

# Berechnung des Ammoniakemissionsminderungspotenzials an einem frei belüfteten Milchviehstall mit Hilfe eines numerischen Modells

Julian Hartje, Stefan Linke

Die Rinderhaltung in frei belüfteten Stallanlagen stellt eine große Emissionsquelle von Ammoniak dar. Numerische Modelle von Stallgebäuden ermöglichen es, das Strömungsgeschehen, die Konzentrationsverteilungen von Schadgasen und das Emissionsverhalten eines realen Stalls unter jedem relevanten Betriebszustand virtuell am Computer zu simulieren. So lassen sich Lüftungsstrategien für frei belüftete Milchviehställe entwickeln, welche die Emissionen verringern und gleichzeitig den Tierschutz steigern.

In der vorliegenden Arbeit wurde das numerische Modell eines real existierenden Milchviehstalls um eine partielle Unterflurabsaugung mit anschließender Abluftreinigung erweitert und das Emissionsverhalten bei verschiedenen Anströmbedingungen und Betriebszuständen berechnet. Die Simulationen zeigten dabei ein deutliches Potenzial für eine Minderung der Ammoniakemissionen und Möglichkeiten für eine Optimierung der Lüftung eines offenen Stallsystems.

In vergleichbaren Arbeiten konnte ebenfalls über numerische Simulationen eine positive Wirkung der partiellen Unterflurabsaugung hinsichtlich der Ammoniakemissionen frei belüfteter Rinderställe erkannt werden. In diesem Zusammenhang wurde auch eine grundsätzlich verbesserte Stalllüftung durch die partielle Unterflurabsaugung festgestellt.

## Schlüsselwörter

Numerische Strömungssimulation, Milchviehstall, Partielle Unterflurabsaugung, Emissionen

Versauerung der Böden und Stickstoffanreicherungen im Erdreich und in Gewässern sind Belastungen der Ökosysteme, die auf die Emission von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) zurückgeführt werden können. Die NERC-Richtlinie 2016/2284 (2016) fordert in Deutschland eine Reduktion dieser Emissionen um 5 % in jedem Jahr zwischen 2020 bis 2029 und ab 2030 um 29 %, gemessen am Stand von 2005. Circa 95 % des emittierten Ammoniaks kommen aus der Landwirtschaft. Davon stammen allein 52 % aus der Rinderhaltung (UBA 2014). Von diesen wiederum entfallen 32,4 % auf den Stall, 9,0 % auf die Güllelagerung, 56,2 % auf die Ausbringung von Gülle und 2,4 % auf die Weidehaltung der Tiere (HAENEL et al. 2020).

In Deutschland wurden laut Statistischem Bundesamt im November 2019 ca. 12 Millionen Rinder in über 135.000 Betrieben gehalten (STATISTISCHES BUNDESAMT 2020). Nur 26 % dieser Betriebe haben Bestandszahlen von mehr als 100 Tieren. In diesen wenigen Betrieben wird aber mit 76 % der Großteil aller Rinder gehalten. Dies zeigt, dass es einen allgemeinen Trend zur Vergrößerung

der Stallanlagen gibt (TERGAST und HANSEN 2020). Technische Maßnahmen zur Emissionsreduktion, wie z.B. ein Abluftwäscher, arbeiten ab einer gewissen Betriebsgröße effektiver und funktionieren bei dem damit verbundenen standardisierten Management besser. Es ist zu prüfen, ob auch in den Offenstallsystemen der Rinderhaltung mit technischen Maßnahmen, wie z.B. intelligenter Lüftungstechnik und anschließender Nachbehandlung der Abluft, die Möglichkeit besteht, die Emissionen von Ammoniak zu verringern.

In der Bevölkerung gibt es zudem ein großes Bestreben nach mehr Nachhaltigkeit, insbesondere in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. Die vorrangigen Themen sind hier Tier- und Umweltschutz. So sollen Tierhaltungsanlagen nur niedrige Emissionen in die Umwelt freisetzen, z.B. durch Schließen von Stoffkreisläufen wie die des Stickstoffs. Darüber hinaus sollen sie aber auch die Bedürfnisse der Tiere berücksichtigen und z.B. ausreichend Platz, Licht und frische Luft bieten. Dies führt häufig zu einem Zielkonflikt, den es zu lösen gilt, um der Tierhaltung mehr Verbraucherakzeptanz zu verschaffen.

Die vielversprechende Möglichkeit, über eine partielle Unterflurabsaugung mit anschließender Abluftreinigung die Emissionen aus Rinderställen zu reduzieren, soll in der vorliegenden Arbeit überprüft werden. Das System wurde in der Praxis bereits erfolgreich an einer zwangsgelüfteten Schweinemast getestet (MUSSLICK et al. 2015). Das Grundprinzip besteht darin, den Luftraum in einen Oberflurbereich (der Bereich über dem Spaltenboden, wo sich die Tiere befinden) und einen Unterflurbereich (Gülle Keller) zu trennen. Die hohen Ammoniakkonzentrationen in Bodennähe werden dabei im Güllekeller unter dem Spaltenboden abgesaugt und einem Abluftwäscher zugeführt. Dadurch gelangen die Luftschadstoffe nicht in den Atembereich der Tiere und im Oberflurbereich findet weiterhin eine windinduzierte natürliche Belüftung mit frischer Luft statt. Die Herausforderung dieser Methode besteht darin, nur einen möglichst geringen Luftvolumenstrom unterflur abzusaugen, um nicht zusätzliche Luftschadstoffe aus der Gülle freizusetzen. Dies kann am besten mit einem intelligenten Lüftungskonzept umgesetzt werden, das im Vorhinein durch Simulationen an einem numerischen Modell optimiert wurde.

Ziel der Untersuchung war es, ein numerisches Modell eines realen frei belüfteten Milchviehstalls mit einer partiellen Unterflurabsaugung zu versehen und das Lüftungskonzept mithilfe der numerischen Simulation zu optimieren. Hierdurch soll das Potenzial des Verfahrens zur Verringerung von Emissionen und zur Steigerung des Tierschutzes evaluiert werden.

## Der reale Stall

Grundlage für die numerische Simulation bildete ein realer Boxenlaufstall (Abbildung 1) mit den Maßen  $12 \times 43 \times 78$  m (H  $\times$  B  $\times$  T) und einer Kapazität für 255 Milchkühe. Die Tiere werden durch zwei an den Längsseiten liegende Futtertische versorgt. Zwischen den Futtertischen sind gegenständige Liegeboxen in drei Reihen auf der Stallbreite verteilt. Dieses Stallkonzept eignet sich besonders für eine Erweiterung um eine partielle Unterflurabsaugung, da die Laufgänge hier mit Spaltenböden nach DIN EN 12737:2008-02 (2008) ausgelegt sind. Durch sie hindurch werden die Fäkalien der Tiere in zwei voneinander unabhängige Güllekeller abgeführt und gelagert. Zur Reinigung der Spaltenböden kommen Schieber zum Einsatz. Die Lüftung wird über Jalousien an den Traufseiten geregelt, die in Abbildung 1 voll geöffnet zu erkennen sind. Innerhalb des Stalls sind vier Melkroboter mit Vorwartehefen und jeweils ein Kranken- und ein Regenerationsabteil untergebracht.



Abbildung 1: Blick in einen Boxenlaufstall auf einen Futtertisch. Die Jalousien an der Traufseite sind voll geöffnet. (©Thünen-Institut)

### Die partielle Unterflurabsaugung

Das Konzept der partiellen Unterflurabsaugung wurde am Thünen-Institut für Agrartechnologie entwickelt. Das Verfahren und die Vorrichtung zum Be- und Entlüften von einem Stallgebäude, das einen Oberflurbereich und einen Unterflurbereich aufweist, werden in KRAUSE (2012) beschrieben. Ein Beispiel, wie intelligente Lüftungstechnik und anschließende Abluftreinigung emissionsmindernd wirken kann, beschreiben KRAUSE et al. (2010). Dabei wird in einem zwangsgelüfteten Mastschweinegestall der Bereich unter dem Spaltenboden partiell abgesaugt und diese Luft, die eine hohe Konzentration an Ammoniak enthält, einem Abluftwäscher zugeführt.

Bei der technischen Ausführung des numerischen Modells, das in dieser Arbeit überprüft wurde und in Abbildung 2 dargestellt ist, wird im Bereich unter dem perforierten Boden ein Abluftkanal modelliert, um Zugriff auf die Unterflurluft des Stalls zu bekommen. Um eine gleichmäßige Absaugung über die gesamte Tiefe des Stalls erreichen zu können, ist der Kanal bau- und somit auch lufttechnisch in mehrere, gleich lange Segmente unterteilt. Durch eine Liniensenke, die als eine Vielzahl von Absaugschlitzen ausgeführt ist, wird die Luft über der Gülle abgesaugt.

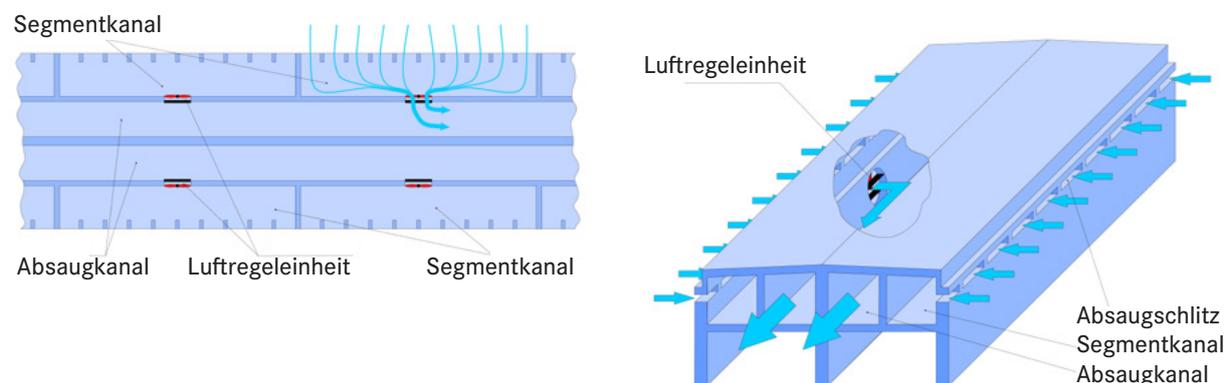


Abbildung 2: Technische Umsetzung der partiellen Unterflurabsaugung im Boxenlaufstall

Wichtig für eine einwandfreie Funktion der partiellen Unterflurabsaugung ist ein negativer Druckgradient zwischen Oberflurbereich, also dem Aufenthaltsbereich der Tiere, und dem Unterflurbereich, in dem die Gülle gelagert wird. Durch mehrere sensorische Differenzdruckmessungen zwischen Ober- und Unterflurbereich kann dies gewährleistet werden, wenn ein zentraler Stallcomputer die gemessenen Daten verrechnet. Der Druckgradient kann so über den Absaugvolumenstrom geregelt werden. Das bedeutet, dass in Abhängigkeit der äußeren klimatischen Bedingungen ein minimaler Absaugvolumenstrom (Sollwert) eingestellt werden muss, der den Druckgradienten unterhalb von null hält.

Zu jedem Segment gehört eine Luftregleinheit. Sie besteht aus Regelklappen und einem Messventilator. Der Istwert des abgesaugten Luftvolumenstroms jedes einzelnen Segments wird über den jeweiligen Messventilator erfasst und an den Klimacomputer übermittelt. Durch Sollwertabgleich kann den entsprechenden Regelklappen eine Stellung zugewiesen werden, die die geförderte Luftmenge aller Einzelsegmente identisch hält. Im numerischen Modell werden für feste Absaugvolumenströme das Verhalten und die Wirksamkeit der partiellen Unterflurabsaugung in Abhängigkeit von äußeren klimatischen Parametern wie der Windgeschwindigkeit untersucht.

Ohne die zusätzlichen Segmentkanäle würde jede Luftregleinheit eine Punktsenke bilden, die mit hohem Impuls und folglich hoher Turbulenz die Luft ansaugt und dadurch die Freisetzung von Ammoniak aus der Gülle zusätzlich anfacht. Erst die Kombination aus Luftregleinheit und Segmentkanal mit den vorgeschalteten Liniensenken ermöglicht ein impulsarmes und gleichmäßiges Absaugen der Luft über die gesamte Stalltiefe. Im Absaugkanal wird die Abluft aus den einzelnen Segmenten gebündelt und einem Abluftwäscher zugeführt.

