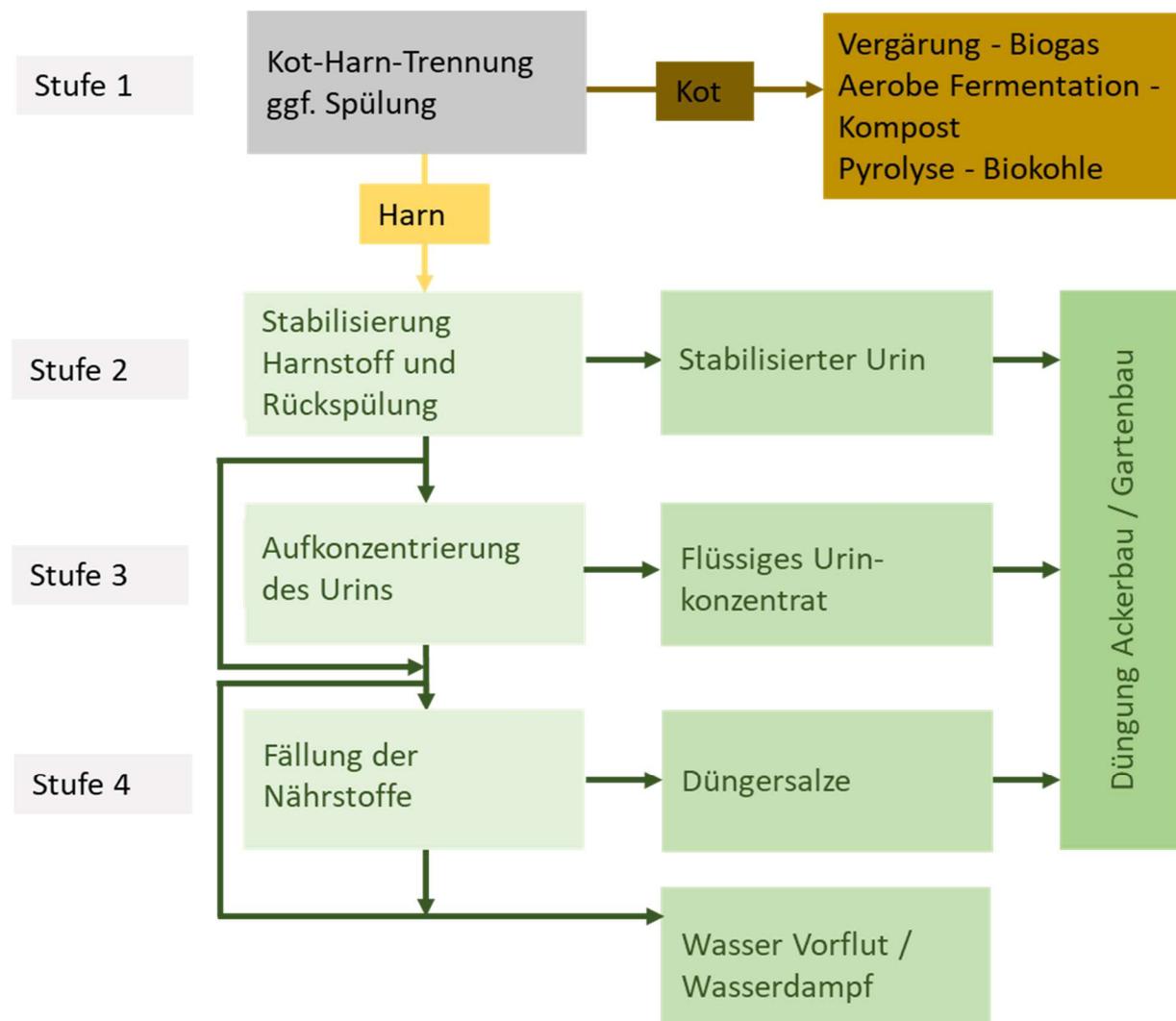
### Weiterverarbeitung Kot

Der Kot (mit Reststroh aus dem eingestreuten Komfortbereich) kann als Substrat für Biogasanlagen dienen. Dadurch wird auch die Vergärung von Schweineexkrementen wirtschaftlich sinnvoll (Schweinegülle ist als Gärsubstrat in der Regel kaum wirtschaftlich einsetzbar wegen der niedrigen Energiedichte, sowie des geringen Anteils an organischer Substanz bzw. des hohen Wassergehalts). Durch die Nutzung als Biogassubstrat werden Methanemissionen in die Atmosphäre weitestgehend vermieden und kontrolliert im Biogassystem genutzt. Theoretischen Berechnungen von Döhler (2019) zufolge entspricht das Biogaspotenzial einer Tonne Schweinekot etwa 0,45 t Silomais, somit könnte ein wesentlicher Beitrag zur Verwertung nicht flächenverbrauchender Biogassubstrate geleistet werden. Die Optionen für die Verwendung als Biogassubstrat werden im Rahmen eines von der FNR geförderten Vorhabens untersucht (siehe Kap 13). Alternativ kann der Kot getrocknet oder in geeigneten Systemen zu Biokohle (Pyrolyse/HTC) umgesetzt werden. Auch Kompostierungsverfahren sind möglich.

### Verarbeitung Urin

Für die Aufbereitung des Urins wurde ein aufeinander aufbauendes modulares System entwickelt, die Verfahrensschritte sind im Folgenden beschrieben (Abbildung 10):

Abbildung 10: Schema zur Beschreibung des Grundprinzips des Exkrement-Behandlungssystems



Stufe 1: Kot und Harn werden beim häufigen Ausräumen aus dem Mistkanal getrennt. Durch schnelles Ausräumen der Urinrinne kombiniert mit Spülungsflüssigkeit (Wasser) wird der Ort der Harnstoffhydrolyse überwiegend in das Urinlager verschoben. Die hierfür erforderliche Häufigkeit des Ausräumens kann bisher nicht genau definiert werden. Mit Hilfe eines mechanischen Trennsystems oder durch eine Beruhigungsphase und Sedimentation werden grobe organische Bestandteile abgetrennt und dem Kotcontainer zugeführt.

Stufe 2: Der Urin wird durch Zugabe von Säure oder Lauge stabilisiert. Die Zugabe der Stabilisierungsreagenzien erfolgt in einem außerhalb des Stalles befindlichen Reaktionsbehälter. Der behandelte Urin wird in den Stall unterhalb der Roste rückgespült und für die Stabilisierung des frischen Urins genutzt. Die Tiere kommen so nicht mit den Chemikalien in Berührung. Der stabilisierte Urin wird später in einem abgedeckten Behälter gelagert und kann als Wirtschaftsdünger auf Nutzpflanzen ausgebracht werden.

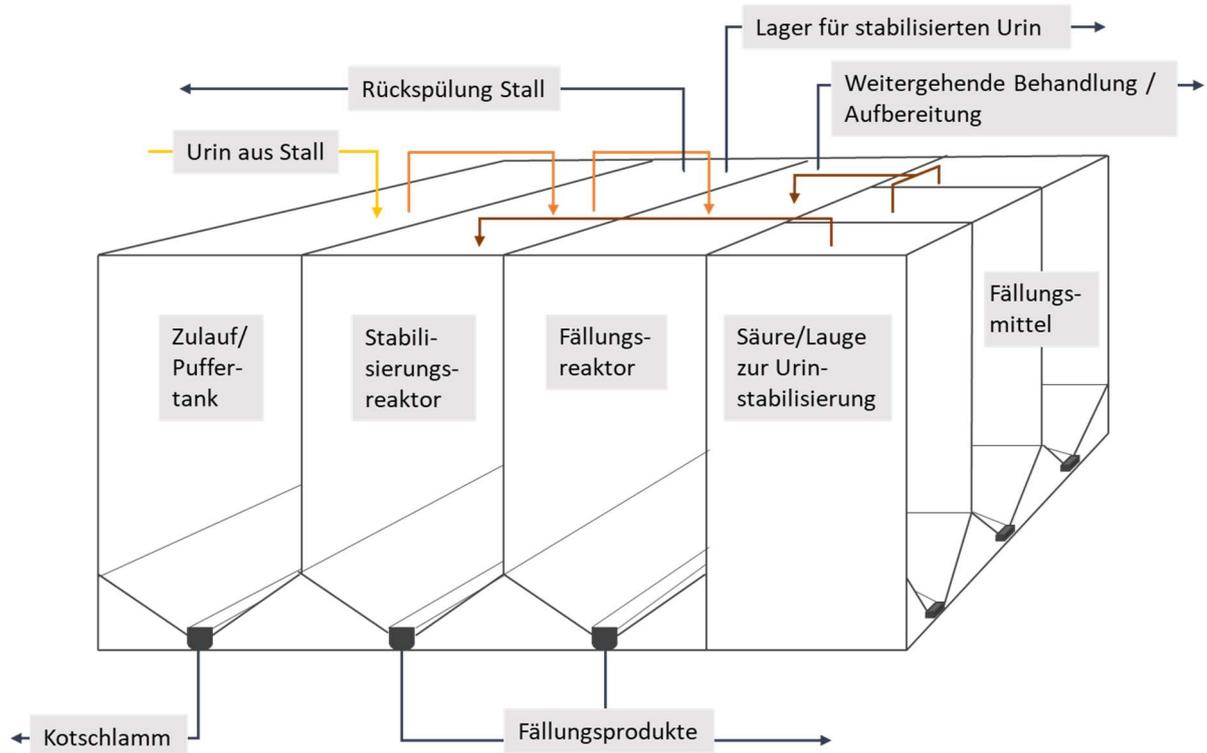
Stufe 3: Mit Hilfe einer mehrstufigen Membrankaskade mit Ultrafiltration-Umkehrosmose oder einer mehrstufigen Umkehrosmose (Döhler 2017) wird der Urin auf etwa 1/4 seines Volumens aufkonzentriert, das abgetrennte Wasser ist vorflutfähig. Somit entsteht je nach Verfahren ein flüssiger Wirtschaftsdünger mit ca. 20 - 25 kg N/t, welcher unmittelbar pflanzenverfügbar ist (ca. 5-fache Stickstoff-Konzentration im Vergleich zu Gülle). Entsprechend kann Technik zur Applikation mit geringerer Eigenmasse /Bodenlast eingesetzt werden. Anstelle der Membrantechnik kann eine Verdampfungstechnik zur Aufkonzentrierung genutzt werden. Das abgetrennte Wasser wird entweder in einen Vorfluter geleitet, als Brauchwasser genutzt oder (im Falle von Verdampfungstechniken) als Wasserdampf in die Atmosphäre entlassen.