Momentan wird vor allem in der Schweinehaltung eine Vielzahl von ein- oder mehrstufigen Abluftreinigungsanlagen verwendet. Diese sind entweder biologische oder chemische Systeme, die sich in ihrer grundlegenden Funktionsweise unterscheiden. Sie können neben Ammoniak auch andere in der Stallluft anfallende Schadstoffe binden. Die Abscheideleistung für Ammoniak liegt bei den heutigen Systemen zwischen 70 und 90 % (HAHNE et al. 2016). Bei einer Auswertung von elektronischen Betriebstagebüchern einstufiger biologischer Abluftreinigungsanlagen in der Schweinemast lag dieser Wert im Mittel sogar bei 93 %. Die Reinigungsleistung des Wäschers hängt dabei unter anderem vom pH-Wert des Waschwassers, der Abschlämmrate und der Ammoniakkonzentration in der Zuluft ab (HAHNE 2019). Die Bereitstellung des erforderlichen Unterdrucks für die partielle Unterflurabsaugung bzw. des Volumenstroms durch den Wäscher erfolgt über eine Zentralabsaugung, die

auf der Stirnseite des Stalls angeordnet ist. Hier wird die Luft nach der Behandlung in die Umgebung ausgeblasen. Eine Anordnung in Hauptanströmrichtung ist zu vermeiden, um die natürliche Durchströmung des Stalls durch den Wind nicht zu beeinträchtigen.

Für die Milchviehhaltung gibt es gegenwärtig weder in Deutschland (DLG 2020) noch in Europa (VERA 2020) ein zertifiziertes System zur Reinigung der Abluft aus dem Stall. Die Kombination aus partieller Unterflurabsaugung und nachgeschalteter Abluftwäsche stellt eine Möglichkeit für Stallneubauten oder -erweiterungen dar, die Ammoniakemissionen zu verringern.

### Das numerische Modell

Die numerischen Simulationen wurden mit der kommerziellen Software STAR-CCM+ der Firma Siemens PLM in der Version 12.06.011 im Reynolds-Averaged-Navier-Stokes(RANS)-Verfahren bei verschiedenen Referenzgeschwindigkeiten durchgeführt. Alle Geometrien, bis auf die Windschutznetze und die Ventilatoren im Unterflurbereich, wurden dabei detailliert ausmodelliert. Das geometrische Modell des Gesamtstalls ist in Abbildung 3 dargestellt.

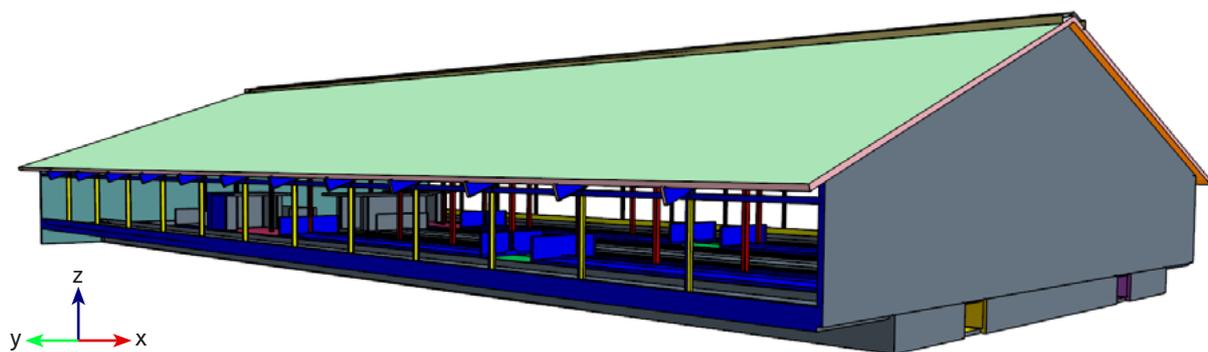


Abbildung 3: Darstellung der Stallgeometrie

Die Windschutznetze wurden als porous-baffle-interface mit verschiedenen Porositäten und die Ventilatoren zunächst über ein fan-interface und später als massflow-inlet mit negativem Massenstrom dargestellt. Als Ammoniakquelle fungierten die Oberfläche der Gülle sowie die Ober- und Seitenflächen der Spaltenböden mit einer aus eigenen Praxismessungen abgeleiteten Konzentration von jeweils 20 ppm.

Die Einlässe bekamen eine Velocity-inlet-Randbedingung, auf der das Geschwindigkeitsprofil  $v_x(h)$  als Parabelform aufgeprägt ist (Gleichung 1). Es wird in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit  $v_{10}$  in einer Höhe von 10 m berechnet:

$$v_x(h) = v_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^{0,262} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Auslässe wurden als pressure-outlet mit einem Druck von 0 Pa dargestellt.

Die räumliche Diskretisierung des Modells ergab eine Elementanzahl von 7.120.559. Das unstrukturierte Netz ist in Abbildung 4 dargestellt.

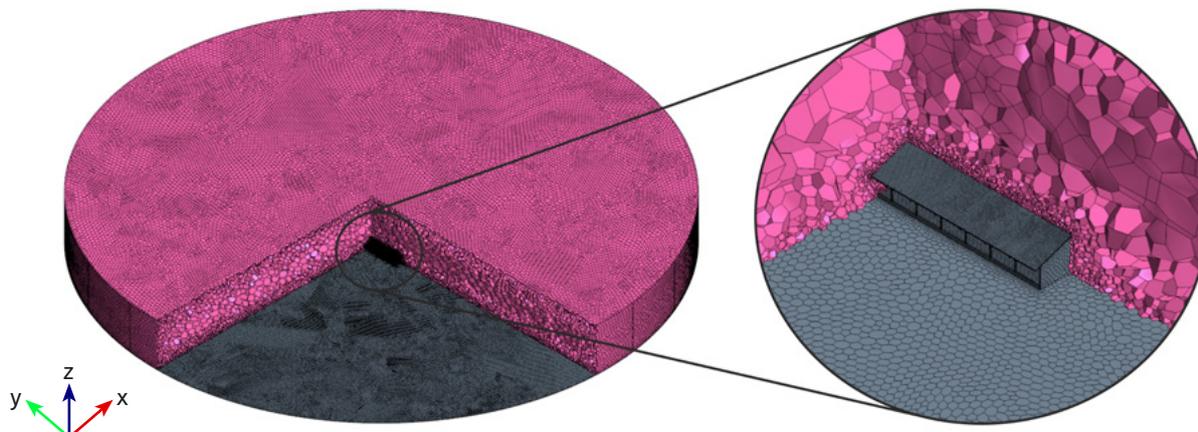


Abbildung 4: Darstellung des Volumennetzes des berechneten Luftraums und des Oberflächennetzes der Stallgeometrie

### Die Ergebnisse zur Emissionsminderung durch die partielle Unterflurabsaugung

Zunächst wurde in 10 m Höhe nach Gleichung (1) eine Windgeschwindigkeit von  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$  gewählt. Die mittlere Drehzahl aller Messventilatoren wurde auf 800 rpm festgelegt. Dies entspricht einem Volumenstrom von  $\dot{V} = 172.000 \text{ m}^3/\text{h}$  pro Absaugkanal.

Die Gleichmäßigkeit der Absaugung im Unterflurbereich wurde über ein Schlierenbild beurteilt, auf dem die Geschwindigkeitsverteilung als skalare Größe abgebildet ist (Abbildung 5).

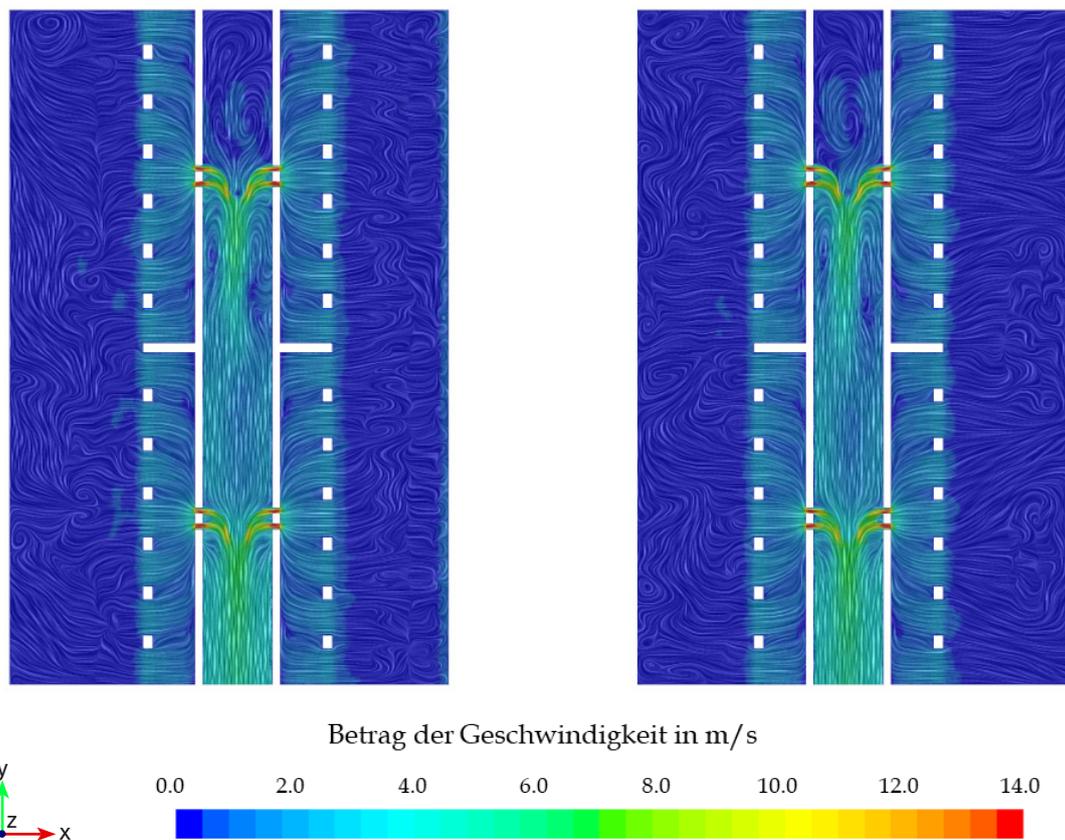


Abbildung 5: Schlierenbild mit Geschwindigkeitsverteilung im Unterflurbereich (Ausschnitt,  $z = -0,55 \text{ m}$ )

Hier ist zu erkennen, dass sehr gleichmäßig über die Absaugschlitze der Segmente abgesaugt wird. Durch die Liniensenken wird ein impulsarmes und gleichmäßiges Absaugen der Luft über die gesamte Stalltiefe erreicht.

Die Lage der Güllekanäle relativ zur Anströmung sorgt allerdings für eine ungleichmäßige Absaugung über der Gülle. In Abbildung 6 ist die angesaugte Luft als Stromlinien dargestellt. Der Wind strömt von links nach rechts durch den Stall. In dieser Richtung sind auch die Güllekanäle unterhalb der Spaltenböden mit 1 bis 4 durchnummeriert. Es ist zu erkennen, dass in den Güllekanälen 1 und 3 die Luft ohne Richtungsumkehr aufgrund der Absaugung direkt in den Segmentkanal strömt, sodass nur über eine geringe Breite der Gülleoberfläche abgesaugt wird. Luft, die in diesen Kanälen in Richtung Oberflurbereich strebt (linke Hälfte der Güllekanäle 1 und 3), wird jedoch durch die einströmende Luft wieder nach unten mitgerissen, sodass sich eine Art natürliche Barriere bildet. In den Güllekanälen 2 und 4 muss die Strömung ihre Richtung umkehren, bevor sie in die Segmentkanäle eintritt. Hierdurch fließt sie zunächst über die gesamte Gülleoberfläche im Kanal, unterstützt dann aber durch ihre richtige Ausrichtung die Unterflurabsaugung. In allen Güllekanälen wird erreicht, dass nur ein minimaler Teil der Luft aus dem Unterflurbereich wieder in den Aufenthaltsbereich der Tiere gelangen kann.