Stufe 4: Durch die Einstellung von pH-Wert und von Ionenkonzentrationen werden in einem oder mehreren Reaktoren gezielt Fällungsreaktionen ausgelöst, somit Salze (Kristalle) erzeugt, die überwiegend aus Ca, Mg, P, und N bestehen. Aufgrund des hohen Löslichkeitsprodukts von Kalium, ist mit geringen Fällungsraten bei diesem Element zu rechnen bzw. müssten genauere Untersuchungen zur KMP Fällung durchgeführt werden. Die Nährstoffkonzentrate werden abgetrennt und stehen als Düngersalze oder als Grundstoff für Düngemittel zur Verfügung.

Es wird davon ausgegangen, dass die Fällungsreaktionen, vor allem mit den Reaktionspartnern P, Ca, Mg bereits im Roh-Urin nach Zugabe von Kalkhydrat erfolgen, so dass die Fällung auch als Stufe 3 und die Abtrennung von Wasser mit Membrantechniken als Stufe 4 vorgenommen werden kann.

Die Zumischung von Chemikalien erfolgt außerhalb des Stalles in einem dafür vorgesehenen Reaktor, Chemikalien werden für Personal und Tier gefahrlos gelagert und vollautomatisch zudosiert (Abbildung 11).

Abbildung 11: Prinzipskizze zur Urinstabilisierung und Weiterbehandlung

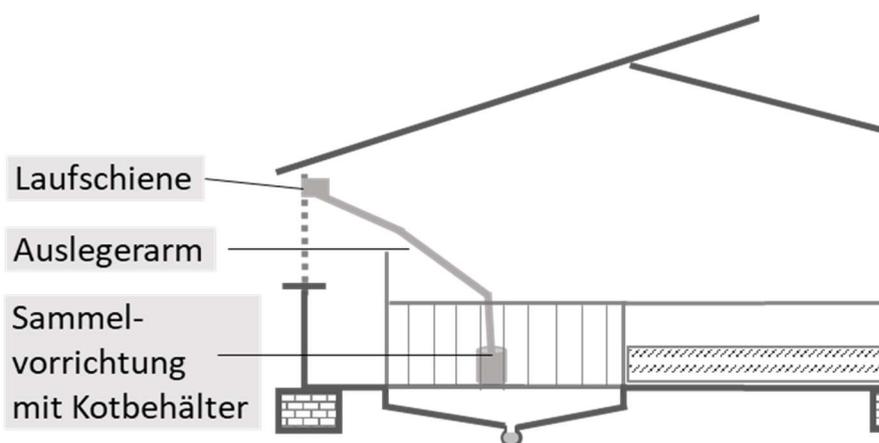


Laborversuche zur Fällung der Nährstoffe werden von der TU Berlin in Kooperation mit DöhlerAgrar durchgeführt (DBU Vorhaben AZ 34888/01). Erste Ergebnisse bestätigen die theoretischen Berechnungen (s. Kap. 3.6).

### Kotsammlung im Oberflurbereich

Alternativ zur Kot-Harn-Trennung im Unterflurbereich wurde das Konzept für eine Technik zur oberflächigen Sammlung des Kotes vorentwickelt (Abbildung 12).

Abbildung 12: System zur oberflächigen Sammlung von Kot



Dieses Konzept sieht minimal perforierte Roste (ca 3 %) im Mistbereich vor, so dass der Urin rasch in den Unterflurkanal passieren kann, der Kot jedoch auf den Rosten verbleibt und von einem automatischen Sammelsystem aufgenommen werden kann. Die aus Gründen des Tierwohls und der Tiergesundheit ohnehin angedachte Zufütterung von Raufutter fördert die Verfestigung der Kot-Konsistenz, so dass das Material besser maschinell aufgenommen werden kann. Das Konzept sieht vor, dass ein an Stallaußenwand oder Stalldecke montierter Laufschienenroboter von Bucht zu Bucht fährt, in die Bucht „eintaucht“ und Kot und Einstreu mit einer Bürst-Saugkombination oder Kratz-Saugkombination aufammelt. Vor dem Eintauchen in die Bucht wird ein an den Roboter angebrachtes „Treibschild“ in die Bucht eingeführt, mit dem die Tiere in Richtung der Buchtenmitte gelenkt werden. Danach wird der Reinigungsvorgang von der Buchtenmitte hin zur Außenwand vorgenommen. Die Reinigung der Bucht kann über die Mistzone hinaus bis etwa in die Mitte der Bucht erfolgen, somit können auch Futterreste und fehlabgesetzter Kot im planbefestigten Bereich aufgenommen werden. Eine „Exkrementerkennung“, beispielsweise mittels NIRS, könnte die Einsatzzeit in der Bucht verringern helfen.

Eine weitere Alternative kann das Kotbandsystem nach Remmert darstellen (s. Kap. 3.4), welches fest in jeder Bucht verbaut ist und den Kot zum Kontrollgang hin befördert. Von dort muss dieser über Schieber- oder Bandsysteme nach außen zum Wechselcontainer befördert werden.

Unterflurschiebersysteme sind gegenüber dem Laufschienenroboter hinsichtlich Hygieneaspekten im Vorteil, da durch das Wechseln von Bucht zu Bucht das Risiko für das Verschleppen von Krankheitskeimen zunimmt.

#### **4.5 Einsatzmöglichkeiten des Stall-, Kot-Harn-Trenn- und Urinbehandlungssystems**

Das Unterflursystem zur Kot-Harn-Trennung eignet sich sowohl für Neubauten als auch für Umbauten. In vielen vollperforierten und klimatisierten Ställen lässt sich der Güllekanal durch einen Schieberkanal ersetzen, in dem auch die Sprühleitungen für die Urinstabilisierung verbaut werden könnten. Allerdings ist bei vollperforierten Systemen mit hohen Umbaukosten zu rechnen. Besser geeignet sind aus Kostengründen teilperforierte Stallsysteme, in den meisten Fällen ist die Umrüstung bautechnisch möglich.

Das System eignet sich sowohl für landwirtschaftliche Betriebe mit ausreichenden Verwertungsflächen als auch für Gülle-Überschussbetriebe. Für Überschussbetriebe ist das System gut geeignet, da mit dem Behandlungsverfahren die Problemnährstoffe P sowie organisch gebundener N zu mindestens 90 % mit dem Kot aus dem Betrieb exportiert werden können.

Das Stallsystem kann sowohl als einreihige Variante mit Pultdach als auch zweireihig mit Satteldach oder Flachdach ausgeführt werden. Ebenso sind Varianten mit mehreren nebeneinander platzierten ein- oder zweireihigen Stalleinheiten mit zentralen Ver- und Entsorgungseinheiten denkbar.

Für Bestände von 1 000 bis 2 000 Tieren ist das Kot-Harn-Trennsystem mit Urinstabilisierung eine ökonomisch realistische Option, durch technische Fortentwicklung hin zur Vollautomatisierung könnte auch zukünftig die Nährstofffällung und/oder die Urinaufkonzentration für solche Einheiten darstellbar sein.

## 5 Tierwohlkomponenten

Dem Ziel des Vorhabens entsprechend wurde die Einhaltung von Tierwohlkriterien gleichrangig mit Umweltschutzkriterien berücksichtigt. Durch die offenen Seitenwände und den überdachten Auslaufbereich werden allen Tieren Frischluft, Sonnenlicht, Beschattung und weitere Umweltreize gewährt. Eine Flachdachkonstruktion (wie in Kap 4.2 beschrieben) bietet Potenzial für erheblich mehr Zutritt von direktem Sonnenlicht.

Im Aktivitäts- und Fressbereich befindet sich Beschäftigungsmaterial und es besteht die Möglichkeit zum gemeinsamen Fressen sowohl von Konzentrat- als auch von Raufutter. Die Tiere verfügen über ausreichend Platz (wahlweise 1,1 bis 1,4 m<sup>2</sup>/Tier) zur Ausbildung von Funktionsbereichen und zum Abbau von Stress. Die Komfortzone ist durch eine feste Wand abgetrennt, die Tiere können dort abliegen.

Die Tiere können die Türe zum Außenbereich selbst öffnen, so dass freier Zugang zu allen Funktionsbereichen und Temperaturzonen ermöglicht wird. Lediglich zur Reinigung der Buchten oder zur Einzeltierbehandlung ist ein Absperren der Gruppe und von Einzeltieren notwendig. Stroh wird in der Komfortzone zugegeben, welches zum Fressen, als Beschäftigungsmaterial oder als Unterlage zum Abliegen genutzt werden kann. Mit dem Stroh können auch kompaktierte Raufutterkomponenten zugegeben werden, im Stroh können die Tiere so das Wühlbedürfnis befriedigen und die wühlende Futtersuche ausüben. Dies wird die Ausbildung und Einhaltung dieses Funktionsbereiches verstärken, „Fehlnutzungen“ werden unwahrscheinlicher.