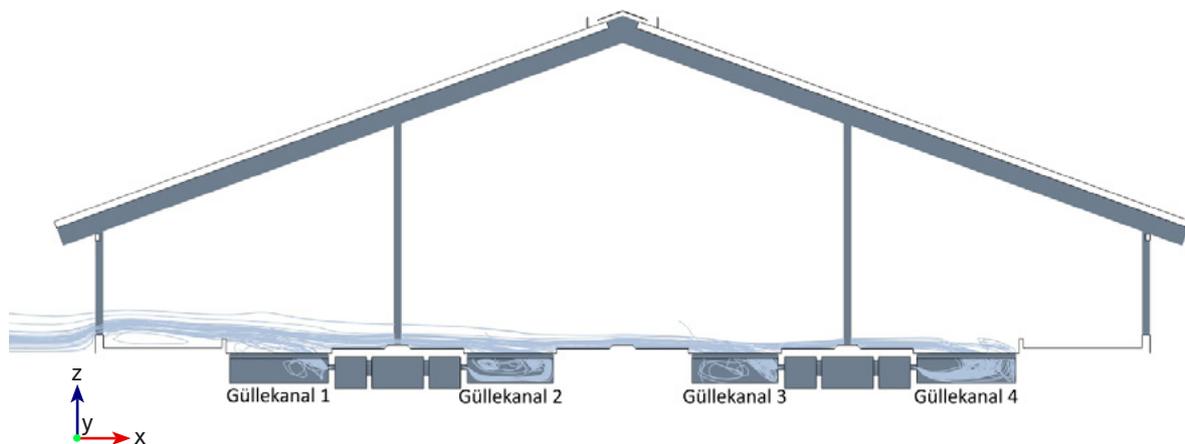


Abbildung 6: Darstellung der Stromlinien in den Güllekanälen

Um eine gleichmäßigere Absaugung über die Tiefe der Güllekanäle zu erreichen, wurden die Ventilator Drehzahlen genauer untersucht. Neben der bereits betrachteten gleichmäßigen Drehzahl von je 800 rpm pro Messventilator ( $\dot{V} = 172.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) wurde diese Verteilung auch für die maximale Drehzahl von 1.600 rpm ( $\dot{V} = 345.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) berechnet. Bei zwei weiteren Konfigurationen wurde die Absaugleistung für die Güllekanäle 1 und 3 jeweils höher eingestellt als für die Kanäle 2 und 4. Dies waren einmal die bereits untersuchten 800 rpm für die Kanäle 1 und 3 und dazu 600 rpm für die Kanäle 2 und 4 ( $\dot{V} = 151.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) und als weitere Konfiguration 1.200 rpm für die Kanäle 1 und 3 und 900 rpm für die Kanäle 2 und 4 ( $\dot{V} = 226.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Die in den Klammern angegebenen Volumenströme geben hierbei den Gesamtvolumenstrom pro Absaugkanal an. Eine Darstellung der Stromlinien aller vier Varianten findet sich in den Abbildungen 7a bis 7d.

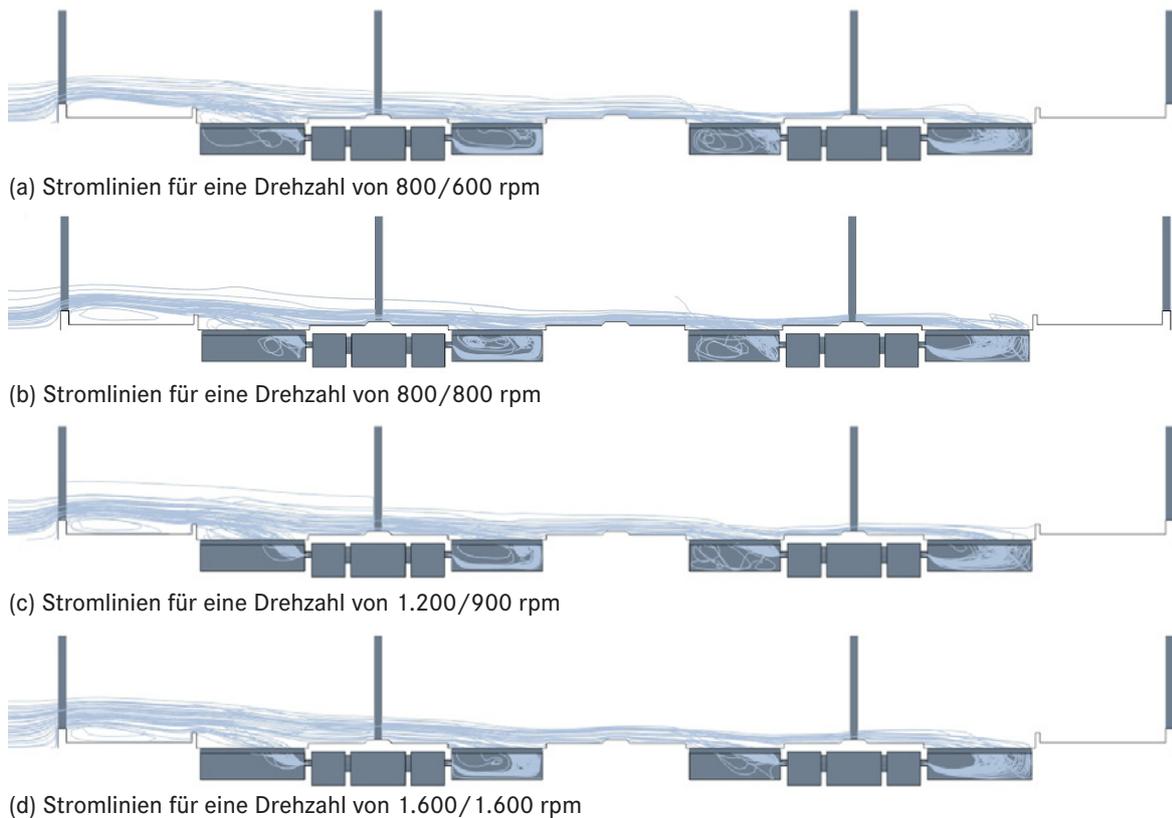
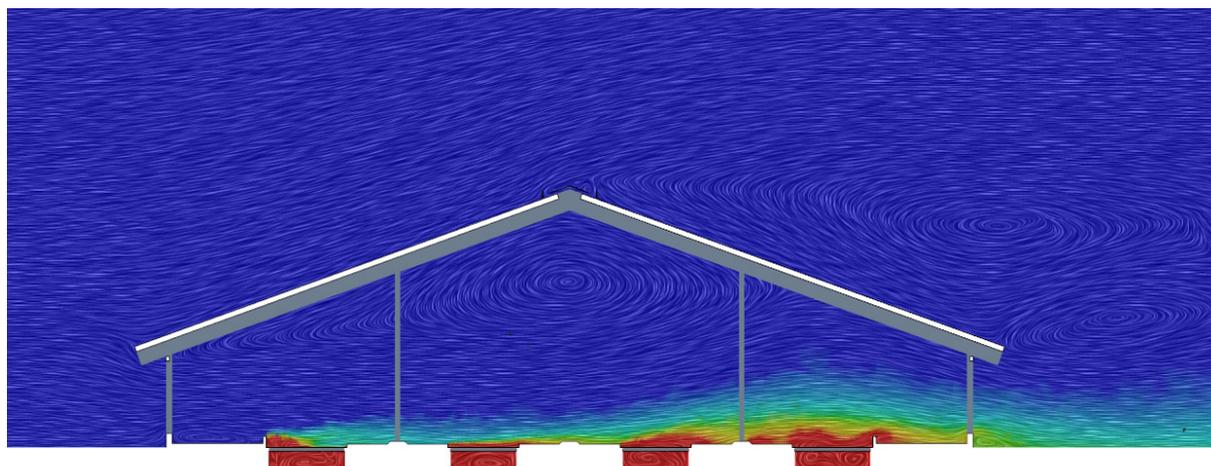


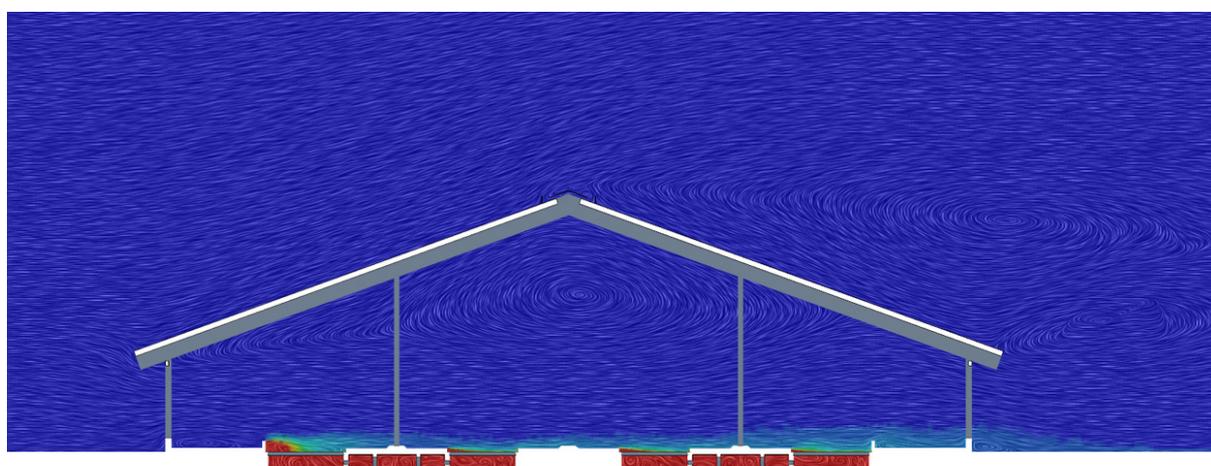
Abbildung 7: Vergleich der Stromlinien im Unterflurbereich für verschiedene Absaugkonstellationen bei einer Anströmung von  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$

Aus den Strömungsbildern geht hervor, dass sich das Verhalten der Luft nicht bedeutsam ändert. Dem Einfluss des erhöhten Absaugvolumenstroms auf die  $\text{NH}_3$ -Emissionen des Stalls wird sich im folgenden Abschnitt zugewandt.

Um einen Vergleich zu einem konventionellen Rinderstall ohne Unterflurabsaugung ziehen zu können, wurde für den Fall einer Anströmung von  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$  eine solche Konfiguration simuliert. Ein Vergleich der Ammoniakkonzentration im Stallgebäude ohne Unterflurabsaugung und mit einem Absaugvolumenstrom von  $\dot{V} = 226.000 \text{ m}^3/\text{h}$  pro Absaugkanal findet sich in den Abbildungen 8a und 8b.



(a) Ammoniakkonzentration ohne Unterflurabsaugung



(b) Ammoniakkonzentration mit Unterflurabsaugung (1.290/900 rpm)

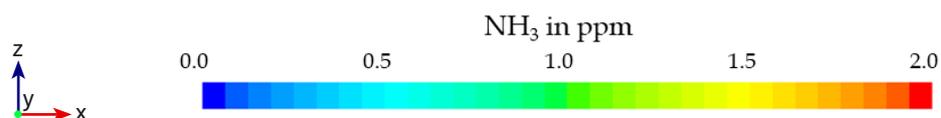


Abbildung 8: Vergleich der  $\text{NH}_3$ -Konzentration im Stall ohne (a) und mit (b) partieller Unterflurabsaugung bei einer Anströmung von  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$  und einem Absaugvolumenstrom von  $\dot{V} = 226.000 \text{ m}^3/\text{h}$

Ohne Absaugung steigt die Ammoniakkonzentration in Strömungsrichtung an. Die Luft taucht in die Güllekeller, verwirbelt und tritt aufgrund des positiven Druckgradienten zwischen Ober- und Unterflurbereich wieder in den Oberflurbereich. Während dieses Prozesses hat sich Ammoniak aus der Gülle angereichert, wohingegen die partielle Unterflurabsaugung (Abbildung 8b) bei gleicher Anströmung verhindert, dass so hohe Konzentrationen im Oberflurbereich entstehen.