Wie die bisherigen Betriebserfahrungen in gut geführten Systemen der Schauer Agrotrolic zeigen, kann bereits mit dem Haltungssystem Nature-line auf das Kupieren von Schwänzen, dem Tierschutzgesetz entsprechend, verzichtet werden. Die Funktionsbereichsdifferenzierung, das Beschäftigungsangebot, die Möglichkeit zum Wärmen und Abkühlen in der Komfortzone werden voraussichtlich noch mehr eine stressfreie Haltung befördern. Die Gruppengröße ermöglicht die rasche Ausbildung einer Herdenhierarchie, so dass Rangkämpfe minimiert werden können, weiterhin lässt die Gruppengröße sowie die Anordnung der durch das Stallpersonal begehbaren Bereiche eine effiziente Tierbeobachtung zu.

Die vom Wissenschaftlichen Beirat für Agrarpolitik (WBA) des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) formulierten Ansprüche an eine gesellschaftsfähige Schweinehaltung werden mit dem System weitestgehend erfüllt.

## 6 Energiebedarf für Heizung und Kühlung und Energiebereitstellung über Photovoltaik

### Methode

Für die Ermittlung des Heiz- und Kühlbedarfs des gekapselten Komfortbereiches wurde im Rahmen der Studie ein Kalkulationswerkzeug entwickelt, welches darüber hinaus die Berechnung der dafür erforderlichen Stromenergie über Photovoltaikdachmodule ermöglicht. Die Beheizung des gekapselten Bereiches kann kalkulatorisch über eine mit Strom (elektrisch) beheizte Fußbodenheizung und über eine Warmwasser-Fußbodenheizung, die über eine Wärmepumpe gespeist wird, bewerkstelligt werden. Darüber hinaus kann der Kühlungsbedarf der Komfortzone über eine Wärmepumpe ermittelt werden. Das Kalkulationswerkzeug greift auf räumlich und zeitlich aufgelöste Klimadaten Deutschlands zurück, so dass individuelle Berechnungen für jede Klimaregion Deutschlands sowohl für die Stromerzeugung als auch für den Strombedarf möglich sind. Berechnet werden der Wärmeverlust im gekapselten Bereich, die Oberflächentemperatur der Liegefläche und der Energiebedarf zur Deckung der Wärmeverluste bzw. der Kühlleistungsbedarf des Innenraums.

Aufgrund der Gleichdrucklüftung und der folglich geringen Lüftungsrate im Komfortbereich sind die Wärmeverluste gering.

Es wird angenommen, dass die Temperatur im freigelüfteten Teil des Stalls der Außentemperatur entspricht. Die Innentemperatur des gekapselten Bereichs wird bei sehr hohen oder niedrigen Temperaturen mittels Regeltechnik über Heiz- und Kühlsysteme angepasst. Übersteigt die Innentemperatur einen gegebenen Sollwert (Annahme Temperaturgrenze 24 °C), wird die Innentemperatur des gekapselten Bereichs um 3 °C gemindert. Des Weiteren kann die Innentemperatur bis zu einer Mindesttemperatur absinken (hier: 20 °C).

Zur Prognose des Heiz- und Kühlbedarfs kann die zugrundeliegende Außentemperatur stundengenau aus Wetterdaten übernommen werden, die PV-Leistung wird ebenfalls stündlich berechnet, so dass ein sehr genaues Stromerzeugungs- und Stromverbrauchsprofil erstellt werden kann.

In die Berechnung fließt die Kubatur des gekapselten Komfortbereiches ein sowie die Wärmeabgabe über den Boden und Wände, weiterhin können als Variablen die Anzahl der Schweine, die sich im klimatisierten Bereich aufhalten, sowie deren spezifische Wärmeleistung eingegeben werden. Letztere ist abhängig vom Tieralter bzw. der Tiermasse und variiert zwischen 30 und 150 W pro Tier. Weiterhin kann eine Solltemperatur für den Innenraum der Komfortzone eingegeben werden.

Mittels Eingabe der für das Stallsystem ermittelten durchschnittlichen Aufenthaltsdauer in der Komfortzone sowie der sensiblen spezifischen Wärmeleistung je Schwein, kann die durch die Schweine eingebrachte Wärmeleistung in den gesamten Komfortbereich für einzelne Monate und im Jahresverlauf berechnet werden.

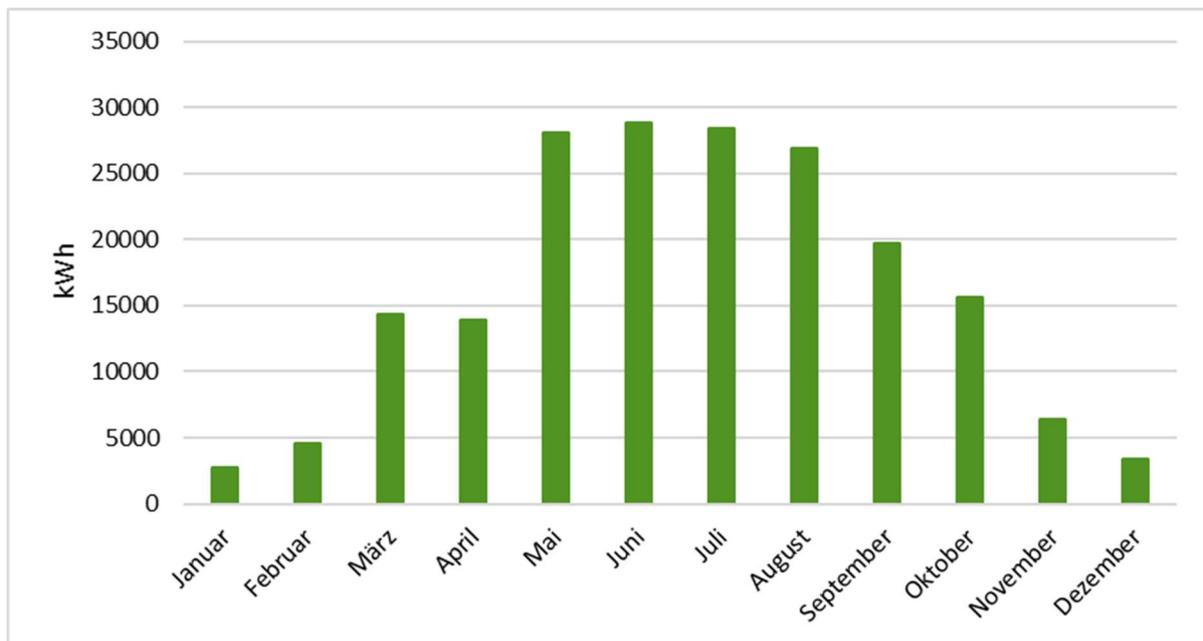
Der Strombedarf für die Beheizung und die Kühlung wird dem Stromerzeugungsprofil für die PV-Anlage kalkulatorisch gegenübergestellt, das Erzeugungs-Abgabeprofil kann durch die Prognose der Wirkung eines Speichers für den PV-Strom entzerrt werden. Abgesehen vom Energiebedarf der Temperaturführung können weitere Verbraucher für Strom kalkuliert und mit dem Dargebotsprofil abgeglichen werden.

### **Ergebnisse**

Die Abbildung 13 zeigt das Erzeugungsprofil der Photovoltaikanlage im Jahresverlauf, insgesamt werden 193.000 kWh erzeugt, 24 % im Winterhalbjahr von Oktober bis März, 76 % im Sommerhalbjahr von April bis September, auf die Sommermonate Juni bis August entfallen 44 %.

Für den Stallbetrieb (Fütterung, Entmistung, Beleuchtung,) mit kontinuierlicher Belegung, jedoch ohne Klimatisierung, wird angenommen, dass pro Tierplatz 17,5 kWh benötigt werden. Das sind in der Summe etwa 26.000 kWh, was etwa 13 % der PV-Erzeugung ausmacht. Der Stromverbrauch für die Beheizung des gekapselten Bereiches hängt maßgeblich ab von der Anzahl der Tiere, die sich im Komfortbereich aufhalten und von der spezifischen Wärmeabgabe der Tiere (Tiermasse), weniger von Einfluss sind Wärmeverluste über die Gleichdrucklüftung, Fußböden und die umgebenden (isolierten) Wände.

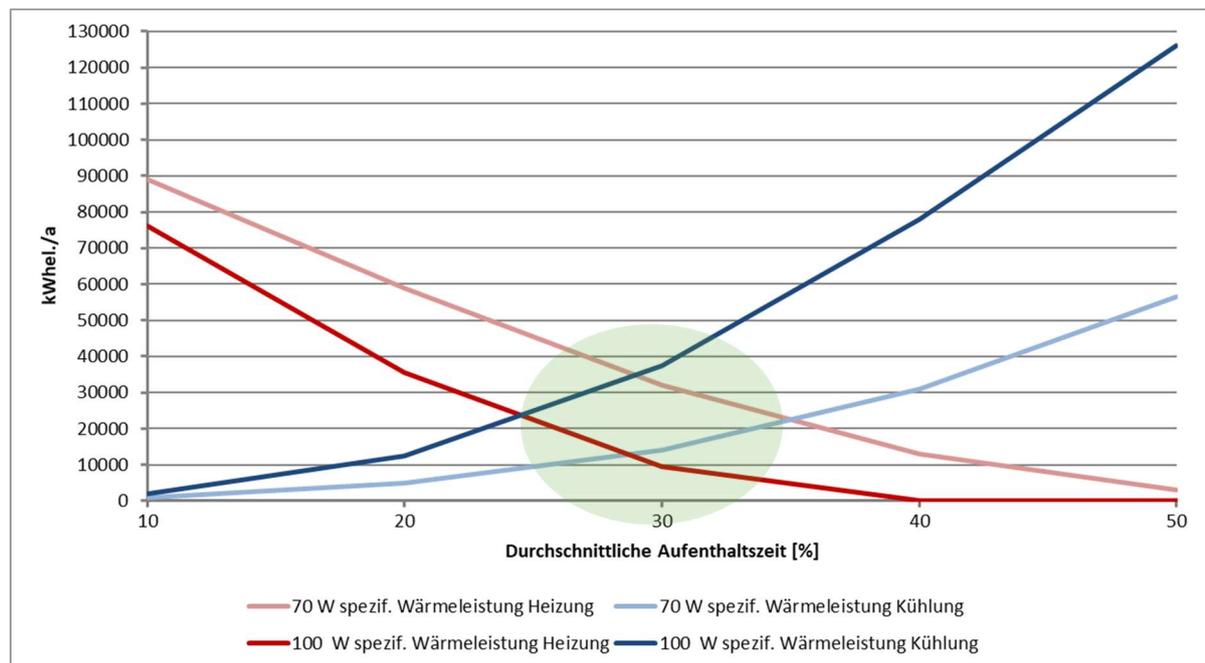
**Abbildung 13: Errechnetes monatliches Stromerzeugungsprofil einer auf dem Konzeptstall installierten Photovoltaikanlage mit 1500 m<sup>2</sup> Modulfläche für einen Standort in Hessen**