Zur weiteren Auswertung wurde der Oberfluranteil des Ammoniakmassenstroms  $\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{oberflur}}$  an den Schnittstellen des Stalls zur Umwelt ermittelt. Er lässt sich nach Gleichung (2) über den Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{oberflur}}$  der Luft in  $\text{m}^3/\text{h}$ , die den Stall an der Öffnung der Traufseite verlässt und der dort ermittelten Konzentration von Ammoniak  $C_{\text{NH}_3, \text{oberflur}}$  in  $\text{kg}/\text{m}^3$  berechnen.

$$\dot{m}_{\text{NH}_3, \text{oberflur}} = \dot{V}_{\text{oberflur}} \cdot C_{\text{NH}_3, \text{oberflur}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Der Unterfluranteil des Ammoniakmassenstroms  $\dot{m}_{NH_3,unterflur}$  wird an den Schnittstellen des Absaugkanals zur Abluftreinigungsanlage ermittelt. Er lässt sich nach Gleichung (3) über den Volumenstrom  $\dot{V}_{unterflur}$  der Luft in  $m^3/h$  zum Wäscher und der Rohgaskonzentration von Ammoniak  $C_{NH_3,unterflur}$  in  $kg/m^3$  berechnen.

$$\dot{m}_{NH_3,unterflur} = \dot{V}_{unterflur} \cdot C_{NH_3,unterflur} \quad (\text{Gl. 3})$$

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse der Simulationen nehmen eine konservative theoretische Reinigungsleistung des Wäschers von 70 % an. Er reduziert somit den Massenstrom von Ammoniak im Reingas auf 30 % des ursprünglichen im Rohgas im Unterflurbereich vorhandenen Massenstroms. Für den Gesamtmassenstrom, den das Stallsystem in die Umwelt emittiert, muss zu dem oberflur aus dem Stall austretenden Ammoniakmassenstrom der entsprechende Anteil aus dem Unterflurbereich addiert werden (Gleichung 4).

$$\dot{m}_{NH_3} = \dot{m}_{NH_3,oberflur} + 0,3 \cdot \dot{m}_{NH_3,unterflur} \quad (\text{Gl. 4})$$

Die oben beschriebenen Rechnungen wurden außerdem für zwei weitere Anströmgeschwindigkeiten simuliert ( $v_{10} = 5 \text{ m/s}$  und  $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ ). In Abbildung 9 sind die Ergebnisse relativ zu der Simulation ohne partielle Unterflurabsaugung bei einer Windgeschwindigkeit von  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$  dargestellt. Die Balken des Oberfluranteils sind mit satten Farben gefüllt und haben schwarze Werte, der Unterfluranteil ist in Pastell dargestellt und grau beschriftet.

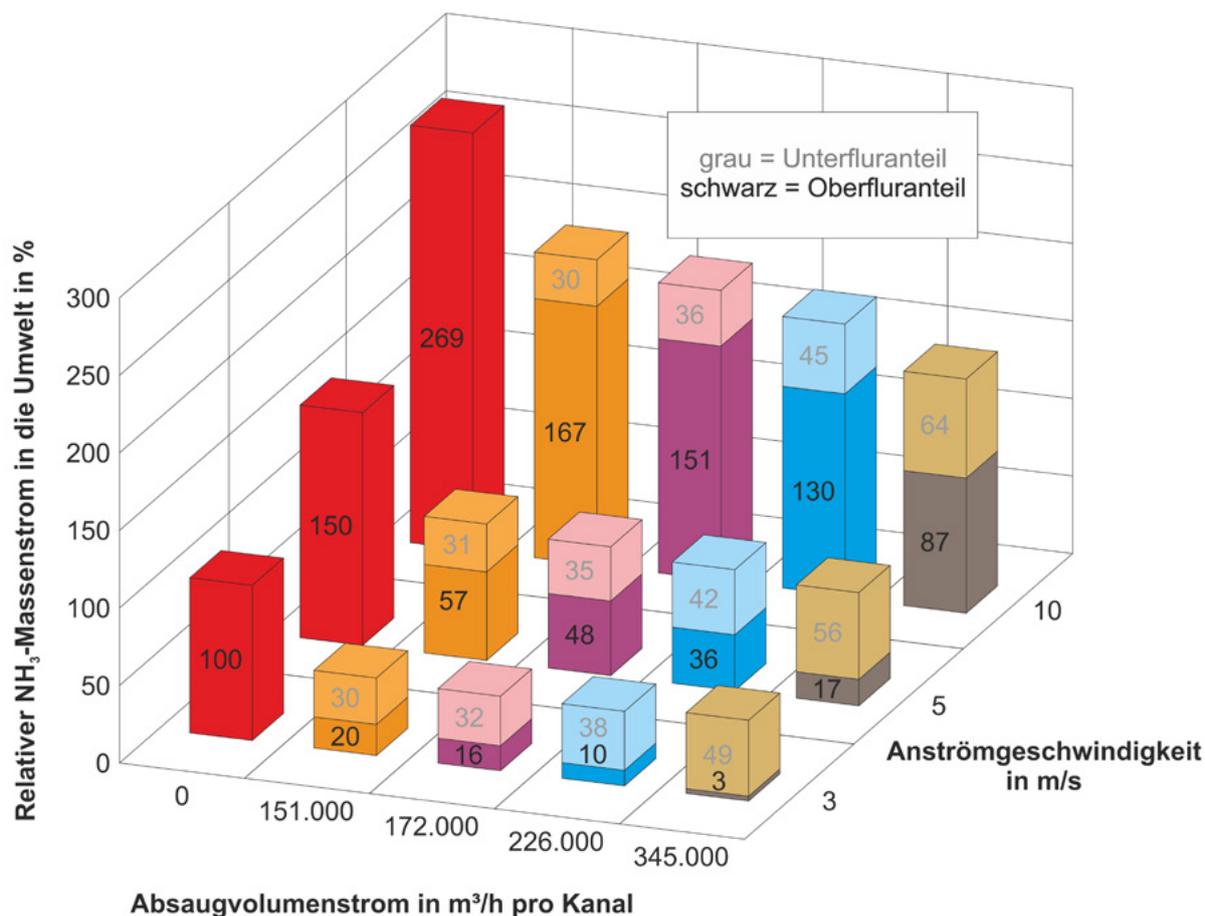


Abbildung 9: Balkendiagramm zur Darstellung des relativen Ammoniakmassenstroms in die Umwelt eines frei belüfteten Rinderstalls mit und ohne partieller Unterflurabsaugung bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten  $v_{10}$  und Absaugvolumenströmen und einer Reinigungsleistung des nachgeschalteten Luftwäschers von 70 %

Die Absaugvolumenströme gelten pro Kanal. Für eine moderate Anströmgeschwindigkeit von  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$  ist der  $\text{NH}_3$ -Massenstrom in die Umwelt fast unabhängig vom Absaugvolumenstrom. Die partielle Unterflurabsaugung kann hier die Emissionen des Stallsystems halbieren. Dies zeigt aber auch, dass die Anfachung der Ammoniakemission aus der Gülle durch die Steigerung der Absaugung in etwa der erwarteten Minderung im Oberflurbereich entspricht. Ferner ist zu erkennen, dass bei höheren Windgeschwindigkeiten mit steigender Leistung der Absaugventilatoren weniger Ammoniak in die Umwelt gelangt. Hier überwiegt die Minderungsleistung durch die Absaugung die Anfachung der Emissionen durch selbige. Bei konstanter Absaugleistung und steigender Windgeschwindigkeit steigt aufgrund von Gleichung (2) der Massenstrom in die Umwelt, da der Volumenstrom durch den Stall ansteigt, die Konzentration von Ammoniak aber auf einem ähnlichen Niveau bleibt.

Bereits anhand von wenigen Simulationen konnte hier das theoretische Potenzial und die Wirksamkeit der partiellen Unterflurabsaugung im Zusammenspiel mit einem nachgeschalteten Luftwäscher zur Reduktion von Ammoniakemissionen aus einem frei belüfteten Rinderstall gezeigt werden.

### Der Einfluss der Anströmrichtung

Die Anströmung senkrecht zum First ist bei der Auslegung und Positionierung eines frei belüfteten Rinderstalls in der Regel die Hauptwindrichtung; sie soll eine gute Durchlüftung des Stallinneren gewährleisten. In der Realität wechseln jedoch die Windrichtungen mehr oder weniger dynamisch. Daher muss die partielle Unterflurabsaugung z. B. auch bei einer Schräganströmung funktionieren. Bei den durchgeführten Simulationen fand eine Betrachtung von sechs verschiedenen Anströmwinkeln  $\alpha$  statt (Abbildung 10).

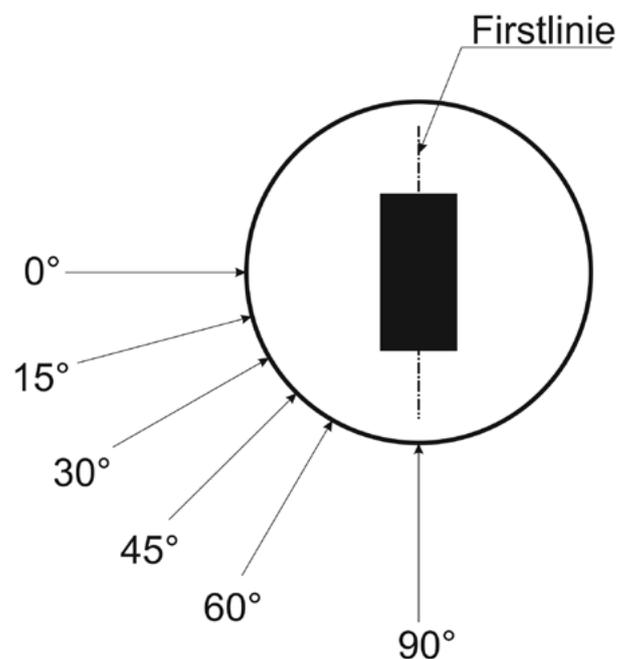


Abbildung 10: Definition der untersuchten Anströmwinkel am Gesamtstall

Die Anströmgeschwindigkeit wurde bei den Winkelvariationen konstant bei  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$  gehalten, der Absaugvolumenstrom betrug  $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$ . In Abbildung 11 sind für jeden Winkel der Betrag der Geschwindigkeit und die Strömungslinien in der x-y-Ebene in einer Höhe von 0,5 m zur Verdeutlichung der Veränderung der Strömung mit fortschreitender Abweichung zur Anströmung mit  $\alpha = 0^\circ$  (senkrecht zum First) dargestellt. Zu erkennen ist der deutliche Einfluss des Anströmwinkels auf die Strömung im Stall, aber auch auf die Strömung stromab des Stalls. Der Unterschied zwischen der Anströmung mit  $\alpha = 0^\circ$  und der mit  $\alpha = 15^\circ$  ist im Stall minimal. Einzig die Position des Wirbelgebietes stromab des Stalls verschiebt sich entsprechend der geänderten Anströmung. Ab einem Winkel von  $\alpha = 30^\circ$  bildet sich an der unteren, windzugewandten Stallwand ein stationärer Wirbel, der mit steigendem  $\alpha$  größer wird, allerdings bei  $\alpha = 60^\circ$  bereits zu zerfallen beginnt. Bei  $\alpha = 90^\circ$  (Anströmung parallel zum First) bilden sich aufgrund des Strömungsabbrisses an der windzugewandten Giebelwand zwei Wirbelgebiete an den langen Stallseiten.