In der Abbildung 14 ist der Strombedarf für die Heizung und für die Kühlung über Wärmepumpen in Abhängigkeit der durchschnittlichen Aufenthaltshäufigkeit der Tiere im Komfortbereich (10 – 50 %) und der Wärmeleistung der Tiere (70 – 100 W/Tier) dargestellt. Aufgrund der Beobachtungen im Pilotstall von Schauer Agrotronic wird angenommen, dass die durchschnittliche Aufenthaltshäufigkeit im Komfortbereich im Sommer ca. 20 – 30 % beträgt, im Winter bei Temperaturen deutlich unter Null kommt es vor, dass sich zeitweise alle Tiere der Bucht im Komfortbereich befinden. Da dies überwiegend zu Ruhezeiten geschieht und bevorzugt bei jungen Tieren, erscheint auch im Winter eine durchschnittliche Aufenthaltshäufigkeit von 30 % realistisch. Aus der Grafik geht hervor, dass sich bei durchschnittlichen Wärmeleistungen der Tiere von 70 – 100 W bei einer Aufenthaltszeit von 30 % ein jährlicher Bedarf für Kühlung und Heizung von insgesamt rund 45.000 kWh Strom ergibt (30 kWh/TP), dies entspricht etwa einem Viertel der gesamten PV-Stromproduktion. Der mit dem grünen Oval markierte Bereich stellt das vermutete, durchschnittliche Lastprofil über den Jahresverlauf dar.

Mit diesen Bedarfswerten können mit der PV-Stromerzeugung Autarkiegrade von etwa 50 % erreicht werden, bei Annahme eines 100 W-Speichers von mehr als 85 %. Der Eigenverbrauchsanteil kann zwar durch einen Speicher verdoppelt werden, trotzdem lässt sich ein signifikanter Zukauf aus dem Netz nicht vermeiden, da die Stromerzeugung in den Wintermonaten November bis März deutlich unter dem Gesamtstrombedarf (für Heizung und die sonstigen Verbraucher) liegt.

**Abbildung 14: Strombedarf für die Heizung und für die Kühlung über Wärmepumpen in Abhängigkeit der durchschnittlichen Aufenthaltshäufigkeit der Tiere im Komfortbereich (das grüne Oval markiert das vermutete durchschnittliche Lastprofil)**



Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass der Konzeptstall mit einer PV-Dachanlage weitgehend (ca. drei Viertel des Strombedarfs) regenerativ betrieben werden kann, womit zusätzlich zu den vermiedenen Methanemissionen weitere Klimagasemissionen verhindert werden können. Die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage lässt sich noch nicht abschätzen, hierzu müssten genauere Erhebungen bezüglich des Tierverhaltens, respektive der tatsächlichen Aufenthaltszeiten im Komfortbereich sowie Messungen zur Verifizierung der berechneten Heiz- und Kühlleistungen erfolgen.

## 7 Ökonomie

### Methode

Zur Prognose der Verfahrenskosten und der Wirtschaftlichkeit des im Rahmen der Konzeptstudie entwickelten Haltungssystems wurden Praxis-Recherchen durch Befragung von Behörden und Landwirten zur Dynamik des Investitionsbedarfs für Schweinestallungen durchgeführt. Daraus geht hervor, dass die Baukosten (Investitionsbedarf für die Errichtung eines bezugsfertigen Stallgebäudes) in den letzten 10 Jahren massiv angestiegen sind, von Steigerungsraten von jährlich 3 bis 5 % ist – entgegen der Prognose nationaler Experten (topagrar-online, 2011) auszugehen.

Als methodisches Grundgerüst wurde die KTBL-Online-Anwendung BAUKOST genutzt. Da jedoch in BAUKOST (Stand 2018) überwiegend Standardstallsysteme (v. a. klimatisiert und vollperforiert) abgebildet sind, die in der Regel aufgrund unterschiedlicher Stallgrößen und heterogener Datenerhebungszeiträume nicht miteinander vergleichbar sind (was zu systematischer Unterschätzung des Investitionsbedarfs führt), wurde für die Berechnungen ein in sich konsistentes Kalkulationswerkzeug für die Schweinemast entwickelt, mit dem die betriebswirtschaftlichen

Parameter für verschiedene Haltungssysteme, einschließlich eines Modells für den DBU-Konzeptstall, vergleichend berechnet werden können.

### **Investitionsbedarf**

Den eigenen Investitionsbedarfserhebungen entsprechend wurden die Investitionen aktualisiert und über eine Indizierung Investitionen für die Erschließung und die Baunebenkosten hinzugerechnet. Die Überprüfung der kalkulierten Baukosten ergibt gute Übereinstimmungen mit tatsächlichen Bauvorhaben.

### **Leistungs-Kosten-Rechnung**

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeitsparameter erfolgte eine Leistungs-Kosten-Rechnung nach Schroers und Sauer (2011), vorplanerische Kenndaten wurden der KTBL-Datensammlung Betriebsplanung entnommen und durch eigene Berechnungen sowie Annahmen ergänzt.

Verglichen wird mit den Berechnungen a) ein Referenzstall „Standard“, der den heutigen Standard der Mastschweinehaltung abbilden soll (vollperforiertes System mit Platzangebot nach aktueller Schweinehaltungsverordnung mit  $0,75 \text{ m}^2/\text{Tier}$ , Entmistung über ein Wechselstausystem in einen außenliegenden Güllebehälter), b) ein Zukunftsreferenzstall „StandardPlus“ mit erhöhtem Platzangebot von  $1 \text{ m}^2/\text{Tier}$ , Strohraufe und einer mehrstufigen Abluftreinigung sowie der in den vorherigen Kapiteln beschriebene c) Konzeptstall „Stall ohne Mist und Gülle“ (mit  $1,4 \text{ m}^2/\text{Tier}$ ). Kalkuliert wurde für alle Varianten mit jeweils 1 500 Stallplätzen. Angenommen wird, dass alle Haltungssysteme mit Breifutteranlagen ausgestattet sind, die täglichen Zunahmen  $790 \text{ g}$  und die Tierverluste  $2,3 \%$  betragen sollen.

Aus den oben beschriebenen Recherchen und Datenerhebungen leitet sich für die Stallsysteme ein Investitionsbedarf von  $0,978$ ,  $1,396$  und  $1,424$  Mio. € ab, was einer spezifischen Investition von  $652$ ,  $931$  und  $949$  € entspricht (Tab. 6). Bei einem Platzangebot im Konzeptstall (StoMuG) von  $1,1 \text{ m}^2/\text{Tier}$  beträgt der Investitionsbedarf ca.  $1,3$  Mio. €, der Konzeptstall liegt damit auf ähnlichem Niveau wie emissionsarme Standardstallsysteme, wie sie zukünftig aufgrund von Tierschutzvorgaben zu erwarten sind. Die wichtigsten Unterschiede bezüglich der Investitionen zwischen der Variante StandardPlus und dem Konzeptstall liegen beim Güllebehälter, einer Abluftreinigungsanlage (beim Konzeptstall nicht vorhanden und nicht notwendig) sowie den Anlagen zur Trennung bzw. getrennten Behandlung von Kot und Urin beim Konzeptstall. Nicht eingerechnet bei den Investitionen wurde eine Anlage zur weitergehenden Aufbereitung von Urin, stattdessen wurden in der Leistungs-Kosten-Rechnung pauschale Kosten hierfür angenommen. Die sehr erheblichen Unterschiede beim Investitionsbedarf zwischen dem Standard- und dem StandardPlus-Haltungssystem sind auf die Abluftreinigungstechnik und die größere Gebäudekubatur zurückzuführen.

**Tabelle 6: Investitionsbedarf nach Baugruppen**

	Baugruppe	Standard	StandardPlus	StoMuG*
		€		
100	Grundstück	0	0	0
200	Herrichten und Erschließen	50.000	71.000	73.000
300	Bauwerk - Baukonstruktionen	568.000	826.000	700.000
400	Bauwerk - Technische Anlagen	165.000	267.000	505.000
500	Außenanlagen (Futter- & Exkrementlagerung)	105.000	105.000	16.000
600	Ausstattung und Kunstwerke	0	0	0
700	Baunebenkosten	89.000	127.000	130.000
800	Zuschüsse	0	0	0
	<b>Gesamtinvestitionen</b>	<b>977.000</b>	<b>1.396.000</b>	<b>1.424.000</b>

erforderlicher Zuschuss für die Angleichung der Baukosten 34,5 % oder 446.000 €

\*StoMuG = Stall ohne Mist und Gülle

Die Kosten und Leistungen der verschiedenen Haltungssysteme sind vergleichend in der Tabelle 7 beschrieben. Angenommen wird, dass die Ferkelkosten bei 70 € liegen, die Schlachtkörperpreise bei 1,80 €/kg. Aufgrund der höheren Investitionen ergeben sich für den StandardPlus und den Konzeptstall (StoMuG) erheblich höhere Gebäudekosten, für den StandardPlus Stall sind deutlich höhere variable Kosten aufgrund des Stromverbrauchs zu verbuchen. Für die Weiterbehandlung des Urins werden pauschale Kosten von 6 €/TP veranschlagt. Die Einzelkostenfreie Leistung des Standardsystems liegt mit den getroffenen Annahmen bei 3 €/TP. Die Einzelkostenfreie Leistung des StandardPlus und des Konzeptstallsystem liegt aufgrund der höheren Herstellungskosten noch um ca. 36 und 37 €/TP niedriger, die Stückkosten (Einzelkosten)/kg SG liegen für die Systeme bei 1,87, 2,00 und 2,01 €.

Tabelle 7: Leistung, Kosten, Erfolgsgrößen (Ferkel 70 € / 1,80 € / kg SG)\*

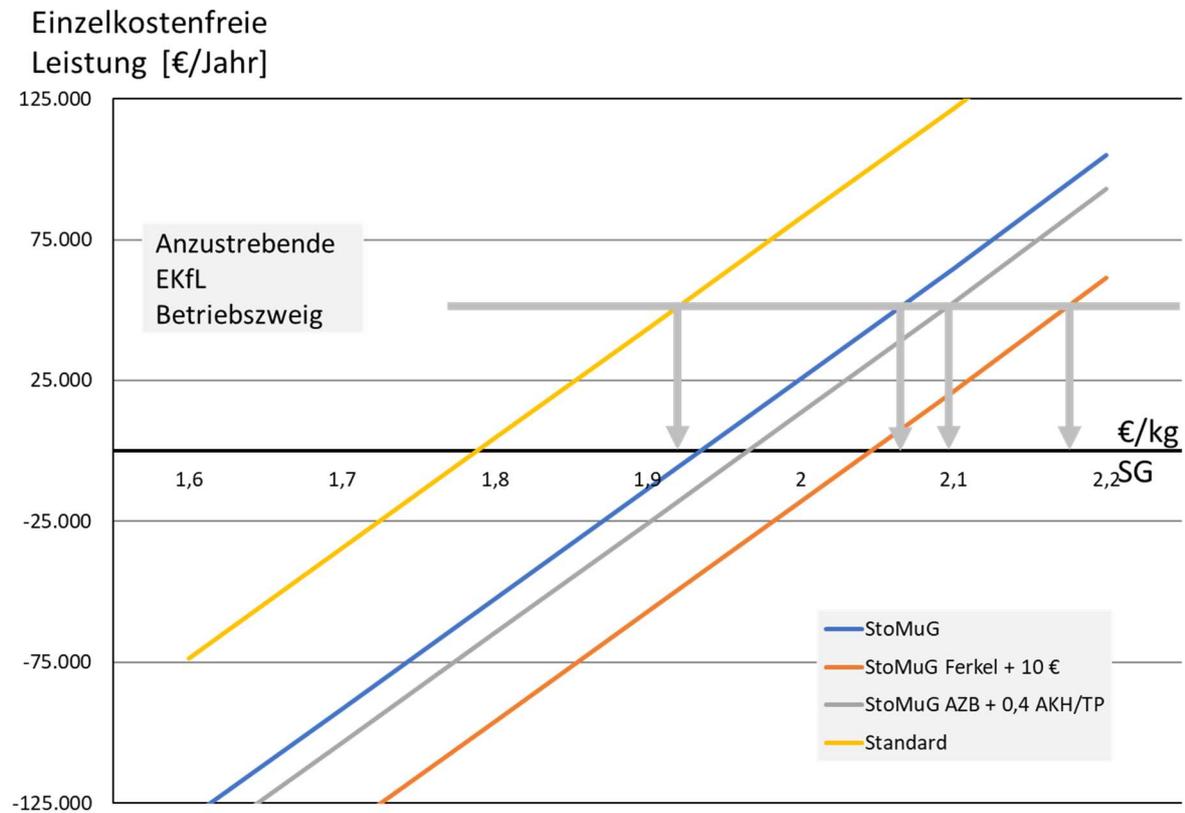
Leistungs-Kostenrechnung	Standard	StandardPlus	StoMuG**
	€/TP x a <sup>-1</sup>		
Leistungen	491	491	491
Variable Kosten	414	426	416
<b>Deckungsbeitrag</b>	<b>77</b>	<b>65</b>	<b>76</b>
Arbeiterledigungskosten fix	18	19	24
<b>Direkt- und arbeiterledigungskostenfreie Leistung</b>	<b>59</b>	<b>46</b>	<b>52</b>
Gebäudekosten	56	79	81
Weiterverarbeitung Exkremente	-	-	6
<b>Einzelkostenfreie Leistung</b>	<b>3</b>	<b>-33</b>	<b>-34</b>
Stückkosten	€/kg SG		
Direktkosten	1,58	1,63	1,59
Variable Kosten	1,58	1,63	1,59
Direkt- und Arbeiterledigungskosten	1,65	1,70	1,68
Einzelkosten	1,87	2,00	2,01
Arbeiterledigungskosten	0,07	0,07	0,09
Gebäudekosten	0,21	0,30	0,31
<b>Differenz Einzelkosten (=Preiszuschlag)</b>	<b>-</b>	<b>0,14</b>	<b>0,15</b>

\*Vermiedene Kosten für Wirtschaftsdüngertransport und -ausbringung nicht berücksichtigt

\*\*StoMuG = Stall ohne Mist und Gülle

Annehmend, dass für ein angemessenes Betriebszweigergebnis eine Einzelkostenfreie Leistung von 50.000 € erforderlich ist, müsste der Konzeptstall einen Verkaufserlös von 2,08 €/kg SG (Standard 1,93 €/kg SG, StandardPlus 2,07 €/kg SG) erzielen (Abbildung 15). Nicht eingerechnet sind dabei Aufschläge für weitere kostenbestimmende Faktoren. Beispielsweise ist für „Ringelschwanzferkel“ mit höheren Erzeugungskosten zu rechnen, wenn diese Mehrkosten 10 €/Tier betragen würden, wäre ein nochmals um ca. 0,1 €/kg SG höherer Verkaufserlös erforderlich.

**Abbildung 15: Erfolgsgrößen, Kostendeckung und anzustrebende Gewinne für den StoMuG bei variierenden Verkaufspreisen im BZ Mastschweine, 1500 MP, (Ferkel 70 €; 1,80 €/kg SG; Lohn 20 €/h)**



### Zusammenfassung

Aus den Berechnungen geht hervor, dass die Stallbaukosten selbst zwar zu einer signifikanten Erhöhung der Stückkosten im Vergleich zu Standardsystemen beitragen werden, jedoch andere bisher schwer prognostizierbare Faktoren die Mehrkosten bestimmen werden. Zu erwarten ist, dass Stroh, Raufutter, aber vor allem zunehmender Arbeitszeitbedarf und der Ferkelverkauf sowie der Aufwand für die Vermarktung weitere, die Kosten bestimmende Faktoren bilden werden.

## 8 Problematik Genehmigungsverfahren

Stallbauten, egal welcher Art, müssen den Regeln der Technik entsprechend geplant, errichtet und betrieben werden. Der beantragende Landwirt hat einen Rechtsanspruch auf die Genehmigung, wenn das Bauvorhaben den Bestimmungen des Baurechts und anderen öffentlich-rechtlichen Bestimmungen entspricht und die Erschließung gesichert ist. Freigelüftete und emissionsarme Tierwohlställe sind daher grundsätzlich genehmigungsfähig.

Für freigelüftete Tierwohlställe ergeben sich jedoch bei Genehmigungsverfahren häufig Probleme aus immissionsschutzrechtlicher Sicht. Relevant sind hierfür die Beurteilung der Ammoniak- und Geruchsemissionen sowie deren Ausbreitungsbedingungen und die Beurteilung der maximal zulässigen Belastungen der umgebenden Wohnbebauung und der sensitiven Ökosysteme. Emissionsseitig liegen für freigelüftete Ställe ohne Auslauf Anhaltswerte für Ammoniakemissionen in

der VDI Richtlinie 3894 Blatt 1 „Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen (VDI, 2011) vor, welche die Emissionsdaten für Schweine, Rinder, Geflügel und Pferde zusammenfasst.

Während für Ausläufe lediglich erwartet wird, dass die Ammoniakemissionen für den gesamten Stall im Vergleich zu vollklimatisierten Ställen mit Vollspalten zunehmen werden, wird bei freigelüfteten und teilperforierten Ställen von einer um ein Drittel geringeren Emission ausgegangen (Döhler et al. 2002, Haenel et al., 2018). Bezüglich der Geruchsemissionen wird in der VDI-RL für die verschiedenen Haltungssysteme von geringen Unterschieden ausgegangen. Für Maßnahmen, die Ammoniakemissionen mindern, wird angenommen, dass diese auch für Geruchsemissionen wirksam sind. Geruchsemissionen sind jedoch nicht nur von den Leitparametern verschmutzte Fläche, Temperatur und Luftströmung abhängig, sondern auch in hohem Maße von den Faulungsbedingungen in den Wirtschaftsdüngern. Diese werden bisher in der VDI-RL nicht berücksichtigt. Daher sind Verfahren, die schnelles Ausräumen von Schweineexkrementen, beziehungsweise die Verhinderung von Kot-Harn-Gemischen zum Ziel haben, hinsichtlich ihrer emissionsmindernden Wirkung bisher nicht angemessen berücksichtigt.