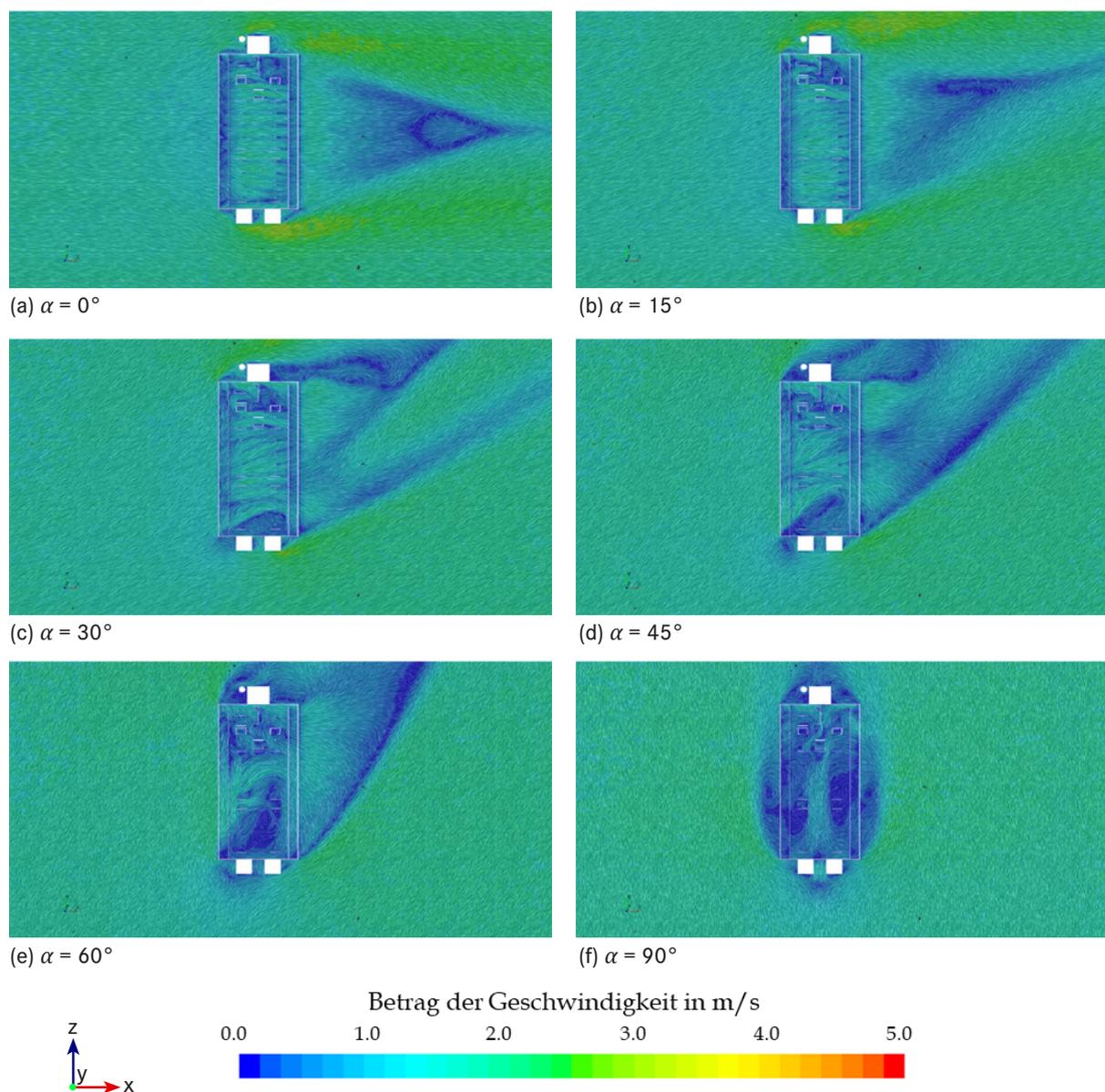


Abbildung 11: Vergleich des Betrags der Geschwindigkeit auf einem Schnitt bei  $z = 0,5$  m bei variierendem Anström-  
winkel, einer Anströmung von  $v_{10} = 3$  m/s und einem Absaugvolumenstrom von  $\dot{V} = 104.000$  m<sup>3</sup>/h pro Absaugkanal

Zu erkennen ist außerdem, dass je mehr die Luft aus der Richtung des Anströmwinkels von  $\alpha = 90^\circ$  kommt und damit auf die geschlossene Giebelwand trifft, desto langsamer ist die Strömung im Stall. Folglich findet auch nur ein geringerer Luftaustausch der Stallluft statt. Daraus wird deutlich, welche Bedeutung die Positionierung eines neuen Stalls bereits in der Planungsphase hat. Eine falsche Orientierung zum Wind, z.B. aufgrund der Ausrichtung zur optimalen Ausnutzung einer Photovoltaikanlage, kann für die Tiere und die Emissionen starke negative Auswirkungen haben.

Bei Betrachtung der entsprechenden Ammoniakverteilungen in Abbildung 12 zeigt sich eine klare Korrelation zwischen der Wirbelbildung und einer lokalen Steigerung der Schadgaskonzentration.

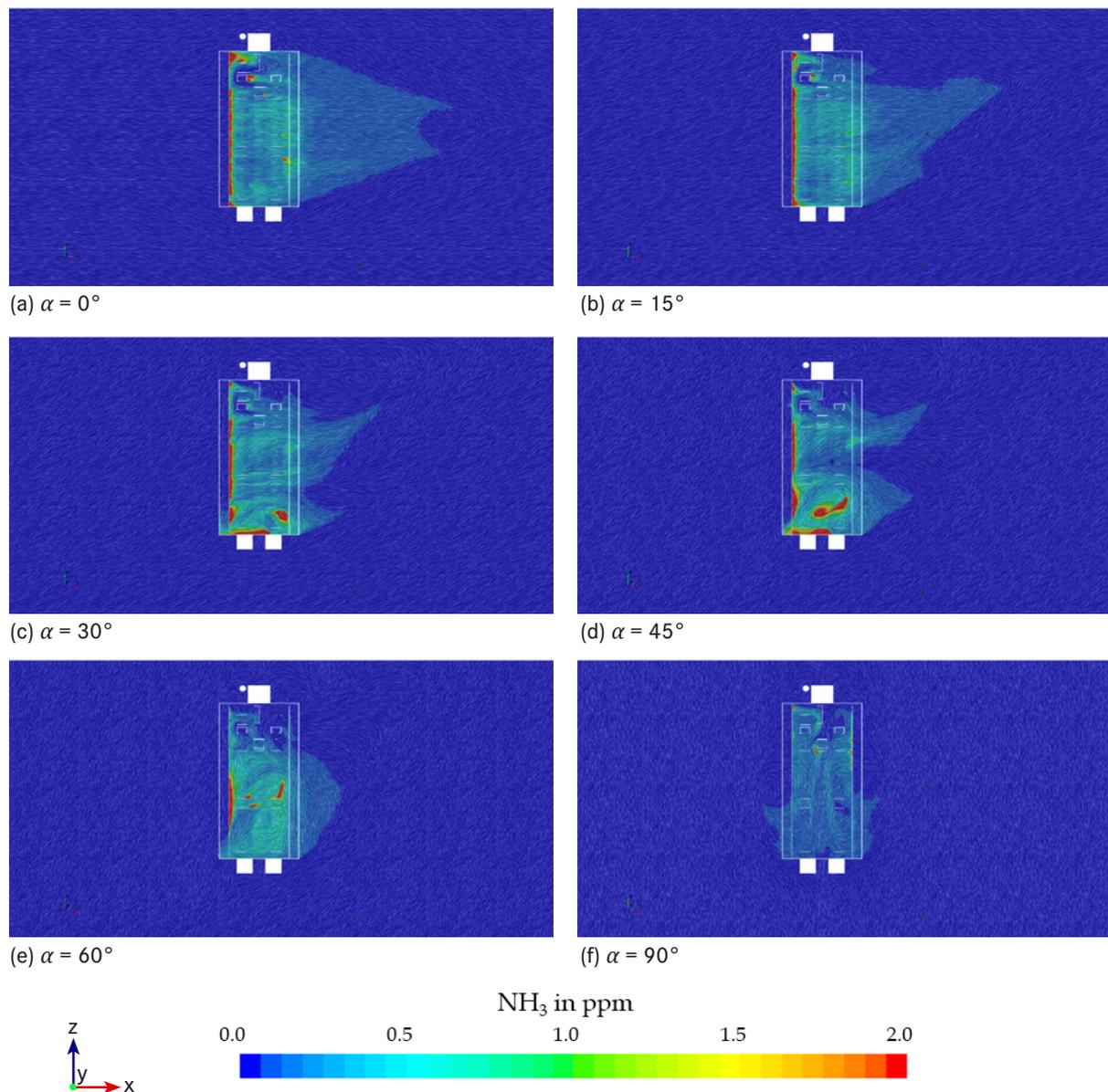


Abbildung 12: Vergleich der Ammoniakverteilung auf einem Schnitt bei  $z = 0,5$  m bei variierendem Anströmwinkel, einer Anströmung von  $v_{10} = 3$  m/s und einem Absaugvolumenstrom von  $\dot{V} = 104.000$  m<sup>3</sup>/h

Zwischen den Ammoniakkonzentrationen bei den Anströmwinkeln  $\alpha = 0^\circ$  und  $\alpha = 15^\circ$  gibt es nur minimale Unterschiede, da sich die Durchströmung des Stalls nicht gravierend ändert. Ab  $\alpha = 30^\circ$  bilden sich in dem bereits oben beschriebenen Wirbel auf der windzugewandten Stallwand mehrere kleinere Gebiete mit einer erhöhten Konzentration von Ammoniak. Diese vergrößern sich mit steigendem Anströmwinkel weiter und erreichen ihr Maximum bei  $\alpha = 45^\circ$ . Aufgrund der Wirbelstruktur entsteht hier ein Gebiet stärkeren Unterdrucks, sodass die Unterflurabsaugung bei gleicher Leistung lokal weniger Gegendruck aufbauen kann.

Als Vergleich wurde eine Simulation durchgeführt, bei der für einen Anströmwinkel von ebenfalls  $\alpha = 45^\circ$  keine partielle Unterflurabsaugung installiert ist (Abbildung 13). Hierdurch nimmt der Bereich mit stark erhöhter Ammoniakkonzentration fast die gesamte windzugewandte Stallhälfte ein.

Diese Anreicherung hat nicht nur eine extreme Verschlechterung der Luftqualität im Stallinneren, sondern auch eine starke Erhöhung der Ammoniakemissionen in die Umwelt zur Folge.

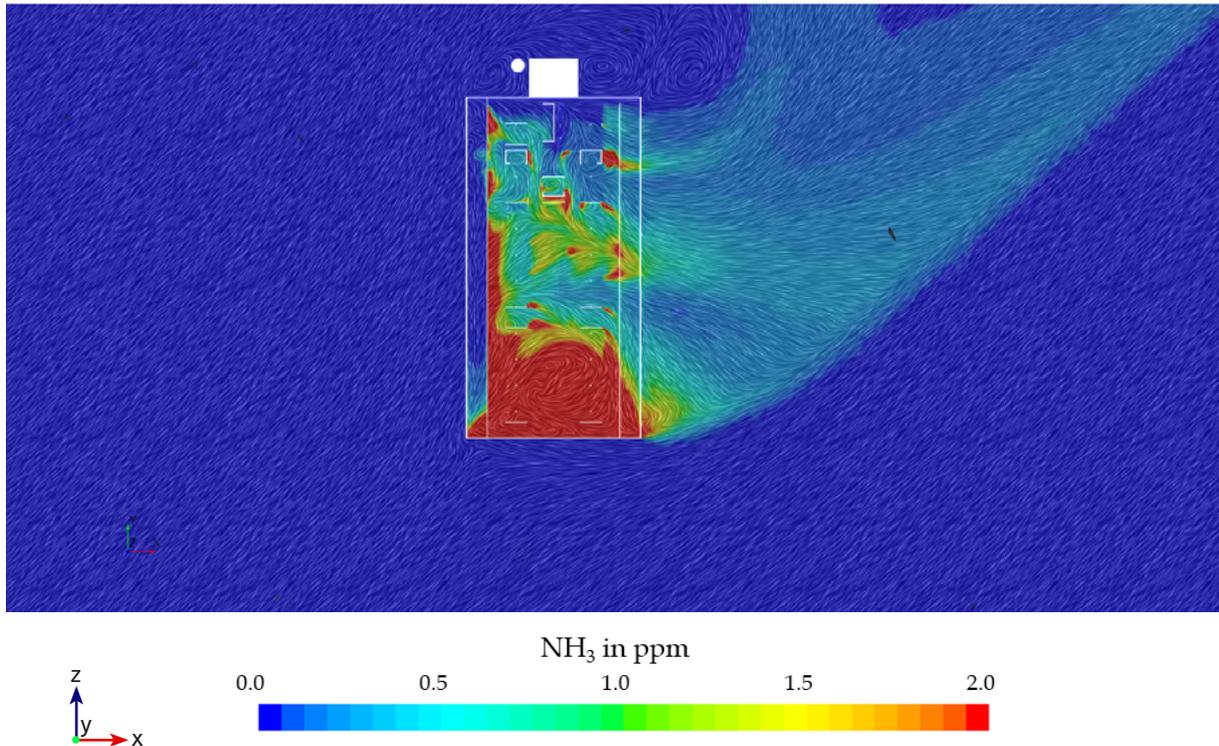


Abbildung 13: Ammoniakverteilung auf einem Schnitt bei  $z = 0,5$  m bei einem Anströmwinkel  $\alpha = 45^\circ$ , einer Anströmung von  $v_{10} = 3$  m/s und ohne partielle Unterflurabsaugung

Die Auswertung der Ammoniakmassenströme, die den Stall verlassen, ist in Abbildung 14 unter Berücksichtigung des Massenstroms aus dem Luftwäscher dargestellt. Es zeigt sich eine starke Minderung der Ammoniakmassenströme unabhängig vom Anströmwinkel.