Über die mangelnden Emissionsdaten hinaus, sind für freigelüftete Ställe die Methoden zur Ausbreitungsprognose für Geruchsstoffe entwicklungsbedürftig. Mit der Geruchsimmissionsrichtlinie (GIRL 2008) wird die Geruchsbelastung für Anwohner prognostiziert bzw. der „Irrelevanzabstand“ zur Wohnbebauung berechnet. Berechnungen mit der GIRL-Methodik ergeben für zwangsgelüftete Stallanlagen mit Abluftkaminen deutlich geringere Belastungswerte als für Emissionsquellen in Erdreich-/Bodennähe. Die errechneten Abstände sind demnach für freigelüftete Ställe bei gleicher Geruchsemission erheblich größer. Dagegen zeigen Fahnenbegehungen und Experteneinschätzungen, dass freigelüftete Ställe -insbesondere solche mit regelmäßiger Ausräumung der Exkremente- bereits im näheren Umfeld die Wahrnehmungsschwelle erreichen (TÜV Austria, 2018). Zur Klärung der Sachverhalte sind systematische Untersuchungen und die Überprüfung der Ausbreitungsberechnungen dringend erforderlich. Weiterhin muss an der Entwicklung bezahlbarer Methoden zur Erfassung der Schadgasflüsse (insbes. Ammoniak) in freigelüfteten Ställen gearbeitet werden.

## 9 Innovationen und deren Potenziale für die Mastschweinehaltung

Im Rahmen des Vorhabens wurden bestehende Haltungssysteme und Haltungskonzepte analysiert und, aufbauend auf funktionssicheren Verfahren sowie Verfahrensschritten, der Bedarf für Weiterentwicklungen und Neuentwicklungen definiert. Aus den Arbeiten gehen folgende Innovationen hervor, die in Kombination mit bereits praktizierten Verfahrenskomponenten zu einem innovativen Gesamtsystem führen:

1. Mit dem neuartigen Kühlsystem für den gekapselten Komfort- (Liege-)bereich wird die Funktionssicherheit der Tierwohlbucht erhöht, Kot- und Urinfehlstellen werden so vermieden. Damit wird die Grundvoraussetzung für ein funktionierendes „Toilettensystem“ geschaffen. Gleichzeitig wird den Tieren immer ein temperierter und staubfreier Frischluftbereich angeboten.
2. Durch das modulare Kot-Harn-Trennsystem wird, sowohl durch das Absammeln von Kot als auch durch die weitergehende Unterflurseparierung von Kot und Harn, der Kontakt von Urease mit dem Urin vermindert.
3. Die Weiterentwicklung zu einem Oberflurtrennsystem mittels eines Kotsammelroboters weist hohes Potenzial zur Erhöhung der Trenneffizienz auf, evtl. können Stabilisierungsmaßnahmen im Stall vermieden werden (außerhalb des Stalls werden diese aber weiter erforderlich sein).

4. Mit der Abtrennung des Kotes wird die Grundlage für einen organischen Wertstoff in Biogasanlagen oder anderen Behandlungssystemen für organische Grundstoffe geschaffen; der überregionale Transport von Wirtschaftsdünger wird kostengünstiger.
5. Mit der sofortigen Stabilisierung des Urinharnstoffs unmittelbar nach der Ausscheidung wird die Bildung von Ammoniak bereits im Stall vermindert.
6. Mit der Fällung von Nährelementen und der Gewinnung hochkonzentrierter Dünger werden transportwürdige und im Vergleich zu Gülle und Mist nutzungseffizientere Dünger erzeugt.
7. Mit der Aufkonzentrierung der Urinflüssigkeit zu NK Düngern werden Logistikkosten eingespart und Möglichkeiten für eine bodenschonendere Ausbringung geschaffen.
8. Das System eröffnet eine Alternative zu Güllebehandlungs- und Verarbeitungsverfahren in regionalen oder einzelbetrieblichen Überschusssituationen. Zunächst könnte der Urin am Entstehungsort verbleiben, da meist hoher Bedarf für reaktiven Stickstoff und für Kalium besteht, welche den Hauptanteil der im Urin enthaltenen Ionen bilden. Phosphor und organisch gebundener Stickstoff können mit dem getrennt gesammelten Kot als Biogassubstrat in Ackerbauregionen verbracht werden, wo entweder die konventionelle Verwertung über flüssige Gärreste und/oder eine weitergehende Aufbereitung derer erfolgen kann.

Die mit den Innovationen verbundene sehr hohe Emissionsminderung sowohl im Stall und Lager als auch bei der Nutzung im Pflanzenbau ermöglicht ein Emissionsniveau im Stall, wie es nur mit Abluftreinigungsanlagen zu erzielen ist, sowie eine hohe Nährstoffeffizienz im Gesamtsystem Stall-Boden-Pflanze. Ammoniakemissionen im Stall werden voraussichtlich 70 % gemindert, Methanemissionen um 90 %. Da keine Faulungsprozesse auftreten, ist auch mit einer Minderung der Geruchsemissionen um 50 – 70 % zu rechnen.

Das neuentwickelte Haltungs- und Wirtschaftsdüngerbehandlungssystem erfüllt die Anforderungen an eine besonders tiergerechte Haltung und wird zugleich hohen Umweltschutzansprüchen gerecht. Emissionen aller relevanten Gase werden signifikant und drastisch reduziert. Gleichzeitig wird den Tieren umfangreiches Platzangebot (zur Ausbildung von Funktionsbereichen) sowie Zugang zur Außenluft und Umweltreizen gewährt. Kühlen und Aufwärmen können in der gekapselten Innenbucht erfolgen, auch die Möglichkeit zum Wühlen ist dort gegeben.

Somit ermöglicht das Gesamtsystem erstmals das Aufbrechen des Konflikts zwischen Tierwohl/Tiergesundheit und Umweltschutz: die Emissionen werden drastisch gemindert bei gleichzeitiger Deckung der Ansprüche an das Tierwohl.

## 10 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Aus den bisherigen Arbeiten im Zusammenhang mit dem beschriebenen Haltungs- und Wirtschaftsdüngerbehandlungssystem wird in folgenden Bereichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet:

1. Pilotierung des Stallsystems / Ausführungsplanung für einen Musterstall zur Erleichterung des Baus von ersten Praxisställen,
2. Optimierung des Heizungs- und Kühlungssystems im Komfortbereich / Auslegung und Steuerung / weitergehende Anpassungen an die Bedürfnisse der Tiere,
3. Optimierung der Gleichdrucklüftung, Steuerungs- und Regelmechanismen, Optimierung des Zusammenspiels zwischen Frischluftzufuhr und Innenraum-Kühlung,

4. Ermittlung der Lastprofile für Beheizung und Kühlung der Komfortzone; Ermittlung der durchschnittlichen Aufenthaltszeiten der Tiere in der Komfortzone
5. Entwicklung des Kotsammelroboters auf Basis eines Bürst-Saug- oder Kratz-Saug-Systems, Erkennung von Fäkalstellen außerhalb des Toilettenbereichs, Test und Auslegung von Saugturbine, Bürsten, Steuerung und Laufschienen,
6. Alternativ: Nutzung und Fortentwicklung des in Kap 4.4.2 beschriebenen perforierten Kotbandsystems (soweit patentrechtlich möglich),
7. Entwicklung von Komfortböden sowohl für den Toilettenbereich (perforierter Komfortboden) als auch im Komfortbereich,
8. Entwicklung eines automatischen Systems zur Belohnung der Tiere bei Einhaltung des Toilettenbereiches. Hierzu erforderlich ist die Entwicklung eines Systems zur Erkennung des Absetzens von Kot und Urin. Aufsetzen könnte man auf Arbeiten der Universität Wageningen.
9. Pilotierung des Urinrückspülsystems,
10. Entwicklung des Vibrations-Kotschiebers, einschließlich entsprechender Beschichtungen des Schieberbodenbereiches für effizientes Trennen, Ausräumen und rasches Dränen des Urins, Identifizierung der am besten geeigneten Roste.
11. Pilotierung des Membransystems oder Verdampfungssystems zur Urinaufkonzentrierung. Bau und Testbetrieb einer halbtechnischen Pilotanlage mit Verfahrensleistungen von ca. 3 t Urin/Tag.
12. Eigenschaften und Dynamik Urinchemie: Ureasehemmung, thermodynamische Reaktionen, Fällungsprodukte, Reaktionsgeschwindigkeiten, Sedimentationsverhalten Fällungsreaktionen, Einfluss org. Kontamination, Emissionspotenzial der entstehenden Produkte, Düngerwirkung, Düngerprodukte, Ableitungen für die Dimensionierung der Reaktions- und Pufferbehälter, Prognose Emissionspotenzial und N-Effizienz des Gesamtsystems, Prognose Düngungswirksamkeit anderer Elemente außer N.
13. Pilotierung der Verfahrenstechnik zur Urinstabilisierung, Nährelementfällung und Aufkonzentration mittels Membrantechnik oder Verdampfungstechnik in Containerbauweise. Testbetrieb an verschiedenen Ställen.
14. Systematische Untersuchungen zu Urininhaltsstoffen für verschiedene Schweinekategorien (Nährelemente, Schwermetalle und org. Schadstoffe, path. Keime, Pharmaka) sowie des Einflusses der Chemikalien auf den Abbau dieser Stoffe
15. Untersuchungen zur Entwicklung von Geruchsstoffen im gelagerten Urin und Entwicklung von Gegenmaßnahmen,
16. Nutzung des abgetrennten Kotes zur Biogasgewinnung: Studie über Gasertragspotenziale, Transport- und Logistikkosten, Umbaukosten für Ställe, Umbaukosten für BGA, Transportwürdigkeit, Gesamtbewertung. Bilanzierung der Nährelemente und deren Fraktionen auf betrieblicher und regionaler Ebene.
17. Pilotanwendungen von abgetrenntem Kot in existierenden Biogasanlagen, Eignung als Kosubstrat, Monovergärung, Ermittlung der Gaserträge, Kosten Wirtschaftlichkeit unter Bedingungen außerhalb des EEG.
18. Eigenschaften und Dynamik der entstehenden Gärreste: Inhaltsstoffe, thermodynamische Reaktionen, spontane und induzierte Fällungsreaktionen. Nährstoffrückgewinnung in Labor- und halbtechnischen Versuchen.
19. Entwicklung von kostengünstigen Schnellmethoden zur Erfassung der Schadgasflüsse.

## 11 Schutzrechte

Das System zur Trennung von Kot und Harn, Urinstabilisierung und Urinweiterverarbeitung wurde beim deutschen (19.09.2018) und europäischen (13.09.2019) Patentamt zum Patent angemeldet, vom deutschen Patentamt wurde am 25.09.2018 unter der Nr. 20 2018 105 388 und der Bezeichnung „System zum Behandeln von Harn“ das Gebrauchsmuster eingetragen.

## 12 Vorträge, Veröffentlichungen, Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse der Studie wurden bisher auf folgenden Tagungen und Veranstaltungen angemeldet und vorgestellt:

### Vorträge

- IBE Ingenieurbüro Dr. Eckhof GmbH, 15. Informationsveranstaltung, Der Schweinestall ohne Mist und Gülle – mit geringen Emissionen und tiergerecht, 04.04.2019, Berlin
- DLG-Fachtagung 2019 – Nachhaltige Schweinehaltung – Indikatoren und Stallbaulösungen für Umweltwirkungen und Tiergerechtigkeit, Der Schweinestall ohne Mist und Gülle: Ein Konzept zur Auflösung des Zielkonflikts zwischen Emissionsminderung und Tiergerechtigkeit?, 19.06.2019, Frankfurt
- 131. VDLUFA Kongress, Tierwohlstall ohne Mist und Gülle mit Ammoniak-Niedrigstemissionen – Konzept und erste Ergebnisse zur emissionsarmen Behandlung der Exkremente, 10.-13.09.2019, Gießen
- Deutsche Umwelthilfe, Fachgespräch Tier- und Immissionsschutz vereinbaren; Tierwohlstall mit Niedrigstemissionen – Konzeptstudie und erste Ergebnisse, 22.01.2020, Berlin
- TFRN/EPMAN Meeting, High animal comfort and low emissions in a new housing system for pigs – conceptual study and first results from pilot farms and laboratory experiments, 02.10.2019, Brüssel
- Konferenz der International Nitrogen Initiative (INI), High animal comfort and low emissions in a new housing system for pigs - conceptual study and first results from pilot farms and laboratory experiments, 03. – 07.05.2020, Berlin – wegen Corona Pandemie auf 2021 verschoben

### Veröffentlichungen

- 131. VDLUFA Kongress, Tierwohlstall ohne Mist und Gülle mit Ammoniak-Niedrigstemissionen – Konzept und erste Ergebnisse zur emissionsarmen Behandlung der Exkremente, 10. –13.09.2019, Gießen
- DLG Mitteilungen 9/2019, Wie lassen sich Kot und Harn trennen?

### Messen

- Eurotier 2018

## 13 Folgeprojekte

DBU AZ 34882/01: Schweinehaltung ohne Mist und Gülle – Tierwohlstallsystem mit Kot-Harntrennung und Niedrigstemissionen; Bewilligungsempfänger: Schauer Maschinenfabrik GmbH Vertriebsgesellschaft

DBU AZ 34888/01: Schweinehaltung ohne Mist und Gülle – Rückgewinnung wertvoller Nährstoffe aus Urin von Mastschweinen: Modellierung und experimentelle Überprüfung, Bewilligungsempfänger: Technische Universität Berlin, Fakultät VI – Institut für Ökologie, Fachgebiet Bodenkunde

Von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) wurde an DöhlerAgrar der Zuschlag für eine Durchführbarkeitsstudie zur Gewinnung von Schweinekot und dessen Nutzung in Biogasanlagen an DöhlerAgrar erteilt (Biogas mit Schweinekot, FKZ 2220NR028X). Das Projekt hat im Juli 2020 begonnen.

## 14 Danksagung

Wir bedanken uns bei unseren Kooperationspartnern, der SchauerAgrotronic GmbH (Herrn Christian Auinger) sowie der TU Berlin (Prof. Dr. Martin Kaupenjohann und Dr. Lisa Thieme). Weiterer Dank geht an Herrn Ralf Remmert von der Prignitzer Landschwein GmbH, Herrn Rudolph Wiedmann sowie Nico Verdoes, Dr. Karin Groenestein, Dr. Andre Aarnink von Wageningen University and Research für die freundliche Unterstützung und Zusammenarbeit.

## 15 Literatur

Aarnink, A., Huis in 't Veld, J., and Hol, A. (2007): Kempfarm vleesvarkensstal: milieu-emissies en investeringskosten, Rapport 67, Animal Sciences Group van Wageningen UR

Alonso, F., Vázquez, J., Ovejero, I., Garcimartín, M. A., Mateos, A., and Sánchez, E. (2010): Belt separation system under slat in fattening pig housing: Effect of belt type and extraction frequency, *Bioresource Technology*, 101, 6230–6234, doi:10.1016/j.biortech.2010.02.106

Bach, M., Häußermann, U., Klement, L., Breuer, L. (2019): 23 Jahre Düngeverordnung und Stickstoffüberschuss –was hat sich getan? Vortrag 131. VDLUFA-Kongress 10.-13.09.2019, Gießen

Bowers, K. E. and Westerman, P. (2005): Performance of Cone-Shaped Fluidized Bed Struvite Crystallizers in Removing Phosphorus from Wastewater, 48, 1227–1234

Breßler, E. (1994): Physikalisch-chemische Methoden zur Gülleentsorgung, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften (Dr. rer.nat.) der Naturwissenschaftlichen Fakultät IV Chemie und Pharmazie der Universität Regensburg

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2013): Phosphat-Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit.

[https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung\\_SV\\_MER/Downloads/phosphat.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung_SV_MER/Downloads/phosphat.pdf?__blob=publicationFile&v=4); Zugriff: 24.06.2020

Christensen, M. L. and Sommer, S. G. (2013): Manure Characterisation and Inorganic Chemistry, in: Animal Manure Recycling: Treatment and Management, Sommer, S. G., Christensen, M. L., Schmidt, T., and Jensen, L. S. (Eds.), 41–67

DESTATIS (2020): destatis.de. (Zugriff: 24.06.2020)

DLG (2005): Bilanzierung der Nährstoffausscheidung landwirtschaftlicher Nutztiere. Arbeiten der DLG, Band 199. Frankfurt, Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft DLG-Verlag

DLG (2014): Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere. Frankfurt, 2. Auflage

Döhler H., Eurich-Menden B., Dämmgen U., Osterburg B., Lüttich M., Bergschmidt A., Berg W. & Brunsch R. (2002): BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der Deutschen Landwirtschaft und Minderungszenarien bis zum Jahr 2010. Umweltbundesamt Texte 05/02 B 55050, 192, Dessau

Döhler, H., Bonadei, E. (2017): Pilotanlage zur Verarbeitung von Gülle und Gärresten für ein regionales Nährstoffmanagement zur Entlastung von Wirtschaftsdünger-Überschüssen in Südtirol, 10. Biogas Innovationskongress Osnabrück, Tagungsband, S.137 – 143

Döhler, H.; Harder, E., Kaupenjohann, M., Auinger, C. (2019): Tierwohlstall ohne Mist und Gülle mit Ammoniak-Niedrigstemissionen – Konzept und erste Ergebnisse zur emissionsarmen Behandlung der Exkremente, Verbraucherschutz als Herausforderung für die Produktion, 131. VDLUFA-Kongress, 10.-13.09.2019, Giessen, VDLUFA-Schriftenreihe Band 76/2019, VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Drenkova-Tuhtan, A., Schneider, M., Franzreb, M., Meyer, C., Gellermann, C., Sextl, G., Mandel, K., and Steinmetz, H. (2017): Pilot-scale removal and recovery of dissolved phosphate from secondary wastewater effluents with reusable ZnFeZr adsorbent @ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> particles with magnetic harvesting, Water Research, 109, 77–87, doi:10.1016/j.watres.2016.11.039

Dufour, V., Hamel, D., Pouliot, F., Leblanc, R., Godbout, S., Bernuth, R. D., and Hill, J. (2007): Évaluation technico-économique d'un système de séparation liquide-solide des déjections à la source dans un bâtiment porcin et les impacts sur l'environnement, Rapport final, Centre de développement du porc du Québec inc; Michigan State University

Etter, B., Tilley, E., Khadka, R., and Udert, K. M. (2011): Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal, Water Research, 45, 852–862, doi:10.1016/j.watres.2010.10.007

Euiso Choi (2007): Piggery Waste Management: Towards a Sustainable Future

Fernandez, J. A. (2006): The composition of faeces and urine from slaughter pigs and gestating sows is determined by diet composition, in: 12th Ramiran International Conference: Technology for Recycling of Manure and Organic Residues in a Whole-farm Perspective, Petersen, S. O. (Ed.), DIAS report Plant production, Danish Institute of Agricultural Sciences, 85–87

Frank, D. (2013): Experimentelle Untersuchung und Modellierung der Fällung von Kalium-Magnesium-Phosphat, Dissertation, Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie IGVP, Universität Stuttgart, Stuttgart

Ganrot, Z. and Dave, G. (2004): Laboratory Studies on Recovery of N and P from Human Urine through Struvite Crystallisation and Zeolite Adsorption, 25, 111–121

Gao, Y., Liang, B., Chen, H., and Yin, P. (2017): An experimental study on the recovery of potassium (K) and phosphorous (P) from synthetic urine by crystallization of magnesium potassium phosphate, 337