Die Minderung im Oberflurbereich nimmt mit einem Anströmwinkel, der parallel zur Firstlinie verläuft, zu, da bei gleichbleibender Absaugleistung der Druckgradient zwischen Unter- und Oberflurbereich geringer wird. Der Unterfluranteil bleibt annähernd konstant. Dies weist auf eine sehr gute Wirksamkeit der partiellen Unterflurabsaugung hin.

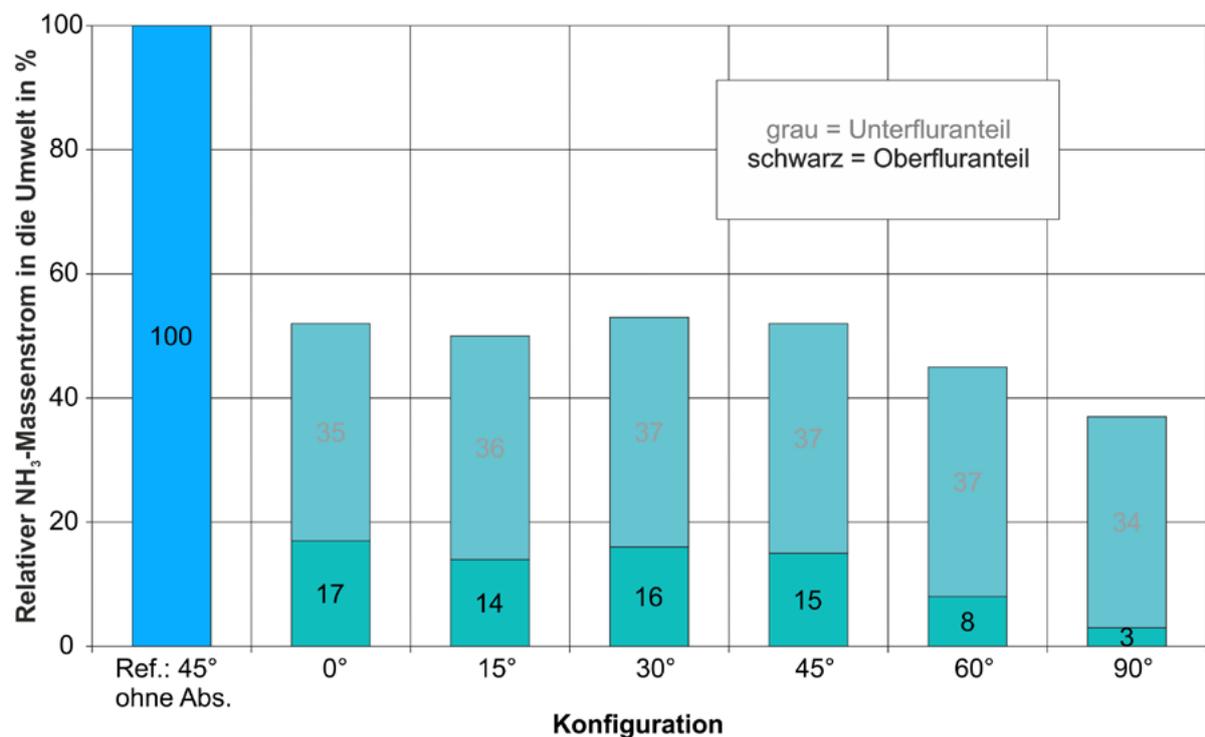


Abbildung 14: Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt für die verschiedenen Anströmwinkel  $\alpha$  bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $\dot{V}=104.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , einem Absaugvolumenstrom von  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$  und einer Reinigungsleistung des nachgeschalteten Luftwäschers von 70 %; Referenz: Anströmwinkel  $\alpha = 45^\circ$  ohne partielle Unterflurabsaugung

## Der Einfluss von Windbrechmechanismen

In der heutigen Praxis findet die Steuerung und Nutzung von Jalousien in Abhängigkeit von Klimaparametern statt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten wird der Querschnitt der Seitenwand reduziert, um die Zugluft im Stall vor allem im Winter zu minimieren (ETLINGER 2017, CADUFF 2020). Bei modernen Seitenlüftungssystemen kommen eine Kombination von Jalousien, die den Wind zu 100 % abblocken, und Windschutznetzen mit verschiedenen Durchlässigkeiten zum Einsatz (HUESKER SYNTHETIC GMBH 2020).

Im numerischen Modell wurde dies auf die folgende Art und Weise abgebildet: Bei geringen Windgeschwindigkeiten ( $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ) kommen keine Jalousien zum Einsatz. Daher wurde in den Simulationen für die oberen zwei Drittel der Seitenwand ein Windschutznetz mit einer schwachen Bremswirkung vorgesehen. Im unteren Drittel wurde zur Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit über den Spaltenböden die Durchlässigkeit halbiert. Bei mittleren Windgeschwindigkeiten ( $v_{10} = 5 \text{ m/s}$ ) wird der obere, hoch durchlässige Bereich vollständig mit Jalousien geschlossen, sodass die Luft nur noch durch das gering durchlässige Netz im unteren Drittel der Seitenwand in den Stall eindringen kann. Bei noch höheren Windgeschwindigkeiten ( $v_{10} = 10 \text{ m/s}$ ) werden die Jalousien von unten hochgefahren, bis nur noch circa 1/5 der Seitenwand mit einem Windschutznetz mit schwacher Bremswirkung geöffnet ist. Eine grafische Darstellung dieser drei Modelle findet sich in Abbildung 15.

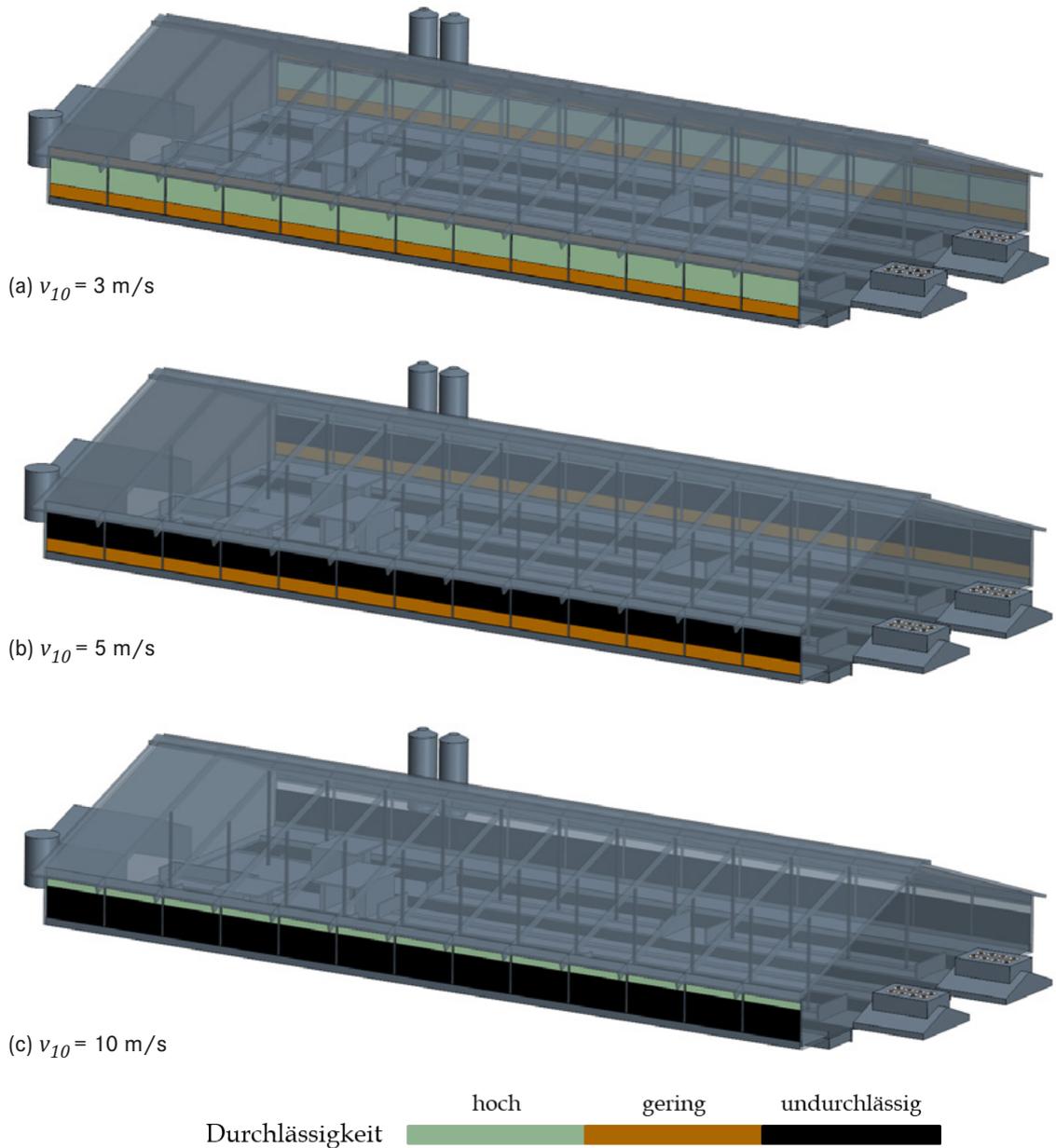
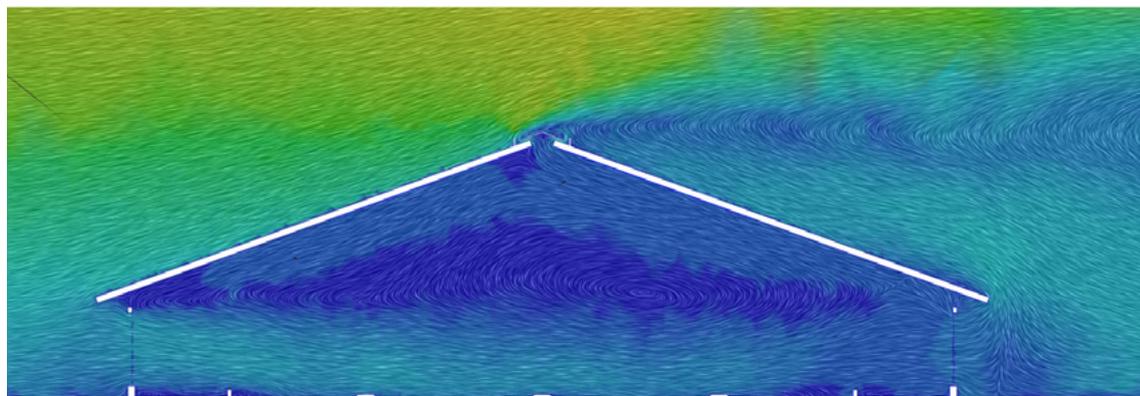
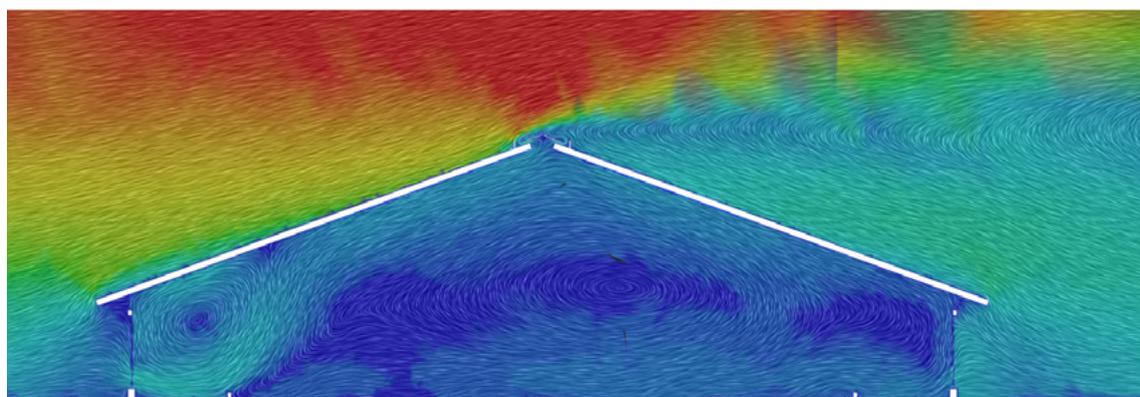


Abbildung 15: Konfiguration der Windschutznetze und Jalousien für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten

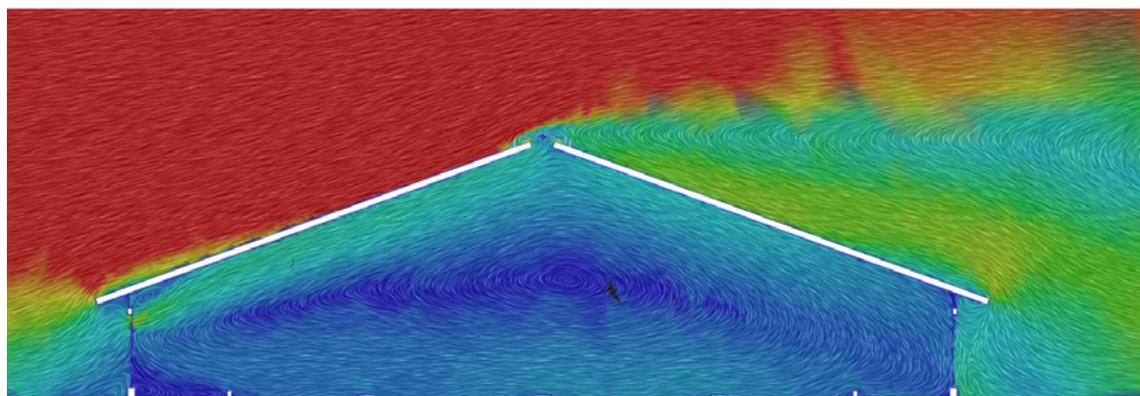
Abbildung 16 zeigt die resultierenden Geschwindigkeitsverteilungen für die jeweiligen Konfigurationen der Windschutznetze und Jalousien aus Abbildung 15. Die Simulationen wurden bei einem konstanten Absaugvolumenstrom von  $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem konstanten Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  durchgeführt.