GIRL (2008): Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (Geruchsimmissions-Richtlinie – GIRL) in der Fassung vom 29. Februar 2008 und einer Ergänzung vom 10. September 2008 mit Begründung und Auslegungshinweisen in der Fassung vom 29. Februar 2008

Groenestein, K., Mosquera, J., Van der Sluis, S. (2012): Emission factors for methane and nitrous oxide from manure management and mitigation options, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 9:sup1, 139-146, DOI: 10.1080/1943815X.2012.698990

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

Häußermann, U., Bach, M., Klement, L., Breuer, L. (2019): Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017, UBA-Texte 131/2019, Umweltbundesamt, Dessau

Heinlein, B., Hörnig, G., Rinno, G. (1987): Getrennte Abführung von Kot und Harn aus Schweineställen, *agrartechnik*, Berlin 35 (1985) 12

Hellström, D., Johansson, E., and Grennberg, K. (1999): Storage of human urine: acidification as a method to inhibit decomposition of urea, *Ecological Engineering*, 12, 253–269, doi:10.1016/S0925-8574(98)00074-3

Hjorth, M., Christensen, K. V., Christensen, M. L., and Sommer, S. G. (2010): Solid–liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 153–180, doi:10.1051/agro/2009010

Jarret, G., Cerisuelo, A., Peu, P., Martinez, J., and Dourmad, J.-Y. (2012): Impact of pig diets with different fibre contents on the composition of excreta and their gaseous emissions and anaerobic digestion, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 160, 51–58, doi:10.1016/j.agee.2011.05.029

Jönsson, H., Stenström, T.-A., Svensson, J., and Sundin, A. (1997): Source separated urine-nutrient and heavy metal content, water saving and faecal contamination, *Water Science and Technology*, 35, 145–152, doi:10.1016/S0273-1223(97)00192-3

Jørgensen, H., Prapasongsa, T., van Vu, T. K., and Poulsen, H. D. (2013): Models to quantify excretion of dry matter, nitrogen, phosphorus and carbon in growing pigs fed regional diets, *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 4, 42, doi:10.1186/2049-1891-4-42

Kaupenjohann, M.; Schnug, E.; Haneklaus, S.; Döhler, H.; Nebelsieck, R.; Fock, K. (2019): Gutachten zur Anwendung von Minderungstechniken für Ammoniak durch „Ansäuerung von Gülle“ und deren Wirkung auf den Boden, Texte 148/2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Koger, J. B., O'Brien, B. K., Burnette, R. P., Kai, P., van Kempen, M., van Heugten, E., and van Kempen, T. (2014): Manure belts for harvesting urine and feces separately and improving air quality in swine facilities, *Livestock Science*, 162, 214–222, doi:10.1016/j.livsci.2014.01.013

Kroodsmma, W. (1987): Separation and removal of faeces and urine using filter nets under slatted floors in piggeries Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 34, Issue 2, June 1986, Pages 75-84

KTBL (2018): KTBL-Online-Anwendung BAUKOST. ktbl.de (Zugriff 15.05.2018)

Lachance, I., Jr., Godbout, S., Lemay, S. P., and Larouche, F. Pouliot, J.-P. (2005): Separation of Pig Manure Under Slats: to Reduce Releases in the Environment!, St. Joseph, MI, ASABE Paper No. 054159, ASAE

Landrain, B., Ramonet, Y., Quillien, J.-P., and Robin, P. (2009): Incidence de la mise en place d'un système de raclage en «V»® en préfosse dans une porcherie d'engraissement sur caillebotis intégral sur les performances zootechniques et les émissions d'ammoniac et de protoxyde d'azote, Journées Recherche Porcine, 259–264

Lynch, M. B., Sweeney, T., Callan, B. Flynn, J. J., and O'Doherty, J. V. (2007): The effect of high and low dietary crude protein and inulin supplementation on nutrient digestibility nitrogen excretion intestinal microflora and manure ammonia emissions from finisher pigs, animal, 1, 1112–1121, doi:10.1017/S1751731107000407

Maurer, M., Pronk, W., and Larsen, T. A. (2006): Treatment processes for source-separated urine, Water Research, 40, 3151–3166, doi:10.1016/j.watres.2006.07.012

Oenema, O., Bannink, A., Sommer, S. G., van Groenigen, J. W., and Velthof, G. L. (2008): Chapter 12 - Gaseous Nitrogen Emissions from Livestock Farming Systems, in: Nitrogen in the Environment (Second Edition), Second Edition, Hatfield, J. L., and Follett, R. (Eds.), Academic Press, San Diego, 395–441

Pouliot, F., Godbout, S., Dufour, V., Bernuth, R. D. von, and Hill, J. (2005): Évaluation de l'efficacité d'un système de séparation fèces-urine sous caillebotis en engraissement bilan de masse et caractérisation des sous-produits, Journées Recherche Porcine, 45–50

Poulsen, H. D. and Johansen, K. (2006): Phosphorus in pig faeces and urine can be manipulated by dietary means, in: 12th Ramiran International Conference: Technology for Recycling of Manure and Organic Residues in a Whole-farm Perspective, Petersen, S. O. (Ed.), DIAS report Plant production, Danish Institute of Agricultural Sciences, 101–103

Randall, D. G., Krähenbühl, M., Köpping, I., Larsen, T. A., and Udert, K. (2016): A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition, 95

Remmert 2018: Stall, insbesondere für die Haltung von Schweinen.  
<http://www.freepatentsonline.com/DE102016013326A1.html>. (Zugriff 24.06.2020)

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

Santonja, G., Georgitzikis, K., Scalet, B., Montobbio, P., Roudier, S., Sancho, L. (2017): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs; EUR 28674 EN; doi:10.2760/020485

Schauer Agrotronic GmbH (2020): NatureLine - Emissionsarmer Tierwohlstall. <https://www.natureline.com/natureline-emissionsarmer-tierwohlstall>. (Zugriff 24.06.2020)

Schroers, J. und Sauer, N. (2011): Die Leistungs-Kostenrechnung in der landwirtschaftlichen Betriebsplanung. KTBL-Schrift 486, Darmstadt

Schultheiß, U., Döhler, H., Schwab, M. (2010): Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft – jährliche Anfallmengen in der Bundesrepublik Deutschland. In: Landtechnik, 2010, KTBL, Darmstadt, S. 354-356

Simha, P. and Ganesapillai, M. (2017): Ecological Sanitation and nutrient recovery from human urine: How far have we come? A review, Sustainable Environment Research, 27, 107–116, doi:10.1016/j.serj.2016.12.001

SKWP (2020): persönliche Mitteilung, April 2020

Sprengel, C. (1839): Die Lehre vom Dünger, Verlag Immanuel Müller, Leipzig

Stevens, C. J.; Dise, N. B., Mountford, J. O, Gowing, D. J. (2004): Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. Science 303: 1876–1879

Sutton, M. A., Oenema, O., Erisman, J. W., Leip, A., van Grinsven, H., Winiwarter, W. (2011): Too much of a good thing. Nature 472: 159–161

Thörneby, L., Persson, K., and Trägårdh, G. (1999): Treatment of Liquid Effluents from Dairy Cattle and Pigs using Reverse Osmosis, Journal of Agricultural Engineering Research, 73, 159–170, doi:10.1006/jaer.1998.0405

topagrar online (2011): KTBL-Tagung in Münster. <https://www.topagrar.com/schwein/news/ktbl-tagung-in-muenster-9568599.html>. (Zugriff: 24.06.2020)

TÜV Austria (2018): Geruchsbegehung mittels Fahnenmessung – Rückrechnung Geruchsstoffstrom mittels Ausbreitungsmodell. <https://www.oee-umweltanwaltschaft.at/Mediendateien/Geruchsbegehung%20Meggenhofen.pdf>. (Zugriff: 24.06.2020)

Udert, K. M., Larsen, T. A., Biebow, M., and Gujer, W. (2003): Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system, Water Research, 37, 2571–2582, doi:10.1016/S0043-1354(03)00065-4

Verdoes, N. (2017): persönliche Mitteilung

Vu, T. K., Sommer, G. S., Vu, C. C., Jørgensen, H. (2009): Assessing Nitrogen and Phosphorus in Excreta from Grower-finisher Pigs Fed Prevalent Rations in Vietnam. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 2010;23(2): 279-286. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 2010;23(2): 279-286. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.90340>

VDI (2011): Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen – Haltungsverfahren und Emissionen – Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde. Richtlinie VDI 3894 Blatt 1, September 2011

Verdoes, N. (2017): mündliche Mitteilung

Wahmhoff, W. (2012): Stickstoffdüngung unter Aspekten des Umwelt- und Ressourcenschutzes  
In: Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e. V. (VLK) und des Bundesarbeitskreises  
Düngung (BAD), Frankfurt, S. 13–18

WUR (2017): [https://www.wur.nl/upload\\_mm/2/1/8/025b0882-ddc5-4af1-8cf0-0728bdf1914c\\_factsheet%20StarPlus%20stal.pdf](https://www.wur.nl/upload_mm/2/1/8/025b0882-ddc5-4af1-8cf0-0728bdf1914c_factsheet%20StarPlus%20stal.pdf) (Zugriff: 19.09.2020)

Xu, K., Wang, C., Wang, X., and Qian, Y. (2012): Laboratory experiments on simultaneous removal of K and P from synthetic and real urine for nutrient recycle by crystallization of magnesium–potassium–phosphate–hexahydrate in a draft tube and baffle reactor, *Chemosphere*, 88, 219–223, doi:10.1016/j.chemosphere.2012.02.061

ZifoWin 1.4 (2010): Zielwert-Futter-Optimierung (ZIFO WIN). [http://www.alb-bayern.de/De/Einkaufen/Software/ZifoWin/uptdate\\_ZifoWINUpdate.html](http://www.alb-bayern.de/De/Einkaufen/Software/ZifoWin/uptdate_ZifoWINUpdate.html). (Zugriff: 02.07.2012)