(a)  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$



(b)  $v_{10} = 5 \text{ m/s}$



(c)  $v_{10} = 10 \text{ m/s}$



Abbildung 16: Darstellung des Schlierenbildes und der Geschwindigkeitsverteilung im Mittelschnitt des Stalls für die drei optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmgeschwindigkeit, einem Absaugvolumenstrom von  $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem konstanten Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$

Es ist zu erkennen, dass bei allen drei Konfigurationen trotz der stark variierenden äußeren klimatischen Verhältnisse in etwa die gleiche Luftgeschwindigkeit im Stallinneren herrscht. Dies resultiert bei gleichem Absaugvolumenstrom in einer ähnlichen Ammoniakverteilung (Abbildung 17).

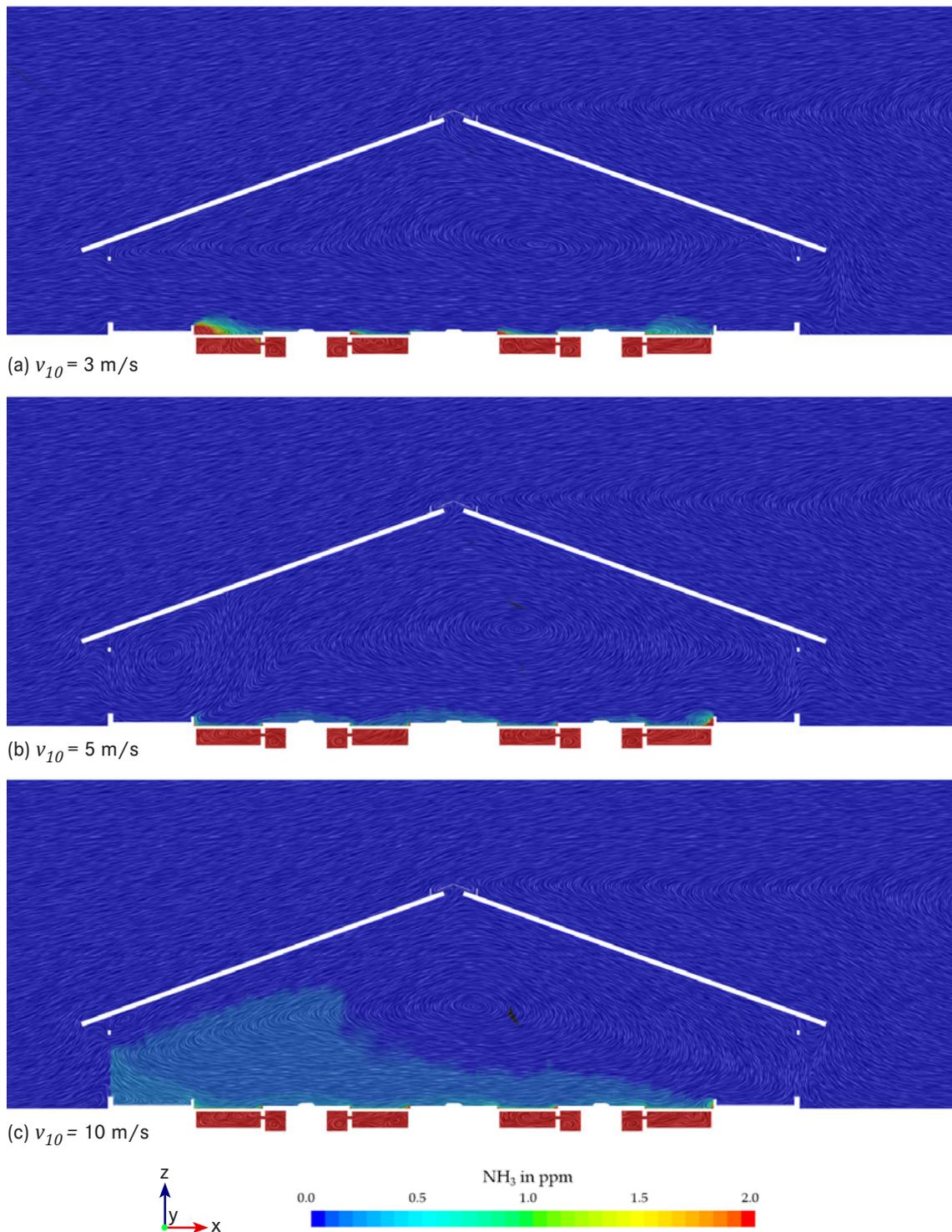


Abbildung 17: Darstellung des Schlierenbildes und der Ammoniakverteilung im Mittelschnitt des Stalls für die drei optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmgeschwindigkeit, einem Absaugvolumenstrom von  $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem konstanten Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$

Das Balkendiagramm in Abbildung 18 zeigt die resultierenden Ammoniakmassenströme in die Umwelt.

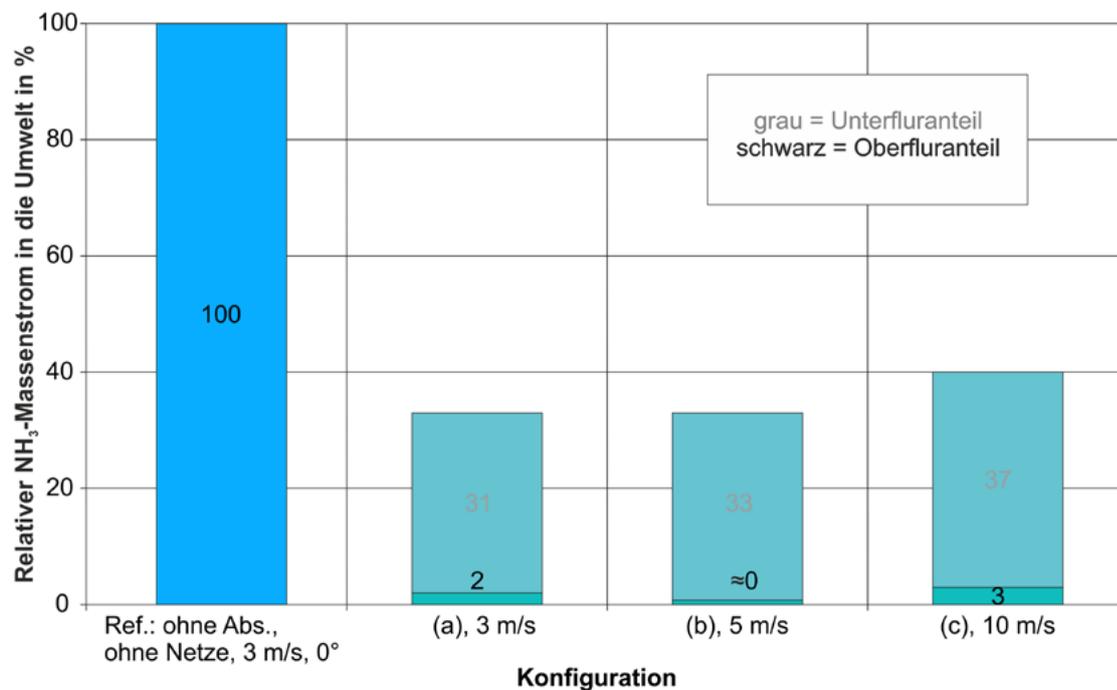


Abbildung 18: Balkendiagramm zum Vergleich des Ammoniakmassenstroms in die Umwelt für die drei für die Absaugung optimierten Kombinationen der Windschutznetze und Jalousien bei einer variierenden Anströmgeschwindigkeit, einem Absaugvolumenstrom von  $\dot{V} = 104.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , einem konstanten Anströmwinkel von  $\alpha = 0^\circ$  und einer Reinigungsleistung des Luftwäschers von 70 %; Referenz: ohne partielle Unterflurabsaugung, ohne Windschutznetze,  $v_{10} = 3 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 0^\circ$

Es zeigt sich, dass eine Kombination aus partieller Unterflurabsaugung, nachgeschalteter Abluftreinigung und intelligenter Steuerung der Windbrechmechanismen zu einer erheblichen Reduktion des Ammoniakmassenstroms (der Oberfluranteil wird dabei auf nahe Null reduziert) aus einem frei belüfteten Rinderstall bei unterschiedlichen Windstärken führen kann, ohne die Luftqualität im Stallinnenraum relevant zu verschlechtern.

## Diskussion

Die in dieser Arbeit gefundenen Minderungsmöglichkeiten für die Ammoniakemissionen eines frei belüfteten Rinderstalls durch eine partielle Unterflurabsaugung übertreffen die von anderen Simulationsstudien zu diesem Thema ohne Berücksichtigung des Luftwäschers deutlich. BJERG und ANDERSEN (2010) fanden in ihren Simulationen Minderungen von 33 % bis etwas mehr als 50 % und SAPOUNAS et al. (2009) von 8 % bis 48 % je nach Wetterlage. Erstere betrachteten in ihren Simulationen einen maximalen Volumenstrom von  $160 \text{ m}^3/\text{h}/\text{HPU}$  (vereinfacht: 1 HPU =  $\frac{1}{4}$  Kuh). Übertragen auf den in dieser Untersuchung betrachteten Stall mit einer Kapazität von 255 Kühen entspräche dies einem Absaugvolumenstrom von  $30.600 \text{ m}^3/\text{h}$ . Sapounas et al. (2009) simulierten bei ihren Untersuchungen zwei Volumenströme von  $250 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Kuh}$  und  $500 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Kuh}$ . Übertragen auf den hier untersuchten Stall ergeben sich damit Volumenströme von  $63.750 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $127.500 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die in dieser Studie simulierten Volumenströme liegen jedoch deutlich darüber, wodurch sich die

große Differenz erklären lässt. Eine Nachbehandlung der Abluft wird in den beiden Studien ebenfalls nicht berücksichtigt, sodass in diesen Arbeiten die erzielten Minderungen überschätzt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei einer weiteren Steigerung des Absaugvolumenstroms in die Größenordnung der vorliegenden Arbeit auch eine weitere Erhöhung der Minderungsleistung erzielt werden kann, wodurch sich die Ergebnisse der Studien und dieser Arbeit wieder annähern würden. Darüber hinaus stellten SAPOUNAS et al. (2009) eine grundsätzliche Verbesserung der Durchlüftung des Stalles mit Betrieb einer partiellen Unterflurabsaugung fest. Dieses Thema wurde in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt, bietet jedoch Potenziale für weitere Untersuchungen. Gerade bei der Betrachtung der Luftwechselrate eines frei belüfteten Stalls kann die Unterflurabsaugung eine große Rolle spielen. Da bei Windstille keine Durchlüftung des Stalls stattfindet, ist es durch die partielle Unterflurabsaugung möglich, in Kombination mit einer Emissionsminderung hierfür einen wichtigen Beitrag zu leisten. So könnte sie als Ergänzung oder Ersatz zu den heute gebräuchlichen großen Ventilatoren im Oberflurbereich, die keinerlei emissionsmindernde Wirkung haben, arbeiten. Das exakte Potenzial muss jedoch zunächst in weiteren Arbeiten untersucht werden.

In beiden oben zitierten Studien wurden die Tiere im Stall als poröses Volumen simuliert. In den vorliegenden Simulationen wurden keine Tiere simuliert. DE PAEPE (2014) fand sowohl im Windkanal als auch mit numerischen Modellen heraus, dass Hindernisse im Stall die Ammoniakkonzentration über dem Spaltenboden durch die Ablenkung der Luft nach unten in den Güllekeller und der damit einhergehenden Steigerung der Turbulenz erhöhen, wodurch die Emissionen ebenfalls steigen. Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass unter Berücksichtigung der Tiere die Emissionen aus dem Stall auch mit einer partiellen Unterflurabsaugung wieder etwas ansteigen werden.

Der grundlegende Zusammenhang zwischen der äußeren Windgeschwindigkeit, dem Absaugvolumenstrom und dem Ammoniakmassenstrom ist jedoch in allen oben erwähnten Arbeiten inklusive der vorliegenden Untersuchung gleich: Je höher die äußere Windgeschwindigkeit, mit der die Luft in den Stall eindringt, desto geringer sind die Minderungen durch die partielle Unterflurabsaugung bei gleichbleibendem Volumenstrom. BJERG und ANDERSEN (2010) stellten darüber hinaus in Übereinstimmung mit dieser Untersuchung fest, dass der Wirkungsgrad der partiellen Unterflurabsaugung durch eine intelligente Steuerung der Seitenwandöffnungen (Windschutznetze und Jalousien in dieser Simulation) erhöht werden kann.

Auch die grundlegenden Strömungsvorgänge im Inneren des Stalles ohne Berücksichtigung der partiellen Unterflurabsaugung, aber unter dem Einfluss variierender Seitenwandöffnungen und Anströmwinkel, konnten in anderen Studien, die sich hauptsächlich mit Windkanalversuchen beschäftigen und damit eine Validierung der Simulationsergebnisse erlauben, gefunden werden (CHOINIÈRE und MUNROE 1994, QIANYING et al. 2018, MORSING et al. 2002).

## Schlussfolgerungen

Mithilfe der Strömungssimulation an einem numerischen Modell eines Boxenlaufstalls wurde gezeigt, dass durch die partielle Unterflurabsaugung ein signifikanter Einfluss auf die Ammoniakemissionen eines frei belüfteten Rinderstalls erlangt werden kann. In Kombination mit einer nachgeschalteten Abluftreinigungsanlage können diese deutlich gesenkt werden. Bei einer Anströmung senkrecht zum First, geöffneten Jalousien und einer theoretischen Wäscherleistung von 70 % kann die Reduktion des  $\text{NH}_3$ -Massenstroms in die Umwelt bis zu 52 % betragen. Bei einer Erhöhung der Wäscherleistung kann dieser Wert aber weiter verbessert werden. Eine theoretische Reinigungsleistung von 85 %

könnte die Emissionen beispielsweise um bis zu 72 % reduzieren. Auch für wechselnde Bedingungen, seien es unterschiedliche Windrichtungen und -geschwindigkeiten oder verschiedene Stellungen von Kombinationen aus Windschutznetzen und Jalousien, wurden hohe Emissionsminderungspotenziale und eine Verringerung der Schadgasbelastung im Atembereich der Tiere gefunden. Diesbezüglich muss jedoch beachtet werden, dass durch den Einsatz der Windbremsmechanismen der Charakter eines Außenklimastalls erhalten bleiben muss. Die hier durchgeführten Optimierungen wurden vor allem vor dem Hintergrund der Minimierung der Ammoniakemissionen durchgeführt.

Zu bedenken bleibt ferner, dass die Ergebnisse der numerischen Simulation lediglich das theoretische Potenzial einer solchen Absaugung aufzeigen. Die Ergebnisse müssen daher durch Versuche in der Praxis validiert werden. Mithilfe des numerischen Modells war es aber möglich, in kurzer Zeit eine Vielzahl von verschiedenen Randbedingungen an einem erstellten geometrischen Modell zu untersuchen und lange und teure Vorversuchsreihen zu sparen.

Durch die Heterogenität der untersuchten Randbedingungen ist es zudem wünschenswert, in jedem Bereich noch weitere und tiefergehende Untersuchungen und Simulationen durchzuführen. Vor allem im Bereich der Windschutznetze wurden nur erste Schritte in die Thematik gemacht. Die weiterführenden Untersuchungen betreffen dabei nicht unbedingt nur den Bereich der partiellen Unterflurabsaugung, sondern beispielsweise auch Untersuchungen zur Verteilung der Feuchtigkeit im Stall bei warmen Schwachwindlagen (natürliche Konvektion) oder zum generellen Einfluss verschiedener Steuerungskonzepte der Windbrechmechanismen auf die Durchströmungscharakteristik eines frei belüfteten Stalls.

Unabhängig von dieser Arbeit sollte allgemein der Nutzen der numerischen Simulation im Entwicklungsprozess von Techniken und Prozessen in der Landwirtschaft durch weitere Projekte stärker ins Bewusstsein der Akteure gebracht werden.

## Literatur

- Bjerg, B.; Andersen, M. (2010): Numerical simulation of a pit exhausts system for reduction of ammonia emission from a naturally ventilated cattle building. In: XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR). Canadian Society for Bioengineering (CSBE/SCGAB), [https://www.researchgate.net/publication/270886018\\_Numerical\\_simulation\\_of\\_a\\_pit\\_exhausts\\_system\\_for\\_reduction\\_of\\_ammonia\\_emission\\_from\\_a\\_naturally\\_ventilated\\_cattle\\_building](https://www.researchgate.net/publication/270886018_Numerical_simulation_of_a_pit_exhausts_system_for_reduction_of_ammonia_emission_from_a_naturally_ventilated_cattle_building), Zugriff am 04.11.2020
- Caduff, A. (2020): Stallklima überprüfen!. <https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/dvs/lbbz/beratungfachwissen/tierhaltung/kuhsignale/Documents/Stallklima.pdf>, Zugriff am 06.11.2020
- Choinière, Y.; Munroe, J. A. (1994): A wind tunnel study of wind direction effects on airflow patterns in naturally ventilated swine buildings. CBE Journal 36, pp 93–101, [http://csbe-scgab.ca/docs/journal/36/36\\_2\\_93\\_ocr.pdf](http://csbe-scgab.ca/docs/journal/36/36_2_93_ocr.pdf), Zugriff am 04.11.2020
- De Paepe, M. (2014): Experimental and model-based study of airflows and ammonia distribution in and around animal houses. Ph. D. Thesis, Ghent University, Belgium
- DIN EN 12737:2008-02 (2008): Betonfertigteile - Spaltenböden für die Tierhaltung; Deutsche Fassung EN 12737:2004+A1:2007
- DLG (2020): DLG Prüfberichte. <https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/tests/suche-nach-pruefberichten/?unterkategorie=95&page=1&pruefgebiet=3>, Zugriff am 03.11.2020
- Etlinger, G. (2017): Lüftungsfehler im Rinderstall erkennen und beheben. <https://noe.lko.at/lueftungsfehler-im-rinderstall-erkennen-und-beheben+2500+2624406>, Zugriff am 06.11.2020
- Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Dämmgen, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Freibauer, A.; Döhler, H.; Schreiner, C.; Osterburg, B.; Fuß, R. (2020): Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 - 2018: Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2020. Technical Report 77,

- Johann Heinrich von Thünen-Institut. Thünen-Report, [https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen\\_Report\\_77.pdf](https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_77.pdf), Zugriff am 03.11.2020
- Hahne, J.; Arends, F.; Beverborg, R.; Niehoff, A.-L.; Bönsch, S.; Hortmann-Scholten, A. (2016): Aktuelle Entwicklung Kosten-Nutzenanalyse und Vollzugsempfehlungen für den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen in der Tierhaltung. Dessau: Umweltbundesamt, Texte UBA 2016/61, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktuelle-entwicklung-kosten-nutzenanalyse>, Zugriff am 06.11.2020
- Hahne, J. (2019): Überwachung von biologisch arbeitenden Rieselbettfiltern in der Mastschweinehaltung. Landtechnik 74(6):145-155, <https://doi.org/10.1515/lt.2019.3216>
- Huesker Synthetic GmbH (2020): Agrar. <https://www.huesker.de/produkte/agrar.html>, Zugriff am 06.11.2020
- Krause, K.-H. (2012): EP 2 181583 B1
- Krause, K.-H.; Müller, H.-J.; Mußlick, M.; Linke, S. (2010): Mit intelligenter Lüftung gehen Tiergesundheit, Umweltschutz und Energieeinsparung zusammen. Landtechnik 1, S. 15-19. <https://doi.org/10.1515/lt.2010.447>
- Morsing, S.; Ikeguchi, A.; Bennetsen, J.; Strøm, J.; Ravn, P.; Limi, O. (2002): Wind induced isothermal airflow patterns in a scalemodel of a naturally ventilated swine barn with cathedral ceiling. Applied Engineering in Agriculture 18, pp. 97-101. <https://doi.org/10.13031/2013.7708>
- Mußlick, M.; Krause, K. H.; Sickert, G. (2015): Alternative raumluftechnische Konzepte der Emissionsminderung in der Schweinehaltung unter den Gesichtspunkten des Tier- und Umweltschutzes. [https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/alternative\\_raumluftechnische\\_aschara\\_ab-uir.pdf](https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/alternative_raumluftechnische_aschara_ab-uir.pdf), Zugriff am 06.11.2020
- NERC-Richtlinie 2016/2284 (2016): Richtlinie (EU) 2016/2284 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG
- Qianying, Y.; König, M.; Janke, D.; Hempel, S.; Zhang, G.; Amon, B.; Amon, T. (2018): Wind Tunnel Investigations of Sidewall Opening Effects on Indoor Airflows of a Cross-Ventilated Dairy Building. Energy & Buildings. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.026>
- Sapounas, A. A.; Campen, J. B.; Smits, M. C. J.; van Dooren, H. J. C. (2009): Simulating the effect of forced pit ventilation on ammonia emission from a naturally ventilated cowhouse with CFD. <https://edepot.wur.nl/169220>, Zugriff am 04.11.2020
- Statistisches Bundesamt (2020): Viehbestand - Fachserie 3 Reihe 4, 1.-3. November 2019, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/Publikationen/Downloads-Tiere-und-tierische-Erzeugung/viehbestand-2030410195324.pdf>, Zugriff am 06.11.2020
- Tergast, H.; Hansen, H. (2020): Steckbriefe zur Tierhaltung in Deutschland: Milchkühe, [https://www.thuenen.de/media/ti-themenfelder/Nutztierhaltung\\_und\\_Aquakultur/Haltungsverfahren\\_in\\_Deutschland/Milchviehhaltung/Steckbrief\\_Milchkuehe\\_2020.pdf](https://www.thuenen.de/media/ti-themenfelder/Nutztierhaltung_und_Aquakultur/Haltungsverfahren_in_Deutschland/Milchviehhaltung/Steckbrief_Milchkuehe_2020.pdf), Zugriff am 06.11.2020
- UBA (2014): Ammoniak. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/ammoniak>, Zugriff am 06.11.2020
- VERA (2020): VERA Verifizierungsurkunden. <https://www.vera-verification.eu/de/vera-urkunden>, Zugriff am 03.11.2020

## Autoren

**M. Sc. Julian Hartje** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und **Stefan Linke** ist technischer Mitarbeiter am Thünen-Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 47, 38116 Braunschweig, E-Mail: [julian.hartje@thuenen.de](mailto:julian.hartje@thuenen.de)

## Hinweise und Danksagung

Der Artikel enthält große Teile aus dem Endbericht zum Projekt „Die partielle Unterflurabsaugung zur Senkung der Emissionen und Verbesserung des Tierschutzes bei natürlich belüfteten Rinderställen“. Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert und trägt die Projektnummer 33789, [https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33789\\_01-Hauptbericht.pdf](https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33789_01-Hauptbericht.pdf